

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЕЙ

Приведены результаты исследований эффективности очистки отработавших газов от дисперсных частиц в электрокаталитическом фильтре в зависимости от температуры, напряжения между электродами, геометрических параметров коронирующего и осадительного электродов. Экспериментально выявлено, что с повышением температуры эффективность очистки снижается. Предлагается одновременно снизить выбросы  $NO_x$  путем применения селективной системы нейтрализации (SCR). Для этого необходимо использовать на входе в реактор SCR нагреватель отработавших газов для поддержания оптимальной температуры реакции восстановления  $NO_x$ , а затем расположить электрофильтр. Подаваемый в электрофильтр воздух обеспечит электрическую изоляцию коронирующего электрода и снизит температуру отработавших газов, что повысит эффективность улавливания частиц. Уловленную сажу предлагается регенерировать путем включения второго нагревателя отработавших газов по сигналу от датчика противодавления фильтрующего слоя.

### Введение

Для обеспечения ужесточающихся требований по выбросам отработавших газов (ОГ) необходимо совершенствование существующих и использование новых способов нейтрализации ОГ.

В ОГ дизелей основные вредные компоненты это  $NO_x$  и дисперсные частицы (ДЧ) [1]. Требования к выбросам ДЧ, согласно табл. 1, все время ужесточаются [2].

Таблица 1. Массовый выброс ДЧ и количество частиц для действующих и перспективных дизелей

Двигатели	Массовый выброс ДЧ	Количество ДЧ
	мг/(кВт·ч)	частиц/(кВт·ч)
Действующие дизели	10	$1 \cdot 10^{13}$
Перспективные дизели	1	$10^{11}$

В настоящее время большое внимание уделяется альтернативным биодизельным топливам (БТ). Но при их использовании возникают новые проблемы. БТ становится источником ультратонких ДЧ, так как при его использовании максимальное содержание ДЧ приходится на размеры 10-30 нм, а при работе на дизельном топливе – 30-100 нм.[3].

Следовательно, снижение количества ДЧ становится актуальной задачей, решение которой требует применения специальных устройств для их коагуляции и осаждения, например, сажевых фильтров и электрофильтров (ЭФ).

На рис. 1 представлена степень очистки ОГ от размера ДЧ различными устройствами [2].

Из графика следует, что эффективность очистки волокнистым и керамическим фильтрами выше, чем в ЭФ. Но гидравлическое сопротивление таких фильтров больше.

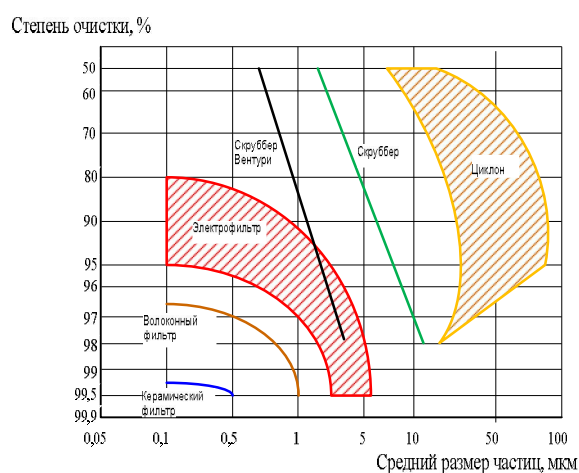


Рис. 1. Степень очистки различными устройствами от размера частиц

Преимуществом электрического фильтра является высокая степень очистки ОГ от ДЧ при низком гидравлическом сопротивлении. К недостаткам следует отнести необходимость электрического питания, обеспечение гарантированной электрической изоляции подводящего провода к коронирующему электроду и необходимость удаления сажи, осевшей в осадительном электроде.

Поэтому целесообразно рассматривать использование электрокаталитического фильтра (ЭКФ), представляющего собой комбинацию керамики с электрофильтром, в котором будет происходить не только улавливание ДЧ, но и их каталитическая регенерация.

Это направление представляет научный интерес и является важной практической задачей.

**Цель исследований** – выявить особенности очистки ОГ от ДЧ в электрокаталитическом фильтре (ЭКФ) и на их основе разработать рекомендации по созданию эффективной системы очистки ОГ.

**Объектом исследований** являлись ЭКФ и каталитический реактор (КР), установленный последовательно на стендах с дизелями 2Ч 8,5/11 и 1Ч 12/14.

**Экспериментальная установка**

При проведении исследования ЭКФ дизели использовались в качестве генераторов ОГ. Стенд с

дизелем 2Ч 8,5/11 был оснащен нагревателем ОГ, обеспечивающим температуру 500 С, без изменения режима работы двигателя и уровня выбросов вредных веществ, что позволяло оценивать влияние температуры на процессы очистки ОГ (рис. 2).

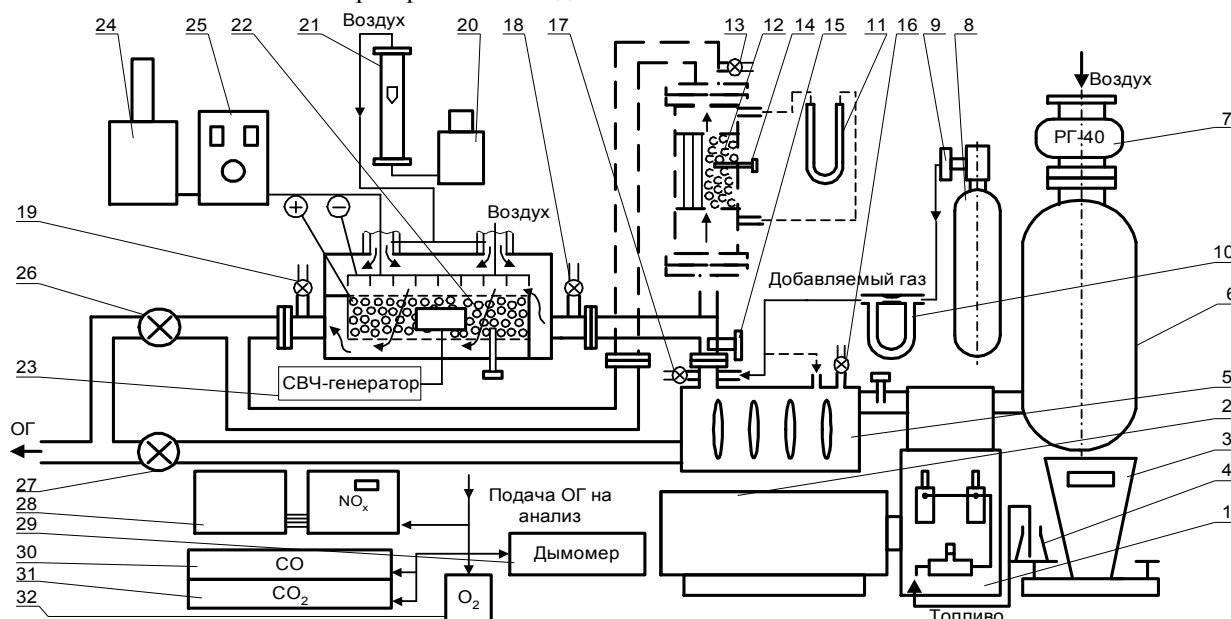


Рис. 2. Схема установки для исследования систем очистки ОГ дизеля:

- 1 – дизель 2Ч 8,5/11 (5Д2); 2 – электродвигатель (генератор); 3 – весы; 4 – мерная колба; 5 – нагреватель ОГ; 6 – воздушный ресивер; 7 – газовый счетчик РГ-40; 8 – баллон с газом-восстановителем; 9 – редуктор; 10 – реометр; 11 – водяной манометр; 12 – каталитический нейтрализатор; 14, 15 – термопары; 13, 16, 17, 18, 19 – газоотборные краны; 20 – побудитель расхода; 21 – ротаметр; 22 – ЭКФ; 23 – СВЧ-генератор; 24 – высоковольтный трансформатор; 25 – блок управления питания ЭКФ; 26, 27 – перепускные краны; 28 – «344ХЛ 01»; 29 – «ИДС-1»; 30 – «ГИАМ-15»; 31 – «ГИАМ-14»; 32 – «Оксид-103»

На стенде предусмотрена установка как ЭКФ (22), так и КР (12), позволяющего дополнительно оценивать особенности регенерации сажи в зависимости от температуры на различных катализаторах.

Для проведения исследований были изготовлены три варианта ЭКФ, обеспечивающие широкий диапазон определяемых параметров: по геометрическим размерам коронирующего и осадительного электродов, зазору между электродами и т. д.

Один из вариантов ЭКФ представлен на рис. 3. Была разработана конструкция керамического изолятора с лабиринтным уплотнением, основанная на защите внутренней поверхности изолятора воздухом от попадания на неё ДЧ.

При движении ОГ внутри фильтра, от входного патрубка к осадительному электроду, ДЧ попадают в зону коронного разряда, находящуюся в пространстве между коронирующим электродом 3,

имеющим воздушную изоляцию, и осадительным электродом 4, где получают отрицательный электрический заряд и, проходя через фильтрующий слой 5, притягиваются к поверхности катализатора, имеющего положительный потенциал. Затем путем изменения температурного режима исследовались режимы регенерации.

**Методики исследований**

Измерения ДЧ производились до и после ЭКФ и КР. Одновременно использовались два дымомера типа ИДС-1С, и аллонжи с фильтрами для оценки массовых выбросов и корреляции между массовыми выбросами и показаниями дымомеров. Это позволило оценить сажесодержание катализаторов перед регенерациями.

Для оценки влияния электрического поля на эффективность очистки ОГ от ДЧ производились измерения без изменения режимов работы дизелей с наложением и без наложения электрического поля.

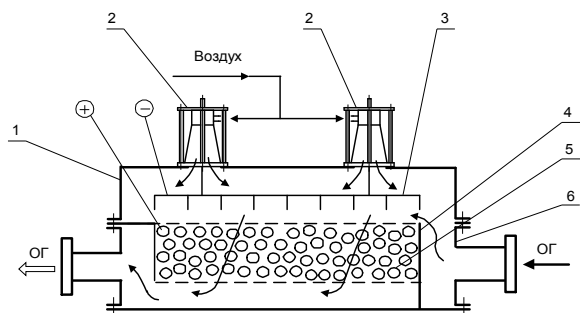


Рис. 3. Схема ЭКФ:

1 – крышка, 2 – изолятор, 3 – коронирующий электрод, 4 – осадительный электрод, 5 – пористая структура, 6 – корпус

Также оценивалось влияние на эффективность очистки различных материалов фильтрующего слоя: металлической сетки, катализаторов: шарикового МХО ( $\text{CuO}:\text{Cr}_2\text{O}_3 - 5\%:5\%$ ) и КС ( $\text{CuO}:\text{Cr}_2\text{O}_3:\text{Zn} - 5\%:5\%:1\%$ ) в виде экструдата.

В КР был выполнен зонд, позволяющий извлекать гранулы катализатора и фиксировать их внешний вид без остановки двигателя.

С помощью нагревателя ОГ инициировалось начало регенерации ДЧ в осадительном электроде.

Результаты исследований

При исследованиях дана оценка влияния различных параметров на эффективность очистки и регенерации ОГ от ДЧ в ЭКФ [4].

К основным результатам следует отнести изменение эффективности очистки ЭКФ от температуры (рис. 4).

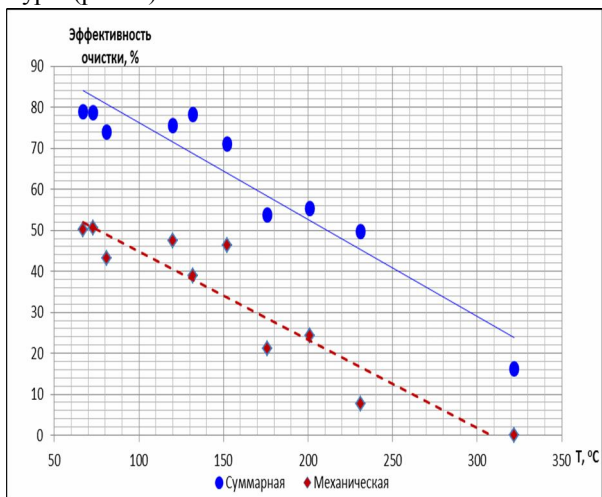


Рис. 4. Зависимость эффективности улавливания ДЧ в зависимости от температуры ОГ при объемной скорости  $29800 \text{ ч}^{-1}$  на катализаторе МХО

Из графика следует, что суммарная эффективность очистки (с наложением электрического поля) выше, чем механическая (без наложения

поля). Например, при температуре  $70^\circ\text{C}$  механическая очистка составляет 55 %, а суммарная – 83 %. Общим для этих процессов является уменьшение эффективности с увеличением температуры.

С повышением напряжения в ЭКФ до 25кВ эффективность очистки возрастает, но далее увеличивается незначительно.

Эффективность также возрастает с увеличением высоты и входной площади фильтрующего слоя. Одним из определяющих факторов, влияющих на эффективность очистки, может являться время нахождения частицы в ЭКФ. При его увеличении эффективность очистки ОГ повышается. При этом отмечается низкое гидравлическое сопротивление фильтрующего слоя, которое не превышает 80 мм водяного столба во всем диапазоне работы ЭКФ.

Межэлектродный зазор составлял около 30 мм. При этом отмечено, что с увеличением межэлектродного зазора эффективность очистки несущественно повышается.

Количество иголок на коронирующем электроде не оказывает заметного влияния на эффективность. ЭКФ может работать и с плоским коронирующим электродом, но в этом случае отмечается неустойчивая работа электрической части.

В КР с помощью зонда выявлено, что начало прекращения осаждения ДЧ на катализаторе начинается с  $350^\circ\text{C}$ .

Исследовались следующие режимы регенерации: «жесткая» и «мягкая». Для получения «жесткой» регенерации КР в течение 46 часов при температуре, ниже температуры регенерации накапливались ДЧ и затем, за счет нагревателя ОГ, повышалась температура до начала регенерации. Сажеёмкость составила 22 г на литр катализатора. За это время противодавление повысилось со 100 до 950 мм вод. ст. После повышения температуры с помощью нагревателя ОГ до  $225^\circ\text{C}$  было зафиксировано начало регенерации, которое сопровождалось повышением температуры выше  $1200^\circ\text{C}$ . Выбросы  $\text{CO}_2$  выросли с 2,6 до 13,75 об. %,  $\text{CO}$  с 549 до 1200 чнм. При этом сгорели все три термопары, прогорела верхняя ограничительная решетка толщиной 5 мм и гранулы катализатора вплавились в решетку. Через 18 минут регенерация закончилась и показатели стабилизировались до первоначальных показателей.

Далее была обеспечена в ЭКФ «мягкая» регенерация при объемной скорости  $8100 \text{ ч}^{-1}$ . Она началась при температуре около  $290^\circ\text{C}$  и поднялась до  $527^\circ\text{C}$ . При этом противодавление упало с 80 до 55 мм вод ст. Активный процесс регенерации проте-

кал примерно 16 минут без разрушения элементов ЭКФ.

Общим выводом по результатам регенерации является то, что температура регенерации зависит от объема осажденной сажи и каталитических свойств фильтрующего слоя, а критерием необходимости регенерации может являться величина противодействия слоя катализатора.

К недостаткам исследованной конструкции ЭКФ следует отнести наличие воздушного изолятора. Для устранения этого недостатка была разработана и изготовлена экспериментальная конструкция изолятора с высокой сажеёмкостью без подачи воздуха, а его предварительные испытания показали перспективность этого направления [5].

#### Рекомендации по разработке ЭКФ

С учетом результатов исследования ЭКФ предлагается его усовершенствованная конструкция (рис. 5).

Для одновременного снижения  $\text{NO}_x$  и ДЧ необходимо установить реактор SCR (селективное восстановление  $\text{NO}_x$ ) [6]. А для поддержания оптимальной температуры в SCR перед ним расположить нагреватель ОГ, который разработан и уже используется фирмой EMITEC для выхода на рабочий режим нейтрализатора при запуске двигателя [7].

При этом для обеспечения продолжительной работы ЭКФ без электрического пробоя использовать для изоляции воздух, который будет защищать электроды от пробоя. Также воздух будет снижать

температуру ОГ, что позволит повысить эффективность улавливания ДЧ на осадительном электроде.

Возникает вопрос об утилизации сажи на осадительном электроде. Наиболее эффективно – это ее дожигание, которое можно обеспечить при включении второго по ходу нагревателя ОГ, осуществляющего каталитическое дожигание сажи на осадительном электроде при 250-350°C. Включение нагревателя может регулироваться по заданной величине противодействия системы нейтрализации.

#### Заключение

Ужесточение требований к очистке ОГ от ДЧ требует использования эффективных устройств, в частности, электрофильтров.

Эффективность предлагаемого ЭКФ при 70°C без подачи напряжения (механическая очистка) составляет 55 %, с подачей напряжения – 83 %. С повышением температуры ОГ эффективность очистки снижается.

Для одновременного снижения выбросов  $\text{NO}_x$ , предлагается применять систему SCR. Поэтому рациональным является использование на входе в реактор SCR нагревателя ОГ для поддержания оптимальной температуры реакции восстановления  $\text{NO}_x$ , а затем расположить электрофильтр.

Подаваемый в электрофильтр воздух обеспечит электрическую изоляцию коронирующего электрода и снизит температуру ОГ, что повысит эффективности улавливания ДЧ.

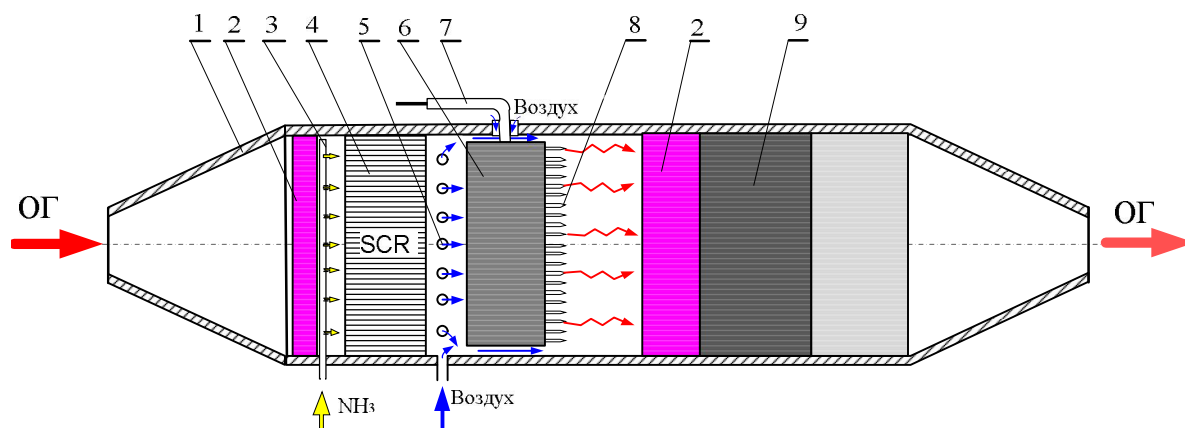


Рис. 5. Схема совместного использования SCR с электрокаталитическим фильтром:

1 – корпус; 2 – нагреватель ОГ; 3 – распределитель  $\text{NH}_3$ ; 4 – каталитический реактор SCR; 5 – распределитель воздуха; 6 – коронирующий электрод; 7 – подвод напряжения; 8 – иголки; 9 – осадительный электрод

#### Список литературы:

1. Оценка и контроль выбросов дисперсных частиц с отработавшими газами дизелей / В.А. Звонов, Г.С. Корнилов, А.В. Козлов, Е.А. Симонова. – М.: Прима-Пресс-М, 2005. – 312 с. 2. Maus, W. Elektrostatischer Partikelfilter zur Reduktion der Nanopartikel / W. Maus, R. Brück,

Jan. Hodgson, Ch. Vorsmann // *Motortechnische Zeitschrift*. – 2011 (72). – Nr. 02. – S. 117 – 121. 3. Krahl J. Fuel economy and environmental characteristics of biodiesel and low sulfur fuels in diesel engines / J. Krahl, A. Munack, O. Schröder, H. Stein, A. Hassaneen // *Landbauforschung Völknerode*. – 2005. – 2 (55). – S. 99 – 106. 4. Звонов, В.А.

Результаты исследований электромеханического фильтра для улавливания твердых частиц из отработавших газов дизеля / В.А. Звонов, Л.С. Заиграев, И.П. Васильев, Ю.К. Бодров // Экотехнологии и ресурсосбережение. – К., 1996. – № 4. – С. 59–64. 5. Заиграев, Л.С. Исследование эффективности сажевого электромеханического фильтра при повышенных температурах / Л.С. Заиграев, А.С. Попов, И.П. Васильев, А.М. Красносельский // Экология двигателя и автомобиля: Сб. науч. тр. НАМИ. – М., 1998. – С. 91–95. 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. – Харьков, 1978. – № 28. – С. 121–127. 7. Maus, W. Die Zukunft der Katalysatortechnik für Elektrifizierte Antriebsstränge / W. Maus, R. Brück, R. Konieczny, Peter Hirth // Motortechnische Zeitschrift. – 2012 (73). – Nr. 12. – S. 33-38.

gazami dizelej / V.A. Zvonov, G.S. Kornilov, A.V. Kozlov, E.A. Simonova. – М.: Prima-Press-M, 2005. – 312 с. 2. Maus, W. Elektrostatischer Partikelfilter zur Reduktion der Nanopartikel / W. Maus, R. Brück, Jan. Hodgson, Ch. Vorsmann // Motortechnische Zeitschrift. – 2011 (72). – Nr. 02. – S. 117–121. 3. Krahl J. Fuel economy and environmental characteristics of biodiesel and low sulfur fuels in diesel engines / J. Krahl, A. Munack, O. Schröder, H. Stein, A. Hasaneen // Landbauforschung Völkenrode. – 2005. – 2 (55). – S. 99–106. 4. Zvonov, V.A. Rezul'taty issledovanij jelectromehaničeskogo fil'tra dlja ulavlivanija tverdyh chastic iz otrabotavshih gazov dizelja / V.A. Zvonov, L.S. Zaigraev, I.P. Vasil'ev, Ju.K. Bodrov // Jekotehnologii i resursosberezhenie. – К., 1996. – № 4. – С. 59–64. 5. Zaigraev, L.S. Issledovanie jeffektivnosti saževogo jelectromehaničeskogo fil'tra pri povыshennyh temperaturah / L.S. Zaigraev, A.S. Popov, I.P. Vasil'ev, A.M. Krasnosel'skij // Jekologija dvigatelja i avtomobilja: Sb. nauch. tr. NAMI. – М., 1998. – С. 91–95. 6. Zvonov V.A. Issledovanie kataliticheskoj nejtralizacii otrabotavshih gazov dizelja / V.A. Zvonov, Z.T. Zvonova, P.P. Fesenko, I.P. Vasil'ev // Dvigateli vnutrennego sgoranija. – Har'kov, 1978. – № 28. – С. 121–127. 7. Maus, W. Die Zukunft der Katalysatortechnik für Elektrifizierte Antriebsstränge / W. Maus, R. Brück, R. Konieczny, Peter Hirth // Mo-tortechnische Zeitschrift. – 2012 (73). – Nr. 12. – S. 33-38.

**Bibliography (transliterated):**

1. Ocenka i kontrol' vybrosov dispersnyh chastic s otra-botavshimi

Поступила в редакцию 11.06.2014

**Васильев Игорь Павлович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры двигателя внутреннего сгорания Восточноукраинского национального университета им. В. Даля, Луганск, Украина, e-mail: vasilevkr@gmail.com.

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИЩЕННЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ДИЗЕЛІВ**

**І. П. Васильєв**

Наведені результати досліджень ефективності очищення відпрацьованих газів від дисперсних частинок в електрокаталітичному фільтрі залежно від температури, напруги між електродами, геометричних параметрів коронуруючого та осаджувального електродів. Експериментально виявлено, що з підвищенням температури ефективність очищення знизжується. Пропонується одночасно знизити викиди NO<sub>x</sub> шляхом застосування селективної системи нейтралізації (SCR). Для цього необхідно використовувати на вході в реактор SCR нагрівач відпрацьованих газів для підтримки оптимальної температури реакції відновлення NO<sub>x</sub>, а потім розташувати електрофільтр. Повітря, що подається в електрофільтр забезпечить електричну ізоляцію коронуруючого електрода і знизить температуру відпрацьованих газів, що забезпечить підвищення ефективності вловлення частинок. Уловлену сажу пропонується регенерувати шляхом включення другого нагрівача відпрацьованих газів за сигналом від датчика протитиску фільтруючого шару.

**INCREASE OF EFFICIENCY OF PURIFICATION OF THE EXHAUST GASES IN DIESEL ENGINE**

**I. P. Vasyliiev**

Results of researches on investigation of exhausted gases cleaning of the dispersed particles in electric catalytic filter effectiveness have been presented. The aim of the investigation was identification of filter parameters impact on exhaust gases cleaning with the further use of cleaned of gases in modern neutralization systems. Practical peculiarity of filter work has been revealed. Effectiveness of cleaning is reducing with the temperature increase. It is offered to reduce NO<sub>x</sub> emissions by means of selective neutralization system (SCR) simultaneously. The developed system of NO<sub>x</sub> and dispersed particles neutralization has become the result of the given work. It is necessary to use the heater of exhaust gases at the entrance to the reactor SCR to maintain optimal temperature of restoration reaction and to place an electric filter after it. Air supplied to the electric filter will provide corone-forming electrode electric isolation and reduce exhaust gases temperature. It will provide an increase of particles trapping effectiveness. The caught soot may be regenerated by switching on the second heater of exhaust gases on a signal from the sensor of a filter-bed counter pressure.