

А.Н. Кондратенко, А.П. Строков, С.П. Хожайнов

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВУЮЩЕГО МАКЕТА ФИЛЬТРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА ФИЛЬТРА ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ДИЗЕЛЯ С НАСЫПКОЙ ИЗ ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА. ЧАСТЬ 2

*В данной работе проведены экспериментальные исследования макетного действующего образца фильтрующего элемента фильтра твердых частиц дизеля на моторном испытательном стенде. В результате испытаний объекта исследования, который содержит в своей конструкции насыпку из природного цеолита, получена его расходная характеристика. Также получены зависимости степени очистки им отработавших газов дизеля от твердых частиц от нагрузочных и скоростных режимов работы дизеля 2Ч10,5/12, времени работы дизеля на режиме максимального крутящего момента и места его установки по длине выпускного тракта дизеля. Полученные данные хорошо согласуются с результатами исследований на безмоторной исследовательской установке. Разработанный фильтрующий элемент обладает приемлемым значением степени очистки отработавших газов дизеля от твердых частиц.*

### Анализ литературных источников

В первой части статьи [1] приведены постановка проблемы, анализ литературных источников, цель и постановка задачи исследований, результаты экспериментального исследования действующего макетного образца фильтрующего элемента (ФЭ) ФТЧ дизеля с сетчатыми кассетами и насыпкой из природного цеолита (ПЦ) в них – ДМЦ ФЭ. Анализ результатов исследования позволил выявить факторы, влияющие на эффективность очистки объектом исследования ОГ дизеля от ТЧ.

### Экспериментальное исследование ДМЦ ФЭ, перенесенного по длине выпускного тракта МИС

Для выявления степени влияния указанных факторов необходима повторная модернизация МИС с дизелем 2Ч10,5/12 (Д21А1), заключающаяся в переносе места установки макетоудерживающей вставки вдоль выпускного тракта МИС (для снижения температуры ОГ, более полного прохождения процессов конденсации продуктов неполного сгорания дизельного топлива на ТЧ и коагуляции самих ТЧ), а также размещение макетоудерживающей вставки в строго вертикальном положении (для достижения брикетирования гранул ПЦ в сетчатых кассетах под собственным весом).

Место установки объекта исследования перенесено по длине выпускного тракта МИС на 5 м от выпускного коллектора дизеля 2Ч10,5/12 с помощью использования гибких армированных жаропрочных газопроводов. Схема системы отбора проб ОГ на токсичность после ее модернизации приняла вид, представленный на рис. 1. а ее внешний вид представлен на рис. 2.

Программа и методика экспериментального исследования параметров ДМЦ ФЭ аналогичны таковым для ДМ ФЭ и представлены в предыдущей части исследования. В ходе испытаний были получены расходная характеристика ДМЦ ФЭ (зависи-

мость гидравлического сопротивления объекта исследования от удельного массового расхода ОГ через модуль макета, при работе дизеля 2Ч10,5/12 на режимах внешней скоростной характеристики, нагрузочных характеристик с частотой вращения коленчатого вала дизеля при максимальном крутящем моменте и номинальной частотой вращения, характеристики холостого хода), а также зависимость перепада температур ОГ на объекте исследования для тех же режимов работы дизеля. Кроме этого получены графики зависимости коэффициента ослабления светового потока ОГ, измеренного дымомером ИНФРАКАР-Д, от нагрузочных и скоростных режимов работы дизеля, а также от времени работы дизеля на стационарном режиме.

### Результаты исследования

Для ДМЦ ФЭ, перенесенного по длине выпускного тракта МИС на 5 м от выпускного коллектора дизеля, результаты исследования представлены на рис. 3 и 4. На них также представлены результаты определения гидравлических характеристик прозрачного макета модуля (ПММ) ФЭ, полученные на безмоторной исследовательской установке (БИУ), описанной в [2]. Состояние поверхностей ДМЦ ФЭ, сетчатых кассет и гранул ПЦ проиллюстрировано на рис. 5.

### Обсуждение результатов исследования

На рисунке 3а вертикальными прямыми обозначены предельные уровни удельного массового расхода ОГ, характерные для выпускной системы МИС – 9,66 и 22,5 кг/(с·м<sup>2</sup>), соответственно. ДМЦ ФЭ, содержащий 20 модулей, имеет суммарное проходное сечение, составляющее 75 % от проходного сечения выпускного коллектора дизеля 2Ч10,5/12. Исследование показало, что на концентрацию несгоревших углеводородов  $C_{CH}$  в ОГ данный ФЭ не оказывает практически никакого влияния. То же верно и для концентраций CO и NOx.

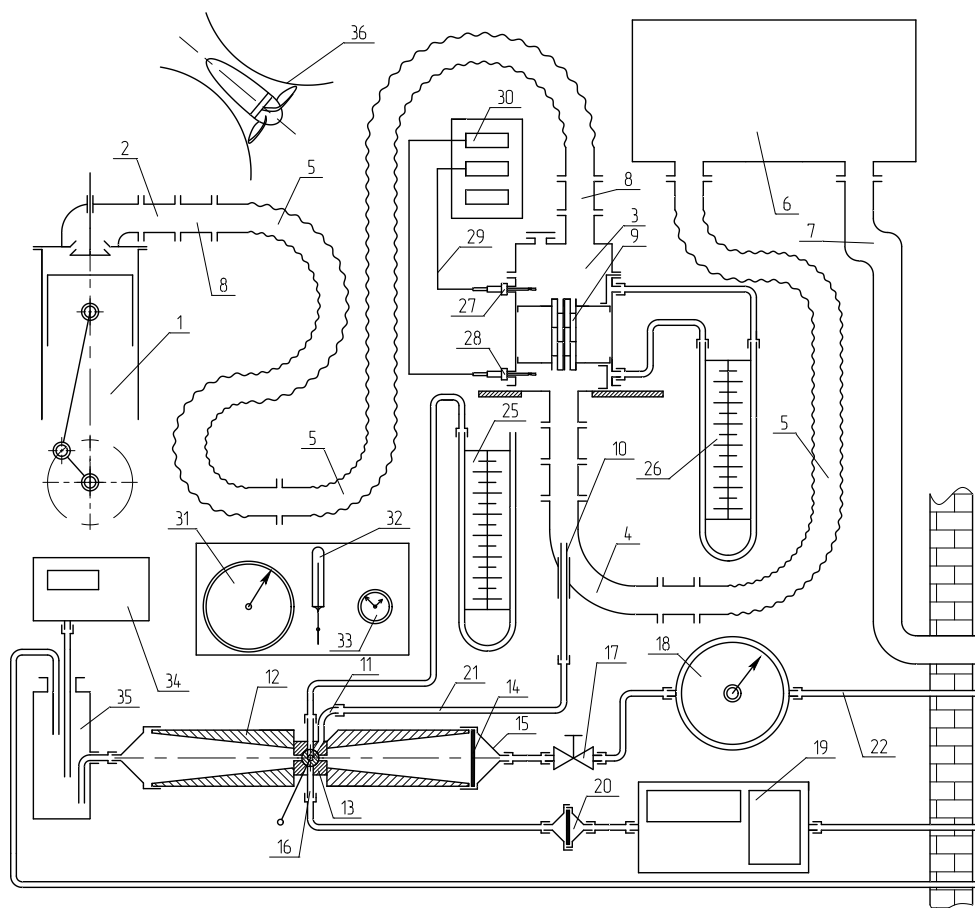


Рис. 1. Схема системы отбора проб ОГ на токсичность МИС:

1 – дизель 2Ч10,5/12; 2 – выпускной коллектор дизеля; 3 – макетодерживающая вставка; 4 – угловой газопровод; 5 – гибкие газопроводы; 6 – глушитель шума выпуска ОГ; 7 – газывыводящая труба; 8 – переходники; 9 – макет ФТЧ; 10 – пробоотборный зонд; 11, 12, 13, 15, 16 – соответственно входной штуцер, конус, четырехходовой кран, колпак и выходной штуцер аллонжа; 14 – сменный фильтр; 17 – регулировочный кран; 18 – расходомер газа ГСБ-400; 19 – пятикомпонентный газоанализатор с печатающим устройством Автотест-02.03П; 20 – защитный фильтр с держателем; 21 – соединительный трубопровод; 22, 23, 24 – выводные трубопроводы; 25, 26 – дифманометры ДМ; 27, 28 – датчики термометрические ТХА; 29 – электропровод; 30 – прибор ОВЕН ТРМ 200; 31 – барометр-анероид БАММ-1М; 32 – термометр ртутный ТЛ-4; 33 – секундомер СОСпр-2б-2; 34 – дымомер ИНФРАКАР-Д, 35 – измерительный ресивер (6,36 л); 36 – воздуходувка

Степень очистки ОГ дизеля от ТЧ фильтром (коэффициент эффективности очистки) определяется формулой (1)

$$K_{ЭО} = \frac{D_{ДВС} - D_{ФТЧ}}{D_{ДВС}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $D_{ДВС}$  – показатель, характеризующий дымность ОГ дизеля на каком-либо режиме работы (в данном случае – коэффициент ослабления светового потока  $N$ , %);

$D_{ФТЧ}$  – показатель, характеризующий дымность ОГ дизеля на том же режиме работы с установленным в его выпускной системе ФТЧ.

Представленные на рис. 3 и 4 графики показывают, что разработанный ФЭ снижает содержание ТЧ в ОГ дизеля 2Ч10,5/12 с эффективностью, кото-

рая зависит от нагрузочного и скоростного режимов работы дизеля, а также от времени наработки дизеля на конкретном стационарном режиме работы. Они описаны с помощью метода линейной регрессии [3] и имеют вид полиномов 1 – 3 степени. Для гидравлического сопротивления и степени очистки ОГ от ТЧ фильтром, определенной по формуле 1, они имеют следующий вид:

$$\Delta P(g_{m\_OG}) = 0,108 \cdot g_{m\_OG}^3 + 1,48 \cdot g_{m\_OG}^2 + 30,9 \cdot g_{m\_OG}, \text{ Па};$$

$$\Delta P(\tau)_{M_{кр\max}} = 29,7 \cdot \tau + 1361, \text{ Па};$$

$$K_{ЭО}(M_{кр})_{\max} = 0,328 \cdot M_{кр} + 19,5, \text{ \%};$$

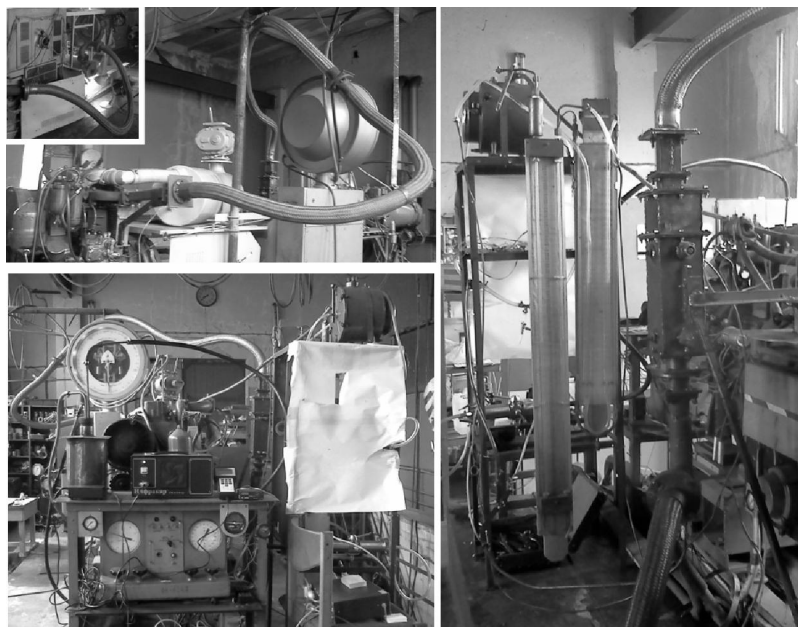


Рис. 2. Внешний вид МИС после модернизации его системы отбора проб ОГ на токсичность

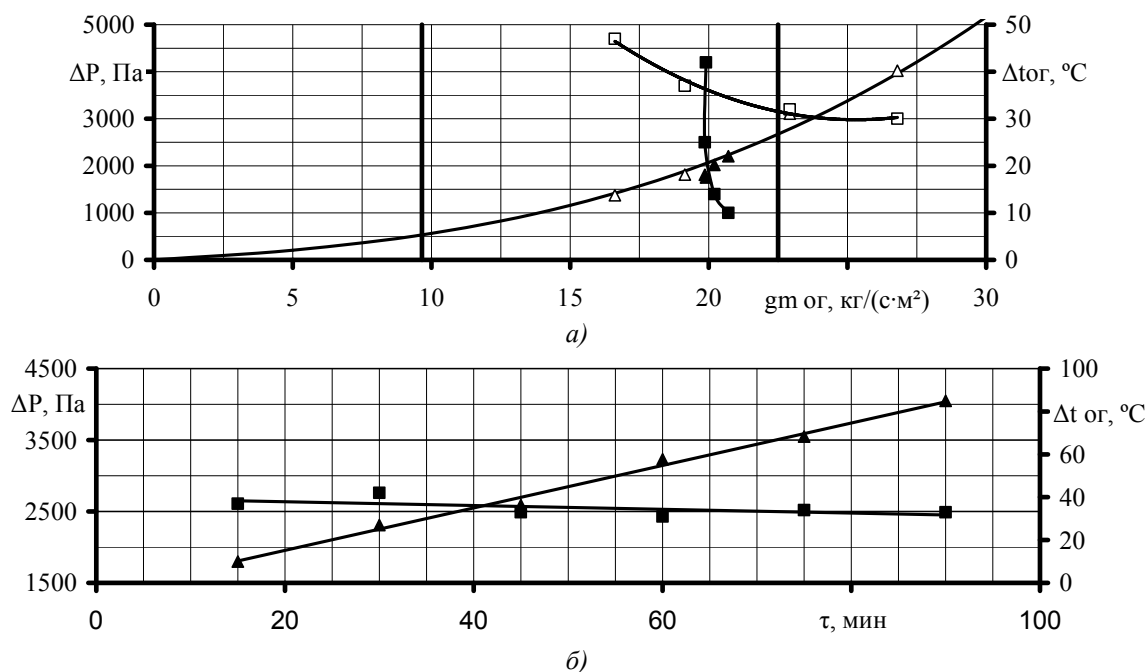


Рис. 3. Графики зависимости гидравлического сопротивления ДМЦ ФЭ и перепада температур ОГ на нем от удельного массового расхода ОГ через него (а), и от времени работы дизеля 2Ч10,5/12 на режиме максимального крутящего момента (б):

внешняя скоростная характеристика:  $\Delta$  –  $\Delta P$ ;  $\square$  –  $\Delta t$ .  
 нагрузочная характеристика при  $n_{кв} = 1200 \text{ мин}^{-1}$ :  $\blacktriangle$  –  $\Delta P$ ;  $\blacksquare$  –  $\Delta t$

$$K_{ЭО}(M_{кр})_{ном} = 0,248 \cdot M_{кр} + 11,5, \%$$

$$K_{ЭО}(\tau) = -3,25 \cdot 10^{-3} \cdot \tau^2 + 0,544 \cdot \tau + 41,5, \%$$

$$K_{ЭО}(n_{кв})_{вн.ск} = 5,4 \cdot 10^{-8} \cdot n_{кв}^3 - 2,92 \cdot 10^{-4} \cdot n_{кв}^2 + 0,46 \cdot n_{кв} - 170,3, \%$$

$$K_{ЭО}(n_{кв})_{х.х} = 1,2 \cdot 10^{-8} \cdot n_{кв}^3 - 7,73 \cdot 10^{-5} \cdot n_{кв}^2 + 0,136 \cdot n_{кв} - 73,8, \%$$

На рис. 5 видно, что ТЧ откладываются на всех поверхностях модулей ДМЦ ФЭ – как на поверхностях стенок, образованных стальными листами, так и на поверхностях кассет из стальной тканой сетки. При этом в тех местах, где кассеты из стальной тканой сетки проницаемы для потока ОГ,

осаждение ТЧ происходило более интенсивно со стороны входа потока. Адсорбция ТЧ на поверхностях гранул ПЦ, как видно на рис. 5, происходит с интенсивностью, которая отрицательно коррелирует с длиной пути потока ОГ в насыпке. Также ТЧ в насыпке более интенсивно адсорбируются на гранулах ПЦ, находящихся в непосредственной близости от поверхности сетчатой кассеты. Максимальная интенсивность адсорбции ТЧ на гранулах происходит в зоне насыпки, где поток ОГ преодолевает кассету самым коротким путем, то есть в середине кассеты. Причем в этой зоне насыпки содержится также большое количество конгломератов ТЧ, адсорбированных уже не на гранулах ПЦ, а на

самых ТЧ, в том числе и коагулированные между собой. Размеры конгломератов в этом случае соразмерны промежуткам между гранулами ПЦ насыпки с учетом слоя адсорбированных на их поверхностях ТЧ. Таким образом, насыпка из ПЦ также реализует такой способ очистки ОГ от ТЧ (помимо адсорбции), как фильтрация. На рис. 5 также видно, что часть насыпки (порядка 40 %), находящаяся в конце траектории движения потока ОГ в ней, за 90 минут работы ДМЦ ФЭ на МИС слое адсорбированных ТЧ покрыться не успела, однако отфильтрованные насыпкой конгломераты ТЧ содержит.

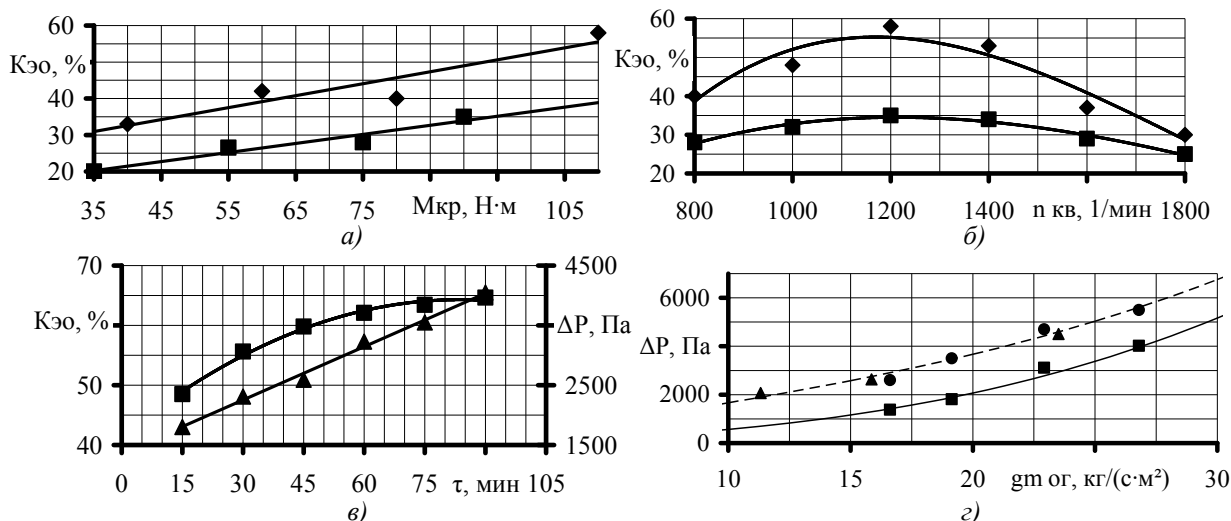


Рис. 4. Графики зависимости  $K_{ЭО}$  ДМЦ ФЭ ОГ дизеля 2Ч10,5/12 от ТЧ от нагрузочных (а) и скоростных (б) режимов его работы, а также времени работы на режиме максимального крутящего момента (в) и графики зависимости гидравлического сопротивления ДМЦ ФЭ от удельного массового расхода ОГ через него для разных мест установки его на МИС (г) и времени работы на режиме максимального крутящего момента (в): "а":  $\blacklozenge$  – нагрузочная характеристика при  $n_{кв} = 1200 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\blacksquare$  – нагрузочная характеристика при  $n_{кв} = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ; "б":  $\blacklozenge$  – внешняя скоростная характеристика;  $\blacksquare$  – характеристика холостого хода; "в":  $\blacksquare$  –  $K_{ЭО}$ ;  $\blacktriangle$  –  $\Delta P$ ; "г":  $\blacksquare$  – дынные, полученные на МИС для ДМЦ ФЭ, перенесенного по длине выпускного тракта МИС на 5 м;  $\blacktriangle$  – данные, полученные на БИУ для ПММ ФЭ;  $\bullet$  – данные, полученные для ДМЦ ФЭ, установленного непосредственно за выпускным коллектором дизеля 2Ч10,5/12



Рис. 5. ДМЦ ФЭ, сетчатая кассета и насыпной цеолит после моторных испытаний

Таким образом, картины распределения ТЧ в ДМЦ ФЭ, представленные в виде фотографий на рис. 6, наглядно демонстрируют использование разработанных ФЭ одновременно таких способов очистки ОГ дизеля от ТЧ, как: фильтрация ТЧ стальной тканой сеткой и насыпкой из ПЦ при прохождении потока ОГ через них; осаждение ТЧ на поверхностях стальных листов с большой шероховатостью и стальной тканой сетки при омывании этих поверхностей потоком ОГ; адсорбция ТЧ на поверхностях насыпки из ПЦ при прохождении сквозь нее потока ОГ.

Максимальное значение степени очистки ОГ дизеля от ТЧ ДМЦ ФЭ (58 %), полученное на режиме максимального крутящего момента дизеля 2Ч10,5/12, существенно отличается от значения, полученного экспериментально для ДМ ФЭ с пустыми сетчатыми кассетами (20 %) на том же режиме работы дизеля, что свидетельствует об эффективности применения насыпок из ПЦ в конструкции ФТЧ. Место установки ДМЦ ФЭ по длине выпускного тракта МИС, как видно на рис. 5, оказывает существенное влияние на гидравлическое сопротивление объекта исследования, однако при этом также существенно повышая степень очистки ОГ дизеля от ТЧ – от 30 % до 58 % на режиме максимального крутящего момента дизеля 2Ч10,5/12, что свидетельствует о том, что выдвинутые в первой части исследования гипотезы подтвердились.

Перспективы дальнейших исследований состоят в поиске способов брикетирования сыпучих термостойких сорбентов, а также в поиске и исследовании сыпучих сорбентов, альтернативных природному цеолиту (например, терморасширенного графита [5]).

#### Выводы

В данной части исследования было выполнено экспериментальное исследование рабочих характеристик макетного действующего образца ФЭ разработанного ФТЧ, содержащего в своей конструкции насыпку сетчатых кассет ПЦ.

В результате исследования получены расходная характеристика макетного действующего образца ФЭ и зависимость перепада температур ОГ на образце от удельного массового расхода ОГ через объект исследования для режимов работы дизеля 2Ч10,5/12 внешней скоростной характеристики, на-

грузочных характеристик с частотой вращения коленчатого вала дизеля 2Ч10,5/12 при максимальном крутящем моменте и номинальной частотой вращения, характеристики холостого хода, а также от времени работы дизеля на стационарном режиме.

Также в результате исследования получены зависимости степени очистки ОГ дизеля от ТЧ образцом от нагрузочного и скоростного режимов работы дизеля 2Ч10,5/12, времени его работы на стационарном режиме максимального крутящего момента.

Степень очистки ОГ дизеля от ТЧ макетным образцом достигает максимального значения на режиме максимального крутящего момента дизеля 2Ч10,5/12, равного 58 %, что на 38 % больше, чем для макетного действующего образца без насыпки из ПЦ в сетчатых кассетах. Такой уровень степени очистки фильтра является приемлемым.

#### Список литературы:

1. Кондратенко А.Н. Экспериментальное исследование действующего макета фильтрующего элемента фильтра твердых частиц дизеля с насыпкой из природного цеолита. Часть 1 / А.Н. Кондратенко, А.П. Строчков, Н.М. Карасиченко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2013. – №1. – С. 88-92. 2. Кондратенко О.М. Моделирование тепло- та масообмінних процесів у фільтрі твердих частинок дизеля. Частина 4: розрахункове дослідження робочих характеристик фільтра / О.М. Кондратенко, О.П. Строчков // Вісник Національного технічного університету "ХПИ". – 2013. – № 5 (979). – С. 100–109. 3. Эберт К. Компьютеры. Применение в химии: Пер. с нем. / К. Эберт, Х. Эдерер – М.: Мир. – 1988. – 416 с. 4. Кожан А.П. Нефтепоглощающий сорбент на основе терморасширенного графита. Исследование термохимической регенерации / А.П. Кожан, В.М. Дмитриев, О.Б. Бондаренко, О.А. Сергиенко, В.С. Рябчук, // Хімічна промисловість України. – 2007. – № 6. – С. 23–28.

#### Bibliography (transliterated):

1. Kondratenko A.N. Jeksperimental'noe issledovanie dejstvujushhego maketa fil'trujushhego jelementa fil'tra tverdyh chastic dizelja s nasypkoj iz prirodnoho ceolita. Chast' 1 / A.N. Kondratenko, A.P. Strokov, N.M. Karasichenko // Dvigateli vnutrennego sgoranija. – 2013. – №1. – S. 88-92. 2. Kondratenko O.M. Modelirovanija teplo- ta masoobminnih procesiv u fil'tri tverdih chastinok dizelja. Chastina 4: rozrahunkove doslidzhennja robochih harakteristik fil'tra / O.M. Kondratenko, O.P. Strokov // Visnik Nacional'nogo tehniogo universitetu "HPI". – 2013. – № 5 (979). – S. 100–109. 3. Jebert K. Komp'jutery. Primenenie v himii: Per. s nem. / K. Jebert, H. Jederer – M.: Mir. – 1988. – 416 s. 4. Kozhan A.P. Neftepogloshhajushhij sorbent na osnove termorasshirennogo grafita. Issledovanie termohimicheskoj regeneracii / A.P. Kozhan, V.M. Dmitriev, O.B. Bondarenko, O.A. Sergienko, V.S. Rjabchuk, // Himichna promislovist' Ukraini. – 2007. – № 6. – S. 23–28.

Поступила в редакцию 15.05.2013

**Кондратенко Александр Николаевич** – ведущий инж. отдела поршневых энергоустановок Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: dppp@ipmach.kharkov.ua.

**Строков Александр Петрович** – доктор техн. наук, проф., зав. отделом поршневых энергоустановок Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: dppp@ipmach.kharkov.ua.

**Хожайнов Сергей Петрович** – ведущий инж. отдела поршневых энергоустановок Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: dppp@ipmach.kharkov.ua.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЮЧОГО МАКЕТУ ФІЛЬТРУЮЧОГО ЕЛЕМЕНТУ ФІЛЬТРУ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК ДИЗЕЛЯ ІЗ НАСИПКОЮ З ПРИРОДНОГО ЦЕОЛІТУ. ЧАСТИНА 2

*О. М. Кондратенко, О. П. Строков, С. П. Хожайнов*

У даній роботі проведені експериментальні дослідження макетного діючого зразка фільтруючого елемента фільтра твердих часток дизеля на моторному випробувальному стенді. У результаті випробувань об'єкта дослідження, який містить у своїй конструкції насипку з природного цеоліту, отримана його витратна характеристика. Також отримано залежності ступеня очищення їм відпрацьованих газів дизеля від твердих частинок від навантажувальних і швидкісних режимів роботи дизеля 2Ч10,5/12, часу роботи дизеля на режимі максимального крутного моменту і місця його установки вздовж випускного тракту дизеля. Отримані дані добре узгоджуються з результатами досліджень на безмоторній дослідницькій установці. Розроблений фільтруючий елемент характеризується прийнятним значенням ступеня очищення відпрацьованих газів дизеля від твердих частинок.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE WORKING LAYOUT OF FILTER ELEMENT OF DIESEL PARTICULATE FILTER WITH BULK NATURAL ZEOLITE. PART 2

*A. N. Kondratenko, A. P. Stokov, S. P. Khozhainov*

Present paper describes the experimental studies of the breadboard operating sample of the filter element of diesel particulate filter on the engine test bench. As a result of testing the research object, which contains in its structure bulk natural zeolite, its flow characteristic were obtained. Also, the dependence on the degree of exhaust gases purification from diesel's particulate matter from the load and speed modes of the diesel 2CH10,5/12 was obtained, and also the time of the diesel engine running at peak torque load and the temperature of its exhaust gases. The data obtained are in good agreement with the results of studies on engineless research facility. Designed filter element has an acceptable value of the degree of purification of exhaust gases from diesel particulates.

УДК 621.43.068.4:665.777.2

*И.В. Парсаданов, И.П. Васильев*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЕЙ

*Рассмотрены особенности определения состава и свойств твердых частиц отработавших газов дизелей. Приведены результаты определения твердых частиц на содержание тяжелых металлов и углеродной фракции. Углеродная фракция определялась фотометрическим методом с использованием специальных фильтров, предварительно растворенных в дихлорэтане. Содержание металлов определялось ртутной полярографией. Выявлено, что с увеличением нагрузки концентрации металлов в твердых частицах отработавших газов дизелей повышаются.*

### Введение

Совершенствование рабочих процессов дизелей и систем нейтрализации отработавших газов (ОГ) приводит с одной стороны к уменьшению выбросов вредных веществ (ВВ), а с другой стороны – к изменению состава ВВ, в частности, твердых частиц (ТЧ), которые представляют собой комплекс веществ органической и неорганической природы [1].

В ОГ современных дизелей наблюдается относительный рост в ТЧ золы (минеральной фракции), включающей в себя продукты износа двигателя и систем нейтрализации, ингредиенты приса-

док к топливу и к моторному маслу, а также частицы пыли, поступающие в цилиндр с воздухом.

Исследования ТЧ с использованием нейтронной томографии выявили, что в составе минеральной фракции содержится около 37% Ca, 19% Zn, 15% S, 8% P и 2% Cu [2].

Некоторые ингредиенты относятся к тяжелым металлам, которые имеют плотность выше, чем Fe и включают Cu, Ni, Co, Pb, Sn, Zn, Cd, Bi, Sb, Hg и их содержание в воздухе рабочей зоны нормируется [3, 4].

Использование альтернативных топлив, в частности, биодизельного топлива, снижая дымность ОГ, приводит к уменьшению дисперсности угле-