

Рузіна І.М., Хай В.В., Хоменко Г.О. Комп'ютеризація процесу контролю гідратування та квазістационарних режимів роботи газопроводів системи видобутку і збору газу // «Питання розвитку газової промисловості» / Зб. наук. пр., вип. XXXVIII. – Харків: УкрНДІгаз, – 2010р., – С. 201 – 207.

**Bibliography (transliterated):** 1. Galko, T. M., and V.V. Aks'onov. "Osoblivosti proektuvannja rozrobki gazokondensatnih rodovishh na zavershal'nij stadii promislovoi ekspluatacij." *Naftova i gazova promislovist'*. Kіiv: NAK «Naftogaz Ukraїni». No. 2. 2009. 26–28. Print. 2. Bojko, V. S., R. M. Kondrat and R. S. Jaremijchuk. *Dovidnik z naftogazovoi spravi*. Kyiv.: L'viv, 1996. Print. 3. Bratah, M. I., et al. "Matematiczna model' zalpovogo vikidu ridini z porozhnini gazoprovodu." *XVIII (ezhegodnaja) mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja. konf. "Jekologicheskaja i tehnogennaja bezopasnost', ohrana vodnogo i vozdushnogo bassejnov, utilizacija othodov"*. *Sb. nauchn. trudov*. Berdyansk, 2010. 444–452. Print. 4. Bratah, M. I., et al. "Komp'juterizacija procesu kontrolju gidratoutvorennja ta kvazistacionarnih rezhimiv roboti gazoprovodiv sistemi vidobutku i zboru gazu." *Zb. nauk. pr.: Pitannya rozvitku gazovoi promislovosti*. No. XXXVIII. Kharkiv: UkrNDIgaz, 2010. 201–207. Print.

*Поступила (received) 03.05.2014*

УДК 621.43.068.4

**А.Н. КОНДРАТЕНКО**, канд. техн. наук, вед. инж., ИПМаш НАНУ,  
Харьков

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ФИЛЬТРА ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ДИЗЕЛЯ. ЧАСТЬ 1: НАСТРОЕЧНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ**

Приведена и описана математическая модель гидравлического сопротивления фильтра твёрдых частиц (ФТЧ) в реальных условиях эксплуатации. Модель построена на основе расходной характеристики одного модуля ФТЧ, экспериментально полученной при постоянной температуре текучей среды, и данных стендовых испытаний автотракторного дизеля 2410,5/12, оснащенного полноразмерным ФТЧ. Модель позволяет учесть ряд факторов, характеризующих условия эксплуатации ФТЧ в составе выпускной системы этого дизеля. Учет этих факторов производится путем введения соответствующих коэффициентов. В данной части работы описан физический смысл и оценены значения настроечного коэффициента модели, позволяющего связать результаты исследований на безмоторной установке и моторном стенде и учесть тип конструктивного исполнения модуля фильтрующего элемента.

**Ключевые слова:** дизель, фильтр твердых частиц, гидравлическое сопротивление, математическая модель.

**Введение.** Как известно, с 1 января 2011 года на территории Украины введены в действие нормы токсичности стандартов Правил ЕЭК ООН №№ 49 и 96 уровня EURO III, пришедшие на смену предыдущему уровню этих стандартов, действовавших с 2005 года. На территории Российской Федерации на данный момент действуют нормы уровня EURO IV, на территории Европейского Союза – уровня EURO V [1 – 4]. Для достижения автотранспортными средствами (АТС), оснащенными дизельными ДВС, уровня эколо-

© А. Н. Кондратенко, 2014

гических показателей, оговоренных этими нормами, наряду с мероприятиями по влиянию на рабочий процесс дизеля широко применяют различные системы очистки их отработавших газов (ОГ) от нормируемых вредных веществ. К таковым относят: несгоревшие углеводороды моторного топлива и масла  $\text{C}_n\text{H}_m$ , монооксид углерода  $\text{CO}$ , оксиды азота  $\text{NO}_x$ , и твердые частицы ТЧ, причем  $\text{C}_n\text{H}_m$  частично содержится в составе ТЧ, которые вместе с  $\text{NO}_x$  составляют до 95 % токсичности ОГ [5 – 8]. Для нейтрализации ТЧ в ОГ (удаления из потока, накопления в фильтрующем элементе (ФЭ) и превращения в безопасные вещества в ФЭ или вне борта АТС) в системах снижения токсичности ОГ дизелей применяют фильтры твердых частиц (ФТЧ) с цельнокерамическими ФЭ с сотовой структурой каналов, заглушенных в шахматном порядке, и каталитическими покрытиями, содержащими металлы платиновой группы [9]. Таким ФТЧ присущ ряд недостатков, связанных с их низкими показателями технологичности и себестоимости производства, эксплуатационной надежности, гидравлического сопротивления (ГС), а также массогабаритными [10]. В связи с вышесказанным следует отметить, что научно-исследовательские работы, направленные на создание принципиально новых и совершенствование известных конструкций ФТЧ, являются актуальными и экономически обоснованными.

**Анализ литературных источников.** В отделе поршневых энергоустановок (ПЭУ) Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины (ИПМаш НАНУ) разработан ФЭ, состоящий из одинаковых модулей, каждый из которых состоит из двух типов деталей (кожух – 2 шт., сетчатая кассета с насыпкой из природного цеолита – 4 шт.), изготовленных из недорогих и недефицитных материалов отечественного производства (стальной листовой нержавеющей прокат, стальная нержавеющая тканая сетка и насыпной среднефракционный природный цеолит (ПЦ)) и не содержит каталитических покрытий [10, 11].

Выполнено физическое моделирование процесса движения текучей среды (ТС) в различных вариантах конструкции модуля разработанного ФТЧ на безмоторной исследовательской установке (БИУ) [12, 13]. Экспериментальный образец при этом представлял собой один модуль ФЭ, изготовленный из плексигласа и имеющий разъемную конструкцию, позволяющую изменять его конструктивные особенности – прозрачный макет модуля (ПММ) ФЭ. Также использовались другие экспериментальные образцы, позволяющие исследовать конструктивные элементы модуля по-отдельности [14, 15]. В результате получены расходные характеристики как самого модуля, так и его конструктивных элементов по-отдельности при неизменной температуре ТС  $t_{ТС}$  (отличие от температуры окружающей среды (ОС)  $t_0$  составляло 2 – 5 °С), то есть, можно считать, что они являются линиями равного уровня температуры – изотермами [10]. В качестве ТС в БИУ используется очищенный от пыли атмосферный воздух, нагнетаемый в ее полости поршневым компрессором, который близок по значению молекулярной массы и других теплофизических свойств к ОГ дизеля. БИУ обеспечивает поток ТС  $g_m$  (мас-

совый расход ТС  $G_m$ , приходящийся на единицу площади характерного сечения  $S$ ) через входное отверстие ПММ в пределах  $0 - 120 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ , то есть превышает значение потока ОГ через выпускной коллектор дизеля 2Ч10,5/12 (не более  $25 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ ) более чем в 5 раз [12, 13].

Также проведено математическое моделирование процесса движения потока ОГ в модуле ФЭ, для чего использована лицензионная учебная версия программного комплекса COSMOS FloWorks, входящего в Solid Works 2008 [10, 16, 17], и адаптирована к объекту исследования в вычислительном центре «Тензор» (каф. «Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин» НТУ «ХПИ»). Результаты моделирования удовлетворительно согласуются с результатами экспериментального исследования ГС модуля ФЭ на БИУ и моторном испытательном стенде (МИС) [18, 19].

По результатам физического и математического моделирования процессов в модуле ФЭ разработаны действующие макетные образцы ФЭ, отличающиеся, в первую очередь, наличием (ДМЦ) и отсутствием (ДМ) насыпки из ПЦ в сетчатых кассетах. Также они отличались наличием (ДМ) и отсутствием (ДМЦ) соединительной пластины и, кроме того, количеством модулей в образце –  $z_m = 4$  шт. в ДМ и  $z_m = 20$  шт. в ДМЦ [18, 19].

Для выявления особенностей функционирования разработанного ФТЧ в условиях выпускной системы дизеля (то есть в реальных условиях эксплуатации) проведено экспериментальное исследование ДМ и ДМЦ ФЭ на МИС лаборатории отдела ПЭУ ИПМаш НАНУ. Стенд оснащен автотракторным двухцилиндровым четырехтактным двухклапанным дизелем воздушного охлаждения 2Ч10,5/12 (Д21А1) с неразделенной камерой сгорания в поршне и одноплунжерным ТНВД распределительного типа и всережимным механическим регулятором, с рабочим объемом  $2,0 \text{ дм}^3$  и номинальной мощностью  $21,3 \text{ кВт}$ , производства Владимирского тракторного завода [20]. Согласно разработанной программе, моторные испытания состояли из четырех этапов, каждый из которых проведен с целью определения физического смысла и значений соответствующих коэффициентов в формуле (1) [10].

**Цель и постановка задач исследования.** Целью исследования является описание математическим языком выявленных экспериментальным путем аспектов влияния эксплуатационных факторов на гидравлическое сопротивление фильтрующего элемента фильтра твердых частиц дизеля.

Задачами исследования являются учет влияния на ГС разработанного ФТЧ следующих факторов:

1. конструктивных особенностей модуля ФЭ – наличие или отсутствие насыпки из ПЦ в сетчатых кассетах и соединительной пластины в модуле;
2. геометрических особенностей модуля ФЭ – площади входного отверстия модуля  $S_{вх}$ ;
3. рабочего объема цилиндров дизеля – соответствующего ему количества модулей в полноразмерном ФЭ  $z_m$ ;
4. режима работы дизеля 2Ч10,5/12 – частоты вращения коленчатого ва-

ла дизеля  $n_{кв}$  (а фактически – потока ОГ  $g_{mOG}$ ) и крутящего момента дизеля  $M_{кр}$  или среднего эффективного давления  $P_e$  (а фактически – температуры ОГ на входе в ФТЧ  $t_{ФТЧex}$ ) на стационарном режиме его работы;

5. места установки ФТЧ по длине выпускного тракта дизеля – длины выпускного тракта между выпускным коллектором дизеля и ФТЧ  $L_{вып}$  (а фактически – максимальной температуры ОГ на входе в ФТЧ  $t_{ФТЧexmax}$ );

6. динамики засорения ФЭ – времени работы дизеля 2Ч10,5/12 на стационарном режиме с  $M_{крmax}$   $\tau_M$ , эффективной мощности дизеля на  $i$ -ом режиме  $N_{ei}$  и весового фактора этого режима  $WF_i$  в стационарном испытательном цикле, являющемся моделью эксплуатации такого типа дизеля [2, 3].

В данной части исследования отражены подходы к решению первой – третьей и, частично, четвертой задач.

**Математическая модель гидравлического сопротивления ФТЧ дизеля в реальных условиях эксплуатации.** При построении модели предполагается, что вид расходной характеристики ПММ ФЭ, полученной экспериментально на БИУ при постоянной температуре ТС, сохраняется для ДМ и ДМЦ ФЭ (их модули принципиально повторяют соответствующие варианты конструкции ПММ ФЭ, что позволяет выполнить п. 1 задач исследования) в условиях выпускной системы дизеля (реальных условиях эксплуатации) при постоянной температуре ОГ. Установление связи между расходной характеристикой ПММ ФЭ и расходными характеристиками ДМЦ ФЭ, полученными экспериментально на МИС на разных этапах моторных испытаний (позволяет выполнить пп. 4, 5 и 6 задач исследования), предполагается путем представления расходной характеристики ПММ ФЭ в вид зависимости ГС от потока ТС  $g_m$  (позволяет выполнить пп. 2 и 3 задач исследования) и введения ряда коэффициентов, учитывающих соответствующие факторы – набора  $g_{mOG}$ ,  $S_{ex}$ ,  $z_m$ ,  $t_{ФТЧex}$ ,  $t_{ФТЧexmax}$ ,  $\tau_M$ ,  $N_{ei}$ ,  $WF_i$  или набора  $n_{кв}$ ,  $S_{ex}$ ,  $z_m$ ,  $M_{кр}$ ,  $L_{вып}$ ,  $\tau_M$ ,  $N_{ei}$ ,  $WF_i$ .

Таким образом, математическая модель имеет вид:

$$\Delta P_{ФТЧ} = \Delta P_{ПММ} (g_{m\_OGi}; S_{ex}; z_m) \cdot k_0 \cdot k_t (t_{ФТЧexi}) \cdot k_L (t_{ФТЧexmax}) \cdot k_\tau (\tau_M; N_{ei}; WF_i) = \\ = \Delta P_{ПММ} (n_{квi}; S_{ex}; z_m) \cdot k_0 \cdot k_t (M_{крi}) \cdot k_L (L_{вып}) \cdot k_\tau (\tau_M; N_{ei}; WF_i), \text{ Па} \quad (1)$$

где индекс  $i$  соответствует текущему режиму работы дизеля;  $k_0$ ,  $k_t$ ,  $k_L$ ,  $k_\tau$  – настроечный, температурный, компоновочный, временной коэффициенты, соответственно.

При  $z_m = 1$  и  $S_{ex} = 55 \text{ мм}^2$ ,  $t_0 = t_{TC} = 15 \dots 20 \pm 2^\circ \text{C}$ ;  $B_0 = 95 \text{ кПа}$ ,  $g_m = 10 \dots 110 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  [10 – 13] получаем:

$$\Delta P_{ПММ} = 0,122 \cdot g_{m\_OG}^3 - 1,964 \cdot g_{m\_OG}^2 + 173,7 \cdot g_{m\_OG}, \text{ Па}; \quad (2)$$

$$g_{m\_OG} = (1,558 \cdot 10^{-2} \cdot n_{кв} + 0,956) \cdot 20 / z_m \cdot 55 / S_{ex}, \text{ кг/(с} \cdot \text{м}^2) \quad (3)$$

В данной части исследования представлены подходы и результаты экспериментального определения настроечного коэффициента  $k_0$ .

**Определение настроечного коэффициента.** Первый этап моторных исследований – сравнительных для ДМ и ДМЦ ФЭ – показал принципиальное превосходство варианта конструкции модуля ФЭ с насыпкой из ПЦ по эффективности очистки им ОГ дизеля от ТЧ как в количественном, так и в качественном плане [10 – 13]. Однако модуль ДМЦ ФЭ обладает большей массой и себестоимостью изготовления, а также существенно большим ГС и требует в связи с этим большего количества модулей в ФЭ. При этом экспериментальные образцы устанавливались в макетодерживающую вставку (МВ), которая размещалась непосредственно за выпускным коллектором дизеля ( $L_{вып} = 0$  м,  $t_{ФТЧex} = 605^\circ\text{C}$ ) и в строго вертикальном положении (для уплотнения насыпки из ПЦ в сетчатых кассетах под собственным весом). МВ герметична, имеет разъемную конструкцию, оснащена фланцами для присоединения к другим составляющим частям выпускного тракта МИС и штуцерами для подключения дифманометров и термодатчиков ТХА, подающими сигнал на приборы ОВЕН ТРМ-200. Для размещения в МИС действующих макетов с различным количеством одинаковых по габаритным размерам модулей, экспериментальные образцы оснащены герметизирующими шторками. Методика проведения данного этапа моторных испытаний заключалась в измерении ГС экспериментальных образцов (и других показателей работы дизеля, в том числе и характеристик токсичности ОГ) при работе дизеля на режимах внешней скоростной характеристики (в.с.х.). Такой подход наиболее информативен при рациональных затратах времени и средств на проведение исследований, поскольку это обусловлено следующими особенностями в.с.х.:

- для этой характеристики поток ОГ, в функции которого изменяется ГС образцов, изменяется в наиболее широких пределах для дизеля;

- она содержит режим максимального крутящего момента  $M_{кр\max}$  дизеля, на котором обычно наблюдается глобальный *минимум коэффициента избытка воздуха  $\alpha$*  в поле рабочих режимов дизеля (так называемый *предел дымления*, при  $\alpha$ , равном 1,3) и, как следствие, глобальный максимум дымности ОГ  $N$ , а значит и массового выброса ТЧ  $G_{ТЧ}$ . Также на этом режиме наблюдается глобальный максимум температуры ОГ в выпускном коллекторе дизеля  $t_{OG}$ . Немаловажным является то, что на этом режиме автотракторного дизеля при отсутствии системы электронного управления (а у дизеля Д21А1 оно отсутствует) согласованы остальные параметры его работы для достижения глобального минимума удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ ;

- она содержит номинальный режим работы дизеля с мощностью  $N_{enom}$ , на котором наблюдается глобальный максимум массового часового расхода

топлива  $B_{г}$  ;

– по ее режимам температура  $t_{ог}$  изменяется в пределах, достаточных для прогнозирования зависимости от нее рабочих характеристик экспериментального образца.

Сами внешние скоростные характеристики построены путем описания экспериментально полученных точек полиномами 1 – 4 степени *методом линейной регрессии* [21]. При этом использованы режимы работы дизеля со следующими значениями  $n_{кв}$  :

900, 1000, 1200 (режим с  $M_{кр\max}$ ), 1400, 1600 и 1800 (режим с  $N_{еном}$ ) мин<sup>-1</sup>.

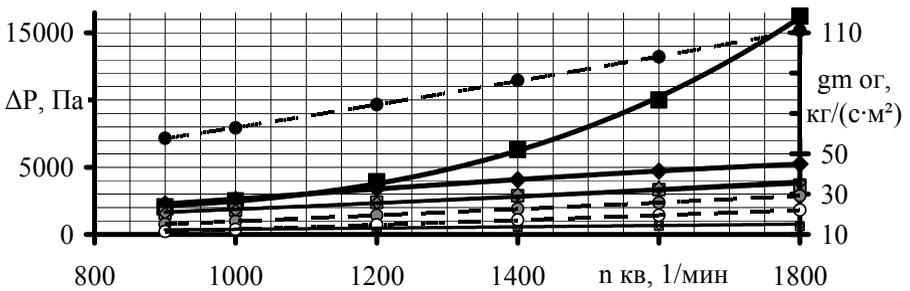


Рис. 1 – Распределение значений ГС элементов выпускного тракта МИС и значений потока ОГ в его характерном сечении по режимам в.с.х. дизеля 2Ч10,5/12:  
 ■, □, ▣, ● – для ДМ ФЭ; ◆, ◇, ◊, ○ – для ДМЦ ФЭ; ■, ◆ –  $\Delta P_{фгч}$ ; ▣, ◇ –  $\Delta P_{вып}$  ;  
 □, ◇ –  $\Delta P_{мв}$  ; ●, ○, ◊ –  $g_{mог}$  для ДМ, ДМЦ ФЭ и выпускного коллектора дизеля.

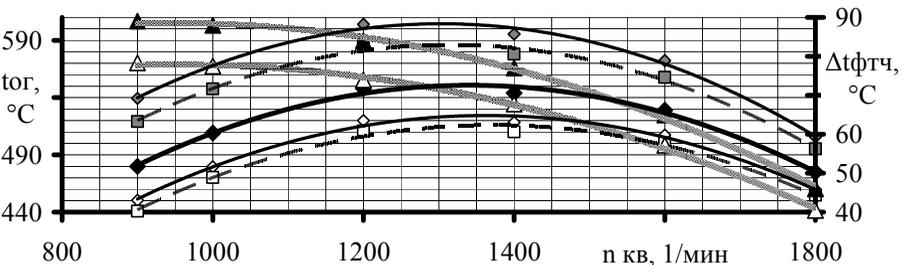


Рис. 2 – Распределение значений температуры ОГ и ее перепадов на МВ по режимам в.с.х. дизеля 2Ч10,5/12: ◆ – без МВ ДМ и ДМЦ ФЭ; □, ▣, ▲ – ДМ ФЭ; ◇, ▣, Δ – ДМЦ ФЭ; ◆ –  $t_{ог}$  ; ▣, ◇ –  $t_{фгчвх}$  ; □, ◇ –  $t_{фгчвых}$  ; ▲, Δ –  $\Delta t_{фгч}$  .

К экспериментально полученным значениям ГС применен подход как к аддитивной величине, то есть из них вычтены значения ГС самой МВ (они получены экспериментально на МИС с пустой МВ) и пространства в МВ между герметизирующими шторками и внешними кожухами модулей экспериментальных образцов (эти данные получены расчетным путем в среде COSMOS FloWorks). Массовый расход ОГ  $G_{mог}$  на режиме определялся

суммированием массовых расходов воздуха  $G_B$  и топлива  $G_T$  дизелем, полученных косвенными однократными измерениями. Результаты исследования представлены на рис. 1 – 3.

На рис. 1 представлены зависимости значений ГС экспериментальных образцов ФЭ, МВ и остальной части выпускного тракта МИС (сплошные линии) и значений потока ОГ в характерном сечении выпускного тракта МИС (пунктирные линии) от  $n_{кв}$  дизеля 2Ч10,5/12 при его работе по внешней скоростной характеристике.

В качестве характерного сечения выпускного тракта МИС выбрано выходное отверстие выпускного коллектора дизеля 2Ч10,5/12 как единственной части штатной выпускной системы этого дизеля, установленной на МИС. Как видно на рис. 1, ГС ДМ и ДМЦ ФЭ, а также пустой МВ изменяется в функции частоты  $n_{кв}$  нелинейно. Характер зависимости значения  $g_{mOG}$  потока ОГ дизеля от  $n_{кв}$  является линейным. Для ДМ ФЭ этот параметр в среднем превосходит его значение в штатной выпускной системе этого дизеля в 4,5 раза, а для ДМЦ ФЭ, в 1,45 раза. ГС части выпускной системы МИС, находящейся за МВ, в среднем составляет около 70 % от ГС ДМЦ ФЭ, а ГС пустой МВ – около 14,3 %.

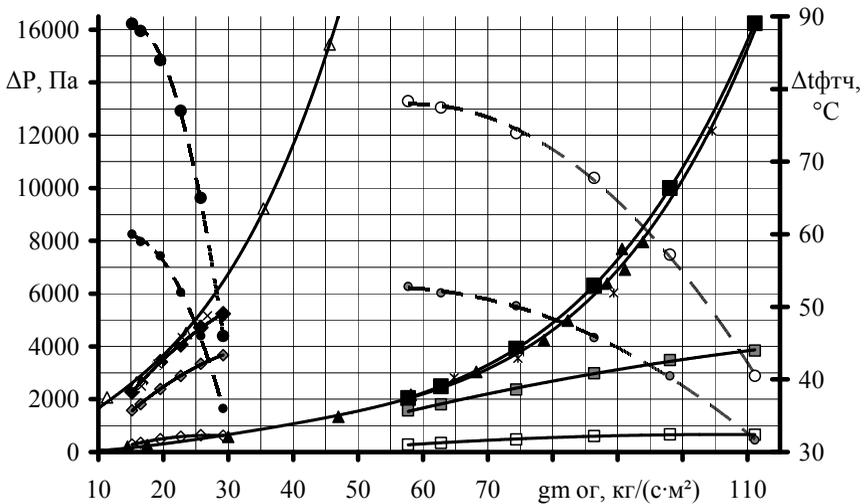


Рис. 3 – Расходные характеристики экспериментальных образцов и других частей выпускного тракта МИС и перепады температур на них для в.с.х. дизеля 2Ч10,5/12:

■, □, ▣, ●, \* – для ДМ ФЭ; ◆, ◇, ◻, × – для ДМЦ ФЭ; ▲, △ – для ПММ ФЭ на БИУ; \*, × – расчет в COSMOS FloWorks; ■, ◆, ▲, △, \*, × –  $\Delta P_{фгч}$ ; ▣, ▤ –  $\Delta P_{вып}$ ; □, ◇ –  $\Delta P_{МВ}$ ; ●, ○ –  $\Delta t_{фгч}$ .

На рис. 2 представлены зависимости температуры ОГ за выпускным коллектором дизеля без экспериментальных образцов в МВ  $t_{ог}$  (сплошная

жирная линия), на входе  $t_{\text{ФТЧ}_{\text{вх}}}$  и выходе  $t_{\text{ФТЧ}_{\text{вых}}}$  из МВ и перепада температуры на МВ  $\Delta t_{\text{ФТЧ}}$  (серые линии) с установленным в ней экспериментальным образцом (ДМ – тонкие пунктирные линии или ДМЦ – тонкие сплошные линии) от  $n_{\text{кв}}$  дизеля 2Ч10,5/12 при его работе по в.с.х.

На нем видно, что по режимам в.с.х.  $t_{\text{ОГ}}$  изменяется по степенной зависимости, достигая максимума, равного 550 °С, на режиме с  $M_{\text{кр max}}$  и снижается с убыванием или возрастанием частоты  $n_{\text{кв}}$  до уровня 480 и 515 °С соответственно. Наличие ДМ и ДМЦ ФЭ в МВ несколько повышает  $t_{\text{ФТЧ}_{\text{вх}}}$  на величину в среднем 50 и 66 % от значения  $\Delta t_{\text{ФТЧ}}$  для ДМ и ДМЦ соответственно, что объясняется созданием значительного гидравлического сопротивления объектом исследования на выпуске. Так как температура ОГ не является аддитивной величиной, в отличие от давления, то вычлнить значения перепада температур самих действующих макетов из перепада температур на МВ затруднительно. На рис. 2 и 3 видно, что величина  $\Delta t_{\text{ФТЧ}}$  уменьшается с увеличением  $G_{\text{мОГ}}$  (в связи с увеличением скорости потока ОГ в ФЭ и снижением времени на процесс теплообмена) и увеличивается с увеличением  $t_{\text{ОГ}}$  (теплообмен с ОС интенсифицируется с повышением температурного напора). То же верно и для пустой МВ  $\Delta t_{\text{МВ}}$ .

На рис. 3 представлены расходные характеристики ДМ и ДМЦ ФЭ, МВ и остальной части выпускного тракта МИС (сплошные линии), а также перепады температур на них (пунктирные линии) в функции потока ОГ для режимов работы дизеля 2Ч10,5/12 по в.с.х. На нем видно, что зависимости ГС ДМ и ДМЦ ФЭ от потока ОГ не согласуются по форме с полученными на БИУ данными для ПММ ФЭ соответствующей конструкции. Это обусловлено тем, что расходные характеристики для соответствующих вариантов конструкции ПММ ФЭ, полученные на БИУ, являются изотермами, а по в.с.х. изменение  $t_{\text{ОГ}}$  в функции  $P_e$  существенно. То есть, характер зависимости экспериментально полученных значений ГС ДМ и ДМЦ повторяет характер зависимости  $t_{\text{ОГ}}$  от  $g_{\text{мОГ}}$  (см. рис. 1 и 2). С уменьшением  $t_{\text{ОГ}}$  уменьшается ГС всех элементов выпускного тракта дизеля на МИС, что объясняется понижением объемного расхода ОГ  $G_{\text{VОГ}}$  при постоянном массовом расходе ОГ  $G_{\text{мОГ}}$  с соответствующем увеличением плотности ОГ и уменьшением скорости движения ОГ, а также дополнительным расширением потока ОГ в добавленных в ходе модернизации МИС компонентов его выпускной системы.

Также на рис. 3 приведены результаты расчетного определения ГС модуля ФЭ в COSMOS FloWorks, которые удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, полученными на МИС как количественно (значения ГС), так и качественно (форма графика зависимости).

Все зависимости рис. 1 – 3, описанные полиномами 1 – 4 степени методом линейной регрессии, имеют следующий вид. Для выпускной системы МИС с пустой МВ – используются формулы (4) – (8), с ДМ ФЭ в МВ – фор-

мулы (9) – (13), с ДМЦ ФЭ в МВ – формулы (14) – (22):

$$g_{m\_OG\_ДВС} = 1,179 \cdot 10^{-2} \cdot n_{кв} + 0,723; R^2 = 0,99926; \quad (4)$$

$$t_{OG} = -3,590 \cdot 10^{-4} \cdot n_{кв}^2 + 0,963 \cdot n_{кв} - 94,8; R^2 = 0,98880; \quad (5)$$

$$\Delta P_{вып} = 2,458 \cdot 10^{-4} \cdot n_{кв}^2 + 1,639 \cdot n_{кв}; R^2 = 0,99157; \quad (6)$$

$$\Delta P_{MB} = 5,459 \cdot 10^{-5} \cdot n_{кв}^2 + 0,330 \cdot 10^{-4} \cdot n_{кв}; R^2 = 0,98783. \quad (7)$$

$$\Delta t_{MB} = -2,814 \cdot 10^{-5} \cdot n_{кв}^2 + 4,992 \cdot 10^{-2} \cdot n_{кв} + 37,6; R^2 = 0,99832. \quad (8)$$

$$g_{m\_OG\_ДМ} = 5,932 \cdot 10^{-2} \cdot n_{кв} + 3,637; R^2 = 0,99926; \quad (9)$$

$$\Delta P_{ФТЧ} = 7,656 \cdot 10^{-6} \cdot n_{кв}^3 - 1,324 \cdot 10^{-2} \cdot n_{кв}^2 + 7,98 \cdot n_{кв}; R^2 = 0,99924; \quad (10)$$

$$t_{ФТЧ_{вх}} = -3,845 \cdot 10^{-4} \cdot n_{кв}^2 + 1,011 \cdot n_{кв} - 78,8; R^2 = 0,99105; \quad (11)$$

$$t_{ФТЧ_{вых}} = -3,335 \cdot 10^{-4} \cdot n_{кв}^2 + 0,914 \cdot n_{кв} - 110,8; R^2 = 0,98694; \quad (12)$$

$$\Delta t_{ФТЧ} = -5,098 \cdot 10^{-5} \cdot n_{кв}^2 + 9,676 \cdot 10^{-2} \cdot n_{кв} + 32,0; R^2 = 0,99804; \quad (13)$$

$$g_{m\_OG\_ДМЦ} = 1,558 \cdot 10^{-2} \cdot n_{кв} + 0,956; R^2 = 0,99926; \quad (14)$$

$$\Delta P_{ФТЧ} = 3,511 \cdot 10^{-4} \cdot n_{кв}^2 + 2,341 \cdot n_{кв}; R^2 = 0,99157; \quad (15)$$

$$t_{ФТЧ_{вх}} = -3,976 \cdot 10^{-4} \cdot n_{кв}^2 + 1,036 \cdot n_{кв} - 70,6; R^2 = 0,99213; \quad (16)$$

$$t_{ФТЧ_{вых}} = -3,397 \cdot 10^{-4} \cdot n_{кв}^2 + 0,926 \cdot n_{кв} - 106,9; R^2 = 0,98731; \quad (17)$$

$$\Delta t_{ФТЧ} = -5,793 \cdot 10^{-5} \cdot n_{кв}^2 + 0,110 \cdot n_{кв} + 36,7; R^2 = 0,99807; \quad (18)$$

$$\Delta P_{ФТЧ} = -4,766 \cdot g_{m\_OG}^2 + 423,72 \cdot g_{m\_OG} - 3061,2; R^2 = 0,99971 \quad (19)$$

$$\Delta P_{вып} = -0,253 \cdot g_{m\_OG}^2 + 86,40 \cdot g_{m\_OG} - 2603,9; R^2 = 0,99813; \quad (20)$$

$$\Delta P_{MB} = -0,164 \cdot g_{m\_OG}^2 + 34,99 \cdot g_{m\_OG} - 1195,8; R^2 = 0,99456; \quad (21)$$

$$\Delta t_{ФТЧ} = -0,2195 \cdot g_{m\_OG}^2 + 6,722 \cdot g_{m\_OG} + 37,2; R^2 = 0,99930; \quad (22)$$

Как видно из рис. 3, экспериментально полученная расходная характеристика ДМЦ ФЭ при  $t_{OG} \neq \text{const}$  не имеет ни одной общей точки с расходной характеристикой ПММ ФЭ при  $t_{OG} = \text{const}$ . При разработке БИУ, методики и экспериментальных образцов для нее варьирование температурой ТС конструкцией БИУ не предусматривалось. Кроме того, экспериментальные исследования на БИУ носили сравнительный характер и проводились с целью выбора рациональных конструкций модуля ФЭ, на основе которых должны быть построены действующие макеты ФЭ для исследования их характеристик работы в условиях выпускной системы дизеля на МИС. Таким образом, с приемлемой точностью определить, для какого именно постоянного значения температуры ОГ в МИС получены на БИУ расходные характеристики для вариантов конструкции ПММ ФЭ, соответствующих ДМ и ДМЦ ФЭ, затруднительно (приближенные расчеты давали результат около 650 °С).

Для приведения в соответствие результатов исследований на БИУ и

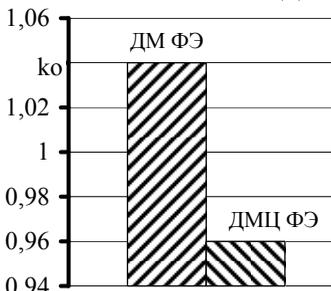
МИС (их связи с учетом принятого допущения) в формуле (1) вводится специальный коэффициент – настроечный  $k_0$ , равный отношению ГС действующего макета ФЭ на режиме с глобальным максимумом  $t_{OG}$  (режим с  $M_{кр\max}$ ) к ГС ПММ ФЭ с соответствующей плотности насыпкой из ПЦ, при том же значении  $g_{mOG}$ . То есть, его значение определяется следующей формулой

$$k_0 = \Delta P_{\Phi TЧt=const} (g_{m\_OG}) \Big|_{t_{OG}(M_{кр\max})} / \Delta P_{ПММ} (g_{m\_OG}) \Big|_{t_{OG}(M_{кр\max})}. \quad (23)$$

Он равен для ДМ ФЭ 1,04, а для ДМЦ ФЭ 0,96 (см. рис. 4). То есть, условия течения ТС, создаваемые в полостях БИУ, моделируют условия, наблюдающиеся в выпускном тракте дизеля 2Ч10,5/12 на режиме с  $M_{кр\max}$  с точностью до  $\pm 4\%$ . Разница в значении  $k_0$  для ДМ и ДМЦ ФЭ объясняется принципиальными различиями в их конструкции, а именно наличием насыпки из ПЦ, которая обеспечивает более равномерное течение потока ОГ в полости сетчатой кассеты модуля.

Таким образом (то есть, путем умножения всех коэффициентов при  $g_{mOG}$  на  $k_0$ ) может быть получена кривая, прогнозирующая зависимость ГС действующего макета ФЭ по в.с.х. при одинаковой для всех режимов  $t_{OG}$ , равной максимальному значению  $t_{OG}$  во всем диапазоне рабочих режимов дизеля 2Ч10,5/12 – расходная характеристика ДМ или ДМЦ ФЭ при  $t_{OG} = \text{const}$ .

Следующие этапы моторных испытаний проводились для действующего макета ФЭ с насыпкой – ДМЦ. В ходе этих этапов выявлены зависимости



рабочих характеристик ДМЦ от режимных и конструктивных параметров дизеля Д21А1, варьирование которыми не предусмотрено конструкцией БИУ [10, 12, 13]. Влияние этих параметров на гидравлическое сопротивление экспериментальных образцов в предложенной математической модели учитывается введением температурного  $k_t$ , компоновочного  $k_L$  и временного  $k_\tau$  коэффициентов в формуле (1). Определению физического смысла и значений этих коэффициентов посвящены следующие части данного исследования.

**Выводы.** Таким образом, разработана математическая модель связи между ГС модуля ФТЧ, исследуемым на безмоторной установке, и полноразмерного ФТЧ в реальных условиях эксплуатации. Она базируется на расходной характеристике модуля ФЭ при постоянной температуре ТС и использует набор коэффициентов, позволяющих учесть влияние ряда эксплуатационных факторов на ГС.

Приведен и обоснован физический смысл настроечного коэффициента,

позволяющего связать результаты исследований на безмоторной установке и моторном стенде и учесть тип конструктивного исполнения модуля фильтрующего элемента; экспериментально определены его значения для разных конструкций модуля ФЭ.

**Список литературы:** 1. *Величко В.* Україна відклала перехід на нові екологічні норми автомобільних вихлопів [Електронний ресурс] / *В. Величко* // Запорізька правда. – 27.10.2011. – Режим доступу: [http://www.zp-pravda.info/index.php?option=com\\_content&view=article&id=4068:2011-10-30-19-30-10&catid=34:2009-04-14-10-24-35&Itemid=63](http://www.zp-pravda.info/index.php?option=com_content&view=article&id=4068:2011-10-30-19-30-10&catid=34:2009-04-14-10-24-35&Itemid=63). 2. Regulation № 49. Revision 5. Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) and natural gas (NG) engines as well as positive-ignition (P.I.) engines fuelled with liquefied petroleum gas (LPG) and vehicles equipped with C.I. and NG engines and P.I. engines fuelled with LPG, with regard to the emissions of pollutants by the engine. – United Nations Economic and Social Council Economics Commission for Europe Inland Transport Committee Working Party on the Construction of Vehicles. – E/ECE/TRANS/505. – 4 May 2011 – 194 p. 3. Regulation № 96. Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) engines to be installed in agricultural and forestry tractors with the regard to the emissions of pollutants by the engine. Geneva, 1995. – 109 p. 4. *Полювянчук А.П.* Исследование степени токсичности вредных веществ, выбросы которых нормируются европейскими экологическими стандартами / *А.П. Полювянчук, Е.Ю. Щенак, Е.Ю. Тутова* // Вестник Национального технического университета "ХПИ". – 2007. – № 2. – С. 112 – 115. 5. *Парсаданов І.В.* Підвищення якості і конкурентоспроможності дизелів на основі комплексного паливно-екологічного критерію: Монографія / *Парсаданов І.В.* – Харків: Видавничий центр НТУ «ХП», 2003. – 244 с. 6. *Марков В.А.* Токсичность отработавших газов дизелей. 2-е изд. перераб. и доп. / *Марков В.А., Баширов Р.М., Гамбитов И.И.* – М.: Изд-во МГТУ им. М.Э. Баумана, 2002. – 376 с. 7. *Канילו П.М.* Автотранспорт. Топливо-экологические проблемы и перспективы: монография / *П.М. Канילו* – Харьков: изд-во ХНАДУ, 2013. – 270 с. 8. Двигуни внутрішнього згоряння: серія підручників у 6 томах. Т.5. Екологізація ДВЗ / *А.П. Марченко, І.В. Парсаданов, Л.Л. Товажнянський, А.Ф. Шеховцов*; за ред. *А.П. Марченко* та *А.Ф. Шеховцова*. – Харків: Прапор, 2004. – 360 с. 9. *Строков А.П.* Современные методы очистки отработавших газов дизелей от твердых частиц / *А.П. Строков, А.Н. Кондратенко* // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2010. – № 2. – С. 99 – 104. 10. *Кондратенко О.М.* Зниження виходу твердих частинок транспортних дизелів, що перебувають в експлуатації: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки» / *О.М. Кондратенко*. – Харків, 2013. – 20 с. 11. *Кондратенко А.Н.* Применение природного цеолита для повышения экологических характеристик транспортных дизелей, находящихся в эксплуатации / *А.Н. Кондратенко, А.П. Строков* // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: межвуз. сб. ст. Вып. XII. – Белгород: БелГТУ им. В.Г. Шухова, 2013. – С. 210 – 215. 12. *Строков А.П.* Экспериментальное определение гидравлического сопротивления макета модуля фильтра твердых частиц быстроходного дизеля. Часть 2 / *А.П. Строков, А.Н. Кондратенко* // Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Збірник наукових праць. Тематичний збірник: Транспортне машинобудування. Харків: НТУ "ХПИ". – 2012. – №19. – С. 121 – 128. 13. *Строков А.П.* Экспериментальное определение гидравлического сопротивления макета модуля фильтра твердых частиц быстроходного дизеля / *А.П. Строков, А.Н. Кондратенко* // Автомобільний транспорт: збірник наукових праць. – 2011. Вып. 29. – С. 144 – 147. 14. *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* // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2012. – № 1. – С. 82 – 88. 15. *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* // Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Збірник наукових праць. Тематичний збірник: Автомобіле- і тракторобудування. – Харків: НТУ «ХП». – 2012. – № 60 (966). – С 83 – 89. 16. *Кондратенко О.М.* Моделювання тепло- і масообмінних процесів у фільтрі твердих частинок дизеля.

Частина 4: розрахункове дослідження робочих характеристик фільтра / *О.М. Кондратенко, О.П. Строчков* // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 5 (979). – С. 100 – 109. **17. Кондратенко А.Н.** 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. Строчков* // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – 2013. – № 37 (1010). – С. 68 – 75. **18. 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* // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2013. – № 1. – С. 88–92. **19. Кондратенко А.Н.** Экспериментальное исследование действующего макета фильтрующего элемента фильтра твердых частиц дизеля с насыпкой из природного цеолита. Часть 2 / *А.Н. Кондратенко, А.П. Строчков, С.П. Хожжаинов* // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2013. – № 2. – С. 92–97. **20.** Дизели с воздушным охлаждением Владимирского тракторного завода / *В.В. Эфрос* [и др.]. – М.: Машиностроение, 1976. – 277 с. **21. Эберт К.** Компьютеры. Применение в химии: Пер. с нем. / *К. Эберт, Х. Эдерер*. – М.: Мир, 1988. – 416 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Velychko, V., *Ukrai'na vidklala perehid na novi ekologichni normy avtomobil'nyh vyhlopiv*. Zaporizka Pravda, 27 November 2011. Web. 01 April 2014 <[http://www.zp-pravda.nfoindex.php?option\\_com\\_content&view\\_article&id\\_4068:2011-10-30-19-30-10&catid\\_34:2009-04-14-10-24-35&Itemid\\_63](http://www.zp-pravda.nfoindex.php?option_com_content&view_article&id_4068:2011-10-30-19-30-10&catid_34:2009-04-14-10-24-35&Itemid_63)> 2. Regulation No. 49. Revision No. 5. *Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) and natural gas (NG) engines as well as positive-ignition (P.I.) engines fuelled with liquefied petroleum gas (LPG) and vehicles equipped with C.I. and NG engines and P.I. engines fuelled with LPG, with regard to the emissions of pollutants by the engine*. United Nations Economic and Social Council Economics Commission for Europe Inland Transport Committee Working Party on the Construction of Vehicles: E.ECE.TRANS.505. 2011. Print. **3.** Regulation No. 96. *Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) engines to be installed in agricultural and forestry tractors with the regard to the emissions of pollutants by the engine*. Geneva, 1995. Print. **4.** Polivjanchuk, A. P., E. Ju. Shhepak and E.Ju. Titova. "Issledovanie stepeni toksichnosti vrednyh veshchestv, vybrosy kotoryh normirujutsja evropejskimi ekologicheskimi standartami." *Vestnik Nacional'nogo tehniceskogo universiteta «KhPI»*. No. 2. 2007. 112–115. Print. **5.** Parsadanov, I. V. *Pidvyshennja jakosti i konkurentospromojnosti dyzeliv na osnovi kompleksnogo palyvno-ekologichnogo kryteriju: monografija*. Kharkiv: Vydavnychyj centr NTU «KhPI», 2003. Print. **6.** Markov, V. A., R. M. Bashirov and I. I. Gambitov. *Toksichnost' otrabotavshih gazov dizelej*. 2nd ed. *izd. pererab. i dop.* Moscow: Izd-vo MGTU im. M.Je. Baumana, 2002. Print. **7.** Kanylo, P.M. *Avto-transport. Toplyvno-ekologicheske problemy i perspektivy: monografija*. Khar'kov: izd-vo KhNADU, 2013. Print. **8.** Marchenko, A. P., et al. *Dvyguny vnutrishn'ogo zgorjannja: serija pidruchnykiv u 6 tomah. Vol. 5. Ekologizacija DVZ*. Ed. A. P. Marchenko, and A. F. Shehovcova. Harkiv: Prapor, 2004. Print. **9.** Strovok, A. P., and A.N. Kondratenko. "Sovremennye metody ochystky otrabotavshyh gazov dyzelej ot tverdyh chastyc." *Dvyguny vnutrishn'ogo zgorjannja*. No. 2. 2010. 99–104. Print. **10.** Kondratenko, O. M. *Znyzhennja vykydu tverdyh chastynok transportnyh dyzeliv, scho perebuvajut v ekspluatatsii: Avtoref. dys. na zdobuttja nauk. stupenja kand. tehn. nauk*. Kharkiv, 2013. Print. **11.** Kondratenko, A. N., and A. P. Strovok. "Primenenie prirodnoho ceolyta dlja povyshennja ekologicheskikh harakterystyk transportnyh dyzelej, nahodjaschyhsja v ekspluatatsii." *Energoberegajuschije tehnologicheskie komplekxy i oborudovanie dlja proizvodstva stroytel'nyh materialov: mezhvuz. sb. st.* Vol. 12. Belgorod: BelGTU im. V.G. Shuhova, 2013. 210–215. Print. **12.** Strovok, A. P., and A. N. Kondratenko. "Eksperimental'noe opredelenie gidravlicheskogo soprotivlenija maketa modulja fil'tra tverdyh chastic bystrohodnogo dyzelja. Chast' 2." *Visnyk Nacional'nogo tehnicznogo universytetu «KhPI»*. *Zbirnyk naukovyh prac'*. *Tematycznyj zbirnyk: Transportne mashynobuduvannja*. Kharkiv: NTU «KhPI». No. 19. 2012. 121–128. Print. **13.** Strovok, A. P., and A. N. Kondratenko. "Eksperimental'noe opredelenie gidravlicheskogo soprotivlenija maketa modulja fil'tra tverdyh chastic bystrohodnogo dyzelja." *Avtomobil'nyj transport: zbirnyk naukovyh prac'*. No. 29. 2011. 144–147. Print. **14.** Kondratenko, A. N., A. P. Strovok

and A.N. Avramenko. "Modelirovanie teplo- i massoobmennyh processov v fil'tre tverdyh chastic dizelja. Chast' 1: modernizacija konstrukcii fil'tra i dopolnenie bazy dannyh po svoystvam poristogo tela." *Dviguny vnutrishn'ogo zgorjannja*. No. 1. 2012. 82–88. Print. **15**. Kondratenko, A. N. "Modelirovanie teplo- i massoobmennyh processov v fil'tre tverdyh chastic dizelja. Chast' 3: voprosy ispol'zovanija ceolita v konstrukcii fil'trjushego elementa." *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universitetu «KhPI»*. *Zbirnik naukovykh prac'. Tematychnij zbirnyk: Avtomobile- i traktorobuduvannja*. No. 60 (966). Kharkiv: NTU «KhPI», 2012. 83–89. Print. **16**. Kondratenko, O. M., and O. P. Strokov. "Modeljuvannja teplo- i masoobminnyh procesiv u fil'tri tverdyh chastynok dizelja. Chastyna 4: rozrahunkove doslidzhennja robochych harakterystyk fil'tra." *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universitetu «KhPI»*. *Ser.: Matematyčne modeljuvannja v tehnič ta tehnologijah*. No. 5 (979). Kharkiv: NTU «KhPI», 2013. 100–109. Print. **17**. Kondratenko, A. N., A. P. Strokov. "Modelirovanie teplo- i massoobmennyh processov v fil'tre tverdyh chastic dizelja. Chast' 5: raschetnoe issledovanie gidravličeskogo soprotivlenija fil'tra s ceolitovoj nasypkoj." *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universitetu «KhPI»*. *Zbirnyk naukovykh prac'. Ser.: Matematyčne modeljuvannja v tehnič ta tehnologijah*. No. 37 (1010). 2013. 68–75. Print. **18**. Kondratenko, A. N., A.P. Strokov and N. M. Karasichenko. "Eksperimental'noe issledovanie dejstvujushhego maketa fil'trjushego elementa fil'tra tverdyh chastic dizelja s nasypkoj iz prirodnogo ceolita. Chast' 1." *Dviguny vnutrishn'ogo zgorjannja*. No. 1. 2013. 88–92. Print. **19**. Kondratenko, A. N., A. P. Strokov and S. P. Hozhainov. "Eksperimental'noe issledovanie dejstvujushhego maketa fil'trjushego elementa fil'tra tverdyh chastic dizelja s nasypkoj iz prirodnogo ceolita. Chast' 2." *Dviguny vnutrishn'ogo zgorjannja*. No. 2. 2013. 92–97. Print. **20**. Jefros, V. V., et al. *Dizeli s vozdušnym ohlazhdeniem Vladimirskogo traktornogo zavoda*. Moscow: Mashinostroenie, 1976. Print. **21**. Jebert, K., and H. Jederer. *Komp'jutery. Primenenie v himii: Per. s nem*. Moscow: Mir, 1988. Print.

*Поступила (received) 08.04.2014*

УДК 621.43.068.4

**А.Н. КОНДРАТЕНКО**, канд. техн. наук, вед. инж., ИПМаш НАНУ,  
Харьков

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ФИЛЬТРА ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ДИЗЕЛЯ. ЧАСТЬ 2: ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ**

Описана математическая модель гидравлического сопротивления фильтра твердых частиц (ФТЧ) дизеля в реальных условиях эксплуатации. Модель построена на основе расходной характеристики одного модуля ФТЧ, экспериментально полученной при постоянной температуре текущей среды, и данных стендовых испытаний автотракторного дизеля 2Ч10,5/12, оснащенного полно-размерным ФТЧ. Модель позволяет учесть ряд факторов, характеризующих условия эксплуатации ФТЧ в составе выпускной системы этого дизеля. Учет этих факторов производится путем введения соответствующих коэффициентов. В данной части работы описан физический смысл и оценены значения температурного коэффициента модели, позволяющего учесть изменение температуры отработавших газов на входе в корпус фильтра как функцию среднего эффективного давления дизеля.

**Ключевые слова:** дизель, фильтр твердых частиц, гидравлическое сопротивление, математическая модель.

---

© А. Н. Кондратенко, 2014