

А.Н. КОНДРАТЕНКО, вед. инж. отд., ИПМаш НАН Украины, Харьков;
А.П. СТРОКОВ, д-р. техн. наук, проф., ИПМаш НАН Украины,
Харьков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ФИЛЬТРЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ДИЗЕЛЯ. ЧАСТЬ 5: РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ФИЛЬТРА С ЦЕОЛИТОВОЙ НАСЫПКОЙ

Описаны результаты расчетного исследования гидравлического сопротивления модуля фильтрующего элемента фильтра твердых частиц дизеля с цеолитовой насыпкой сетчатых кассет. Также приводятся данные по идентификации параметров математической модели процесса движения отработавших газов дизеля в модуле фильтрующего элемента.

Ключевые слова: дизель, отработавшие газы, твердые частицы, сажа, фильтр твердых частиц, гидравлическое сопротивление.

Введение. Создание эффективного, технологичного и надежного фильтра твердых частиц (ФТЧ) отработавших газов (ОГ) дизельных двигателей является актуальной задачей, стоящей перед специалистами в области двигателей внутреннего сгорания. Повышение точности математического моделирования тепло- и массообменных процессов в фильтрах твердых частиц (ФТЧ) дизеля позволяет более эффективно осуществлять оптимизацию их конструкции.

Анализ литературных источников. В предыдущих частях исследования были описаны действующие макетированные образцы фильтрующего элемента (ФЭ) ФТЧ – с пустыми сетчатыми кассетами (ДМ ФЭ) и с сетчатыми кассетами, заполненными насыпкой из *среднедисперсного природного цеолита* (ДМЦ ФЭ) [1 – 4]. Экспериментальные исследования их рабочих характеристик на моторном испытательном стенде (МИС) показали, что при определенных условиях ДМЦ ФЭ обладает существенно большей эффективностью очистки ОГ дизеля от ТЧ, чем ДМ ФЭ. Проведено расчетное исследование рабочих характеристик ДМ ФЭ в программной среде COSMOSFlo Works [4]. В данной части исследования будет проведено расчетное исследование рабочих характеристик ДМЦ ФЭ.

Цель и постановка задачи исследования. Целью данного исследования является математическое моделирование тепло- и массообменных процессов в полостях ФЭ фильтра твердых частиц дизеля. Задачи данного исследования аналогичны задачам расчетного исследования ДМ ФЭ, представленного в предыдущей части исследования [4].

Математическая модель процесса движения потока ОГ в модуле ФЭ. Она имеет вид уравнений Навье – Стокса в нестационарной постановке с учетом наличия в конструкции объекта исследования пористых тел (ПТ), аналогична модели движения потока ОГ в модуле ДМ ФЭ и описана в [4, 5].

Дополнение математической модели необходимыми данными осуществлено в предыдущих частях исследования [1 – 4]. Помимо этих данных, Инженерная база данных (НБД) программного комплекса COSMOSFlo Works дополнена свойствами природного цеолита, полученными из литературных источников, а также экспериментально [3]. Они представлены на рис. 1.

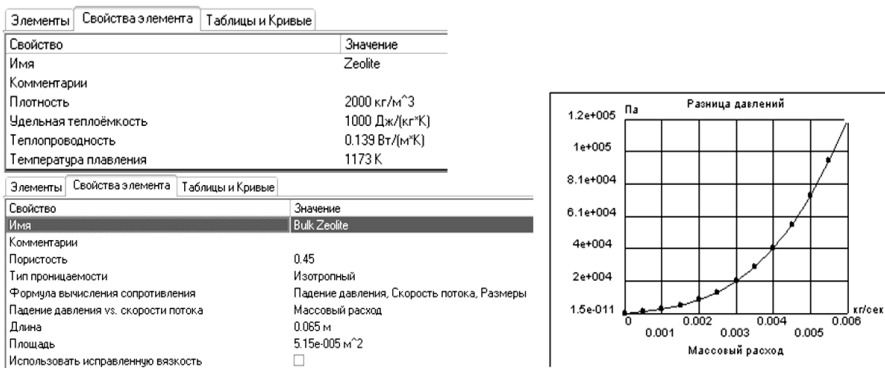


Рис. 1 – Свойства насыпного среднедисперсного природного цеолита.

Объект исследования. В конфигурацию 3D модели геометрии ДМ ФЭ, описанной в [4], введены элементы, представляющие собой пористые тела со свойствами природного насыпного цеолита. Таким образом, расчетная схема ДМЦ ФЭ приняла вид, представленный на рис. 2.

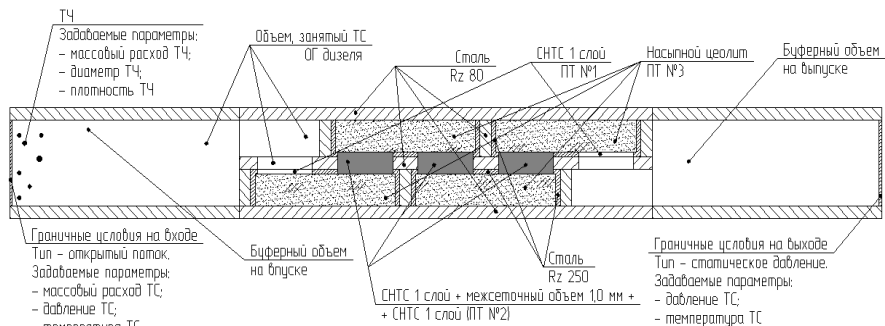


Рис. 2 – Расчетная схема ДМЦ ФЭ.

Сам ДМЦ ФЭ, изготовленный и исследованный на МИС, содержал 20 модулей и две уплотняющие шторки. Он описан в [3]. Место установки ДМЦ ФЭ то же, что и для ДМ ФЭ, его гидравлическое сопротивление оценивалось расчетным путем аналогично местам установки ДМ ФЭ и ПММ ФЭ (см. предыдущую часть данного исследования). Как и в случае ДМ ФЭ, расчеты велись для одного модуля ДМЦ ФЭ, в котором также использовано свойство симметрии потока относительно плоскости симметрии конфигурации, что существенно уменьшило процессорное время расчета.

В качестве текучей жидкости приняты ОГ, зависимость их плотности, удельной теплоемкости и вязкости от температуры занесены в ИБД. Перечень и значения граничных условий для расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Граничные условия

| Режим | | | Параметры ОС | | Параметры ОГ | | | | | Параметры ТЧ | |
|-----------------------------------|-------------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|----------------------|
| № | n | M _{кр} | B ₀ | T ₀ | G _{ог} | P _{ог_вх} | P _{ог_вых} | T _{ог_вх} | T _{ог_вых} | G _{тч} | d _{тч} |
| Ед. изм. | мин ⁻¹ | Н·м | кПа | К | х 10 ⁻² кг/с | кПа | кПа | К | К | х 10 ⁻² кг/с | х 10 ⁻⁶ м |
| Внешняя скоростная характеристика | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1000 | 108 | 100,5 | 293 | 1,780 | 103,253 | 101,875 | 257 | 210 | 1,894 | 1,5 |
| 2 | 1200 | 110 | 100,5 | 293 | 2,113 | 103,934 | 102,313 | 315 | 278 | 2,316 | 1,5 |
| 3 | 1400 | 109 | 100,5 | 293 | 2,443 | 105,838 | 103,609 | 350 | 318 | 2,640 | 1,5 |
| 4 | 1600 | 102 | 100,5 | 293 | 2,779 | 107,275 | 104,520 | 365 | 335 | 2,056 | 1,5 |

Для уменьшения трудоёмкости моделирования расчет гидравлического сопротивления ДМ ФЭ выполнялся в пять этапов: 1) расчет со всеми «погашенными» (исключенными из расчета) ПТ, $\Delta P_{\text{ДМЦФЭБПТ}}$; 2) расчет со всеми «погашенными» ПТ, кроме ПТ типа 1 в количестве 1 шт., $\Delta P_{\text{ДМЦФЭ+ПТ1}}$; 3) расчет со всеми «погашенными» ПТ, кроме ПТ типа 2 в количестве 1 шт., $\Delta P_{\text{ДМЦФЭ+ПТ2}}$; 4) расчет со всеми «погашенными» ПТ, кроме ПТ типа 3 в количестве 1 шт., $\Delta P_{\text{ДМЦФЭ+ПТ3}}$; 5) расчет со всеми «не погашенными» ПТ (для одного из режимов работы дизеля).

Таким образом, значение гидравлического сопротивления ДМ ФЭ с «непогашенными» ПТ носит аддитивный характер и рассчитывается по формуле:

$$\Delta P_{\text{ДМЦФЭ}} = \Delta P_{\text{ДМЦФЭБПТ}} + 2 \cdot (\Delta P_{\text{ДМЦФЭ+ПТ1}} - \Delta P_{\text{ДМЦФЭБПТ}}) +$$

$$+3 \cdot (\Delta P_{\text{ДМЦФЭ+ПТ2}} - \Delta P_{\text{ДМЦФЭ6ПТ}}) + 4 \cdot (\Delta P_{\text{ДМЦФЭ+ПТ3}} - \Delta P_{\text{ДМЦФЭ6ПТ}}). \text{ Па} \quad (1)$$

Расчетная сетка представлена на рис. 3. Параметры, характеризующие расчет приведены в табл. 2. В качестве условия завершения расчета использовался критерий сходимости цели (в качестве которой выступал массовый расход текучей среды через ДМЦ ФЭ), равный точности косвенного измерения этого параметра на МИС. Расчеты велись на максимально мелкой базовой расчетной сетке, параметры которой задавались автоматически. Теплообмен в неподвижном теле, а также радиационный теплообмен, не учитывались. Траектории потока ОГ в варианте со всеми «непогашенными» ПТ для режима номинальной мощности дизеля 2Ч10,5/12 представлен на рис. 4.

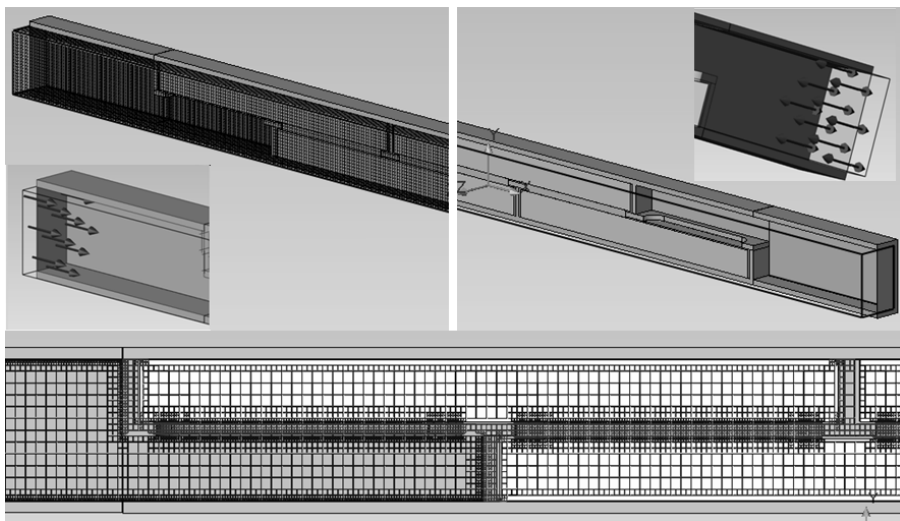


Рис. 3 – Конфигурация 3D модели геометрии модуля ДМ ФЭ.

Таблица 2 – Параметры вариантов расчета

| Вариант | Количество ячеек | | | Количество итераций | Длит. итераций с | Процессорное время расчёта | | |
|-------------|------------------|--------|--------|---------------------|---------------------|----------------------------|-----|----|
| | Тв. тела | ТС | Част. | | | ч | мин | с |
| Без ПТ | 4132 | 123480 | 38468 | 756 | 12 | 2 | 31 | 12 |
| С 1 ПТ №1 | 65340 | 266828 | 162893 | 906 | 62 | 15 | 36 | 12 |
| С 1 ПТ №2 | 29632 | 178468 | 61500 | 865 | 17 | 4 | 5 | 5 |
| С 1 ПТ №3 | 36412 | 237356 | 98898 | 810 | 24 | 5 | 24 | 0 |
| Со всеми ПТ | 65523 | 266888 | 163007 | 918 | 106 | 27 | 09 | 36 |

Результаты расчета. Расчет выполнен для нескольких режимов работы дизеля 2Ч10,5/12. Результаты расчета варианта представлены на рис. 5. На нем также представлены результаты экспериментального исследования ДМ

ФЭ на МИС и ПММ ФЭ на безмоторной исследовательской установке (БИУ). Как можно видеть, результаты этих исследований хорошо согласуются между собой.

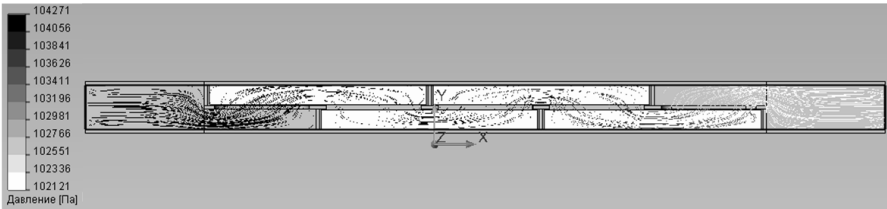


Рис. 4 – Результат расчета гидравлического сопротивления ДМ ФЭ.

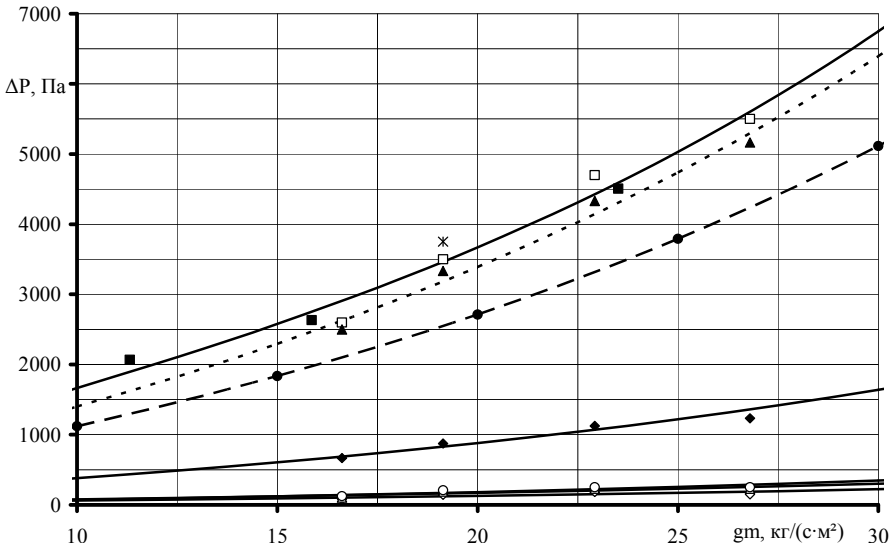


Рис. 5 – Результаты исследования.

- – данные, экспериментально полученные на БИУ для ПММ ФЭ;
- – данные, экспериментально полученные на МИС для ДМЦ ФЭ;
- ▲ – данные, полученные расчетом по формуле 1 для результатов расчетного исследования;
- – данные, полученные расчетом по формуле 1 для результатов экспериментального исследования ПММ ФЭ на БИУ;
- ◇, Δ, ○, ◆ – данные, полученные при расчетном исследовании ДМЦ ФЭ: величины $\Delta P_{\text{ДМЦФЭБПТ}}$, $\Delta P_{\text{ДМЦФЭ+ПТ1}}$, $\Delta P_{\text{ДМЦФЭ+ПТ2}}$; $\Delta P_{\text{ДМЦФЭ+ПТ3}}$ соответственно;
- * – данные, полученные при расчетном исследовании ДМЦ ФЭ со всеми «непогашенными» ПТ.

Особенностью расчета является то, что параметры пористых тел, присутствующих в конфигурации ДМЦ ФЭ, отличаются от таковых, определенных при физическом их моделировании на БИУ (представлены на рисунке 6), а именно:

– удельный массовый расход текучей среды для пористых тел, образованных стальной тканой сеткой и межсеточным объемом, в 2,5 раза меньше, чем для сечения на входе в модуль ДМЦ ФЭ, поскольку потоку ОГ предоставляется всё проходное сечение таких ПТ, равное площади сечения отверстия в соединительной пластине модуля;

– гидравлическое сопротивление пористого тела, образованного насыпкой сетчатых кассет из природного цеолита, составляет 17,5 % от гидравлического сопротивления цеолитовой ячейки, полученное на БИУ, поскольку проходное сечение, предоставляемое потоку ОГ в таком пористом теле, поворачивается на 180°, причем сначала при повороте на 90° его величина уменьшается в 2,5 раза, и далее при повороте еще на 90° его величина увеличивается до прежних размеров, описывая эллипс. Соответственно, по траектории потока изменяются площадь проходного сечения и длина пути потока в ПТ. Это проиллюстрировано на рис. 7.

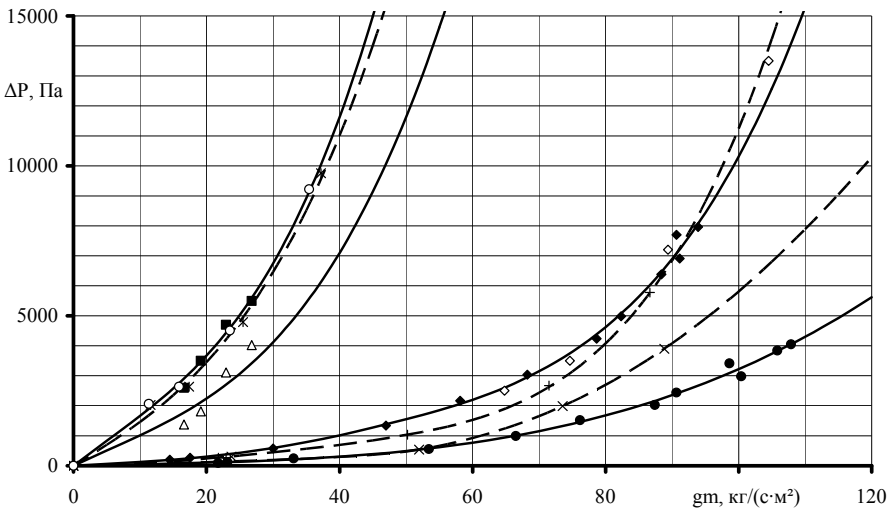


Рис. 6 – Результаты физического моделирования процесса движения ОГ для ПММ ФЭ на БИУ

- – ДМЦ ФЭ на МИС, установленный за выпускным коллектором дизеля 2Ч10,5/12;
- – ПММ ФЭ с цеолитовой насыпкой в сетчатых кассетах; ● – ПММ ФЭ без ПТ;
- ◆ – ПММ ФЭ без цеолитовой насыпки в сетчатых кассетах; ◇ – ДМ ФЭ на МИС;
- △ – ДМЦ ФЭ на МИС, установленный в 5 м за выпускным коллектором дизеля;
- × – ПТ №1; * – ПТ №2; + – ПТ № 3.

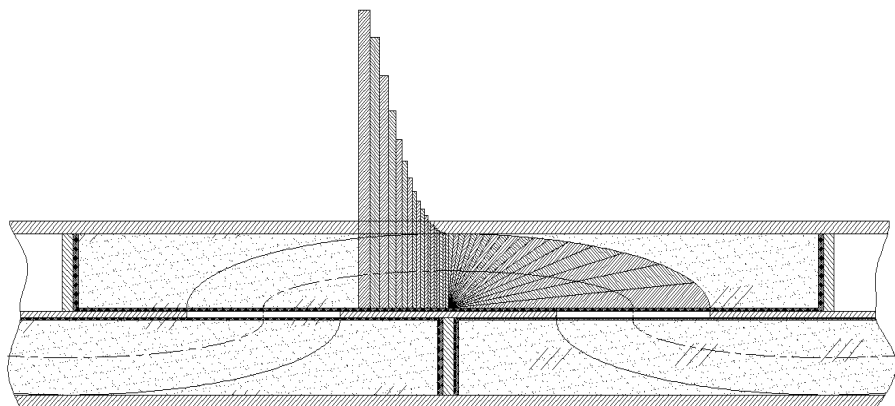


Рис. 7 – Изменение геометрических параметров ПТ по траектории движения потока ОГ в нем.

Перспективы дальнейших исследований состоят в поиске способов брикетирования сыпучих термостойких сорбентов, а также в поиске сыпучих сорбентов, альтернативных природному цеолиту.

Выводы. В данной части исследования процессы, происходящие в фильтрующем элементе ФТЧ дизеля с насыпкой из природного цеолита в сетчатых кассетах, исследовались методами математического моделирования. Основными результатами проведенных исследований стали следующие:

- основную часть гидравлического сопротивления ДМЦ ФЭ составляют насыпка из природного цеолита (около 71,5 %);
- влиянием на величину гидравлического сопротивления ДМЦ ФЭ самого модуля (около 3 %), кассет из стальной сетки и межсеточного объема (в сумме не превышает 4,5 %), возможно пренебречь в дальнейших расчетных исследованиях;
- данные, полученные расчетом гидравлического сопротивления как аддитивной величины для результатов расчета отличаются от данных, полученных экспериментально для ДМЦ ФЭ на МИС в среднем на 15,5 %, что обусловлено тем, что в расчете учитывался теплообмен только в текучей среде, шероховатость поверхностей деталей ДМЦ ФЭ отличалась от заданной при расчете, в выпускном тракте МИС возможны утечки ОГ, а также тем, что при работе фильтра неизбежно его засорение;
- данные, полученные расчетом гидравлического сопротивления как аддитивной величины для результатов физического моделирования процессов в ПММ ФЭ на БИУ отличаются в среднем на 32,3 % от данных, полученных экспериментально для ДМЦ ФЭ на МИС, что обусловлено эффектом взаимного влияния всех ПТ на параметры потока ОГ и наличием вихревого

движения ОГ в областях модуля, не стоящих на пути основного потока.

– данные, полученные расчетом конфигурации со всеми «непогашенными» ПТ для режима максимального крутящего момента дизеля на 2,5 % превышают данные, полученных экспериментально для ДМЦ ФЭ на МИС, что обусловлено погрешностями измерений параметров ОГ в выпускном тракте МИС и погрешностями расчета.

Приведенные данные позволяют сделать вывод о корректности выполненного исследования.

Список литературы: 1. *Кондратенко А.Н.* Моделирование тепло- и массообменных процессов в фильтре твердых частиц дизеля. Часть 1: модернизация конструкции фильтра и дополнение базы данных по свойствам пористого тела / *А.Н. Кондратенко, А.П. Строков, А.Н. Авраменко* // Двигатели внутреннего сгорания. – 2012. – № 1. – С. 82-88. 2. *Кондратенко А.Н.* Моделирование тепло- и массообменных процессов в фильтре твердых частиц дизеля. Часть 2: дополнение баз данных по свойствам материалов фильтра и рабочего тела, определение значений крайних условий / *А.Н. Кондратенко, А.П. Строков, В.М. Семикин* // Двигатели внутреннего сгорания. – 2012. – № 2. – С. 87-92. 3. *Кондратенко А.Н.* Моделирование тепло- и массообменных процессов в фильтре твердых частиц дизеля. Часть 3: вопросы использования цеолита в конструкции фильтрующего элемента / *А.Н. Кондратенко* // Вестник Национального технического университета "ХПИ". Сборник научных трудов. Тематический сборник: Автомобиле- и тракторостроение. Харьков: НТУ "ХПИ". – 2012. – № 60 (966) – С 83-89. 4. *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. Строков* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – №5 (979). – С. 100-109. 5. *Алямовский А.А.* Компьютерное моделирование в инженерной практике. / *А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов та ін.* – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.

Поступила в редколлегию 30.04.2013

УДК 621.43.068.4

Моделирование тепло- и массообменных процессов в фильтре твердых частиц дизеля. Часть 5: расчетное исследование гидравлического сопротивления фильтра с цеолитовой насыпкой / А.Н. Кондратенко, А.П. Строков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – №37 (1010). – С. 68 – 75. Бібліогр.: 5 назв.

Описуються результати розрахункового дослідження гідравлічного опору модуля фільтруючого елемента фільтра твердих частинок дизеля із цеолітовою насипкою сітчастих касет. Також наводяться дані щодо ідентифікації параметрів математичної моделі процесу руху відпрацьованих газів дизеля у модулі фільтруючого елемента.

Ключові слова: дизель, відпрацьовані гази, тверді частинки, сажа, фільтр твердих частинок, гідравлічний опір.

The present paper describes the results of calculation research of the hydraulic resistance of the filter element of diesel particulate filter with the bulk zeolite in mash cartridge. Also this article present data on the identification of parameters of the mathematical model of the process of movement of diesel exhaust gases in the module of filter element.

Key words: diesel exhaust gases, particulate matter, soot, particulate matter filter, hydraulic resistance.