

identify impact force of beam structure (in Chinese)." *Proceedings of 14th national Conference of the Chinese Society of Mechanical Engineers*. Taoguan, Taiwan. 1997. 347–354. Print. 7. Choi, K., and F. K. Chang. "Identification of impact force and location using distributed sensors." *AIJA Journal*. No. 34. 1996. 136–142. Print.

Поступила (received) 27.02.2015

УДК 621.43.068.4

А.Н. КОНДРАТЕНКО, канд. техн. наук, ст. преп., НУГЗУ, Харьков

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ФИЛЬТРА ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ДИЗЕЛЯ. ЧАСТЬ 3: КОМПОНОВОЧНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ

Приведена и описана математическая модель гидравлического сопротивления 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 2Ч10,5/12, 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 компоновочного коэффициента модели, позволяющего учесть размещение ФТЧ по длине выпускного тракта дизеля, влияющего на максимальную температуру отработавших газов на входе в ФТЧ.

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

Введение. С 1 января 2011 г. на территории Украины введены в действие нормы токсичности стандартов Правил ЕЭК ООН №№ 49 и 96 уровня EURO III [1, 2]. В связи с этим научно-исследовательские работы, направленные на создание принципиально новых и совершенствование известных конструкций *фильтров твердых частиц* (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 *фильтрующий элемент* (ФЭ) для ФТЧ новой конструкции, описанный в первой части исследования [3].

Выполнено физическое моделирование процесса движения *текучей среды* (ТС) в различных вариантах конструкции модуля разработанного ФТЧ на *безмоторной исследовательской установке* (БИУ). Экспериментальный образец – *прозрачный макет модуля* (ПММ) ФЭ, его особенности проведения моделирования описаны в Части 1 данного исследования [3]. В результате получены расходные характеристики ПММ ФЭ при неизменной температуре ТС t_{TC} – *изотермы зависимостей гидравлического сопротивления* (ГС) модуля ФЭ от потока ТС (для БИУ – воздуха) g_m в кг/(с·м²).

© А. Н. Кондратенко, 2015

Для выявления особенностей функционирования разработанного ФТЧ в условиях выпускной системы дизеля (в реальных условиях эксплуатации) проведено экспериментальное исследование *действующих макетных образцов* ФЭ – ДМ (без насыпки из *природного цеолита* (ПЦ) в сетчатых кассетах) и ДМЦ (с насыпкой из ПЦ) ФЭ – на *моторном испытательном стенде* (МИС) лаборатории отдела ПЭУ ИПМаш НАНУ, оснащенный автотракторным дизелем 2Ч10,5/12 (Д21А1) [3 – 5]. Описание особенностей размещения на МИС и устройства экспериментальных образцов, методики испытаний и средств измерительной техники, а также подходов к анализу полученных данных приведены в Части 1 данного исследования [3].

Согласно разработанной программе, моторные испытания состояли из 4 этапов, каждый из которых проведен с целью определения физического смысла и значений соответствующих коэффициентов в формуле (1). В первой части исследования – сравнительной для ДМ и ДМЦ ФЭ и описывающей результаты анализа первого этапа моторных исследований – описан физический смысл и значения настроечного коэффициента k_0 . Он позволяет связать результаты исследований на БИУ и МИС, а также учесть тип конструкции модуля ФЭ [3]. Во второй части исследования на основе анализа данных, полученных в ходе первого (снятие *внешней скоростной характеристики* (в.с.х.) дизеля 2Ч10,5/12 с ДМЦ ФЭ, размещенном на расстоянии $L_{вып} = 0$ м от выпускного коллектора дизеля по длине выпускного тракта МИС) и третьего этапов моторных исследований (реализация адаптированной стандартизированной методики стационарных 13-ти и 8-ми режимных циклов [1, 2, 5] при рациональном значении $L_{вып} = 5,0$ м), описан физический смысл и значения температурного коэффициента k_t . Он позволяет учесть влияние температуры *отработавших газов* (ОГ) дизеля на входе в ФТЧ $t_{ФТЧ_{ex}}$ на его ГС $\Delta P_{ФТЧ}$, определяемой значением крутящего момента дизеля $M_{кр}$ (или среднего эффективного давления P_e) дизеля [3, 4, 6].

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

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_{ex} ;
3. рабочего объема цилиндров дизеля – соответствующего ему количества модулей в полноразмерном ФЭ z_m (для ДМЦ ФЭ $z_m = 20$ шт.);
4. режима работы дизеля 2Ч10,5/12 – частоты вращения *коленчатого вала* (к.в.) дизеля $n_{кв}$ (а фактически – потока ОГ $g_{m,OG}$) и $M_{кр}$ или P_e (а фактически – $t_{ФТЧ_{ex}}$) на стационарном режиме его работы;

5. места установки ФТЧ по длине выпускного тракта дизеля – значения $L_{вып}$ (а фактически – максимальной $t_{ФТЧех}$ (или $t_{ФТЧехmax}$));

6. динамики засорения ФЭ – времени работы дизеля 2Ч10,5/12 на стационарном режиме с $M_{крmax}$, τ_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 [3, 4].

В данной части исследования отражены подходы к решению пятой задачи.

Математическая модель гидравлического сопротивления ФТЧ дизеля в реальных условиях эксплуатации. Ее особенности описаны в [3]. Модель имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta P_{ФТЧ} &= \Delta P_{ПММ}(g_{m_OГi}; S_{ex}; z_m) \cdot k_0 \cdot k_t(t_{ФТЧехi}) \cdot k_L(t_{ФТЧехmax}) \cdot k_\tau(\tau_M; N_{ei}; WF_i) = \\ &= \Delta P_{ПММ}(n_{квi}; S_{ex}; z_m) \cdot k_0 \cdot k_t(M_{кри}) \cdot k_L(L_{вып}) \cdot k_\tau(\tau_M; N_{ei}; WF_i), \text{ Па} \end{aligned}$$

где индекс i соответствует текущему режиму работы дизеля; k_0 , k_t , k_L , k_τ – настроечный, температурный, компоновочный и временной коэффициенты.

В данной части исследования представлены подходы и результаты экспериментального определения компоновочного коэффициента k_L .

Определение компоновочного коэффициента. Второй этап моторных испытаний на МИС дизеля 2Ч10,5/12, оснащенного экспериментальным действующим образцом разработанного ФТЧ с насыпкой из ПЦ в сетчатых каскадах (то есть ДМЦ ФЭ), проводился с целью выявления влияния температуры ТЧ (для МИС – ОГ) на рабочие характеристики ФТЧ вообще, и в первую очередь, эффективности очистки им ОГ от ТЧ [5, 6].

Этот показатель работы ФТЧ характеризуется коэффициентом эффективности очистки $K_{ЭО}(G_{ТЧ})$, который равен отношению разности массового выброса ТЧ дизеля без ФТЧ $G_{ТЧ.ДВС}$ и с ФТЧ $G_{ТЧ.ФТЧ}$ к $G_{ТЧ.ДВС}$ и выражается в процентах или долях единицы. При этом сами величины $G_{ТЧ}$ получены не прямыми измерениями (например, гравиметрическим методом), а путем применения достоверной эмпирической формулы пересчета д-ра техн. наук, проф. *И.В. Парсаданова* [7]. В формуле учитываются данные прямых и косвенных измерений таких характеристик работы дизеля, как часовые массовые расходы топлива G_T и воздуха G_B (в кг/ч), а также таких характеристик дымности и токсичности ОГ, как коэффициент ослабления светового потока N_D (в %) и объемная концентрация CH_X в ОГ C_{CH} (в млн⁻¹).

Такого эффекта – повышения $K_{ЭО}(G_{ТЧ})$ при снижении $t_{ОГ}$ – следовало ожидать, в основном, по следующим причинам. Во-первых, место установки МВ в составе выпускной системы МИС с $L_{вып} = 0$ м характеризуется большими значениями температуры (605 °С) и скорости потока ОГ, проходящего сквозь ДМЦ ФЭ. Процессы, определяющие размеры ТЧ – конденсации несгоревших углеводородов топлива и масла на частицах сажи (аморфного

пористого углерода) и коагуляции самих ТЧ, находящиеся в логарифмической зависимости от температуры ОГ, в таких условиях далеко от своего завершения. В выпускном коллекторе дизеля ТЧ имеют размеры около 5 нм (при $t_{OG} = 600$ °С), в сечении выпускного тракта на входе в глушитель шума ОГ ($t_{OG} = 350...400$ °С) – около 0,1 мкм, а в сечении на выходе из выпускного тракта ($t_{OG} = 200$ °С и ниже) – превышают 3 – 5 мкм [6, 8]. Таким образом, в функции температуры ОГ происходит рост размеров ТЧ и изменение их состава (счетного, химического и по размерам), структуры и формы. Во-вторых, в эксперименте использовался действующий макет с $z_m = 20$ шт., в то время как для дизеля 2Ч10,5/12 было определено рациональное $z_m = 30...50$ шт. (по соображениям обеспечения рациональных ГС и сажеемкости ФЭ), что обеспечивает большую степень расширения потока ОГ при входе его в ФТЧ. Увеличение z_m , а с ним суммарного проходного сечения ФЭ $z_m \cdot S_{ex}$, способствует существенному снижению скорости потока ОГ в ФЭ. В-третьих, немаловажным является состояние насыпки из ПЦ в зависимости от ее температуры, способа и степени ее уплотнения при брикетировании в кассетах [6].

Изменение температуры ОГ на входе в корпус ФТЧ достигалось удлинением части выпускного тракте МИС, находящейся между выпускным коллектором дизеля и *макетодерживающей вставкой* (МВ) с ДМЦ ФЭ в ней, набором гибких жаропрочных газопроводов длиной 1,5, 3 и 3,5 м (длины выбраны из технологических соображений). При этом поток ОГ охлаждался естественным образом, благодаря теплообмену с ОС и расширению в газопроводах. Таким образом, дополнительно организованы три положения МВ, характеризующиеся значениями $L_{вып}$ 1,5, 5,0 и 8,0 м соответственно. Сама МВ располагалась в вертикальном положении. В каждом из этих положений МВ снималась в.с.х. (для положения с $L_{вып} = 0$ м в.с.х. уже имеется, получена в ходе I этапа моторных испытаний и описана в Части I этого исследования).

В ходе экспериментальной проверки эти предположения нашли свое подтверждение – $K_{ЭО}(G_{ТЧ})$ ДМЦ ФЭ повысился от 40,1 % при $L_{вып} = 0$ м до 86,8 % при $L_{вып} = 8,0$ м на режиме с $M_{крmax}$. На этом режиме наблюдается глобальный максимум $G_{ТЧ.ФТЧ}$ и глобальный минимум $G_{ТЧ.ДВС}$ и, соответственно, глобальный максимум $K_{ЭО}(G_{ТЧ})$. Однако рациональным является ограничение длины $L_{вып} = 5,0$ м, поскольку больших значений достичь на практике затруднительно даже на большегрузных *автотранспортных средствах* (АТС). При этом значении $L_{вып}$ $K_{ЭО}(G_{ТЧ})$ достигает 77,4 % [6].

Вместе с повышением эффективности очистки ОГ от ТЧ наблюдается уменьшение ГС экспериментального образца, МВ и других элементов выпускной системы МИС, находящихся за МВ. Это объясняется увеличением плотности ОГ ρ_{OG} , что при постоянстве секундного массового расхода ОГ $G_{m.ОГ}$ приводит к уменьшению секундного объемного расхода ОГ $G_{V.ОГ}$,

что при постоянстве проходного сечения ФЭ $z_m \cdot S_{ex}$ приводит к уменьшению скорости движения потока ОГ V_{OG} сквозь ФЭ, от квадрата которой зависят линейные и местные потери напора потока ОГ.

Уменьшение величины перепада температуры ОГ на МВ $\Delta t_{ФТЧ}$ с увеличением $L_{вып}$, также наблюдаемое в эксперименте и представленное на рис. 1, объясняется снижением интенсификации теплообмена в ФЭ с уменьшением температурного напора (разницы температур ОГ и окружающей средой (ОС)).

Выявленные в ходе предыдущих этапов моторных исследований и описанные в Части 1 данного исследования соотношения между величинами t_{OG} , $t_{ФТЧвх}$ и $t_{ФТЧвых}$, а также величинами $\Delta P_{ФТЧ}$, $\Delta P_{вып}$ и $\Delta P_{МВ}$ в качественном плане сохраняются для всех постоянных значений $L_{вып}$ (рис. 1 и 2).

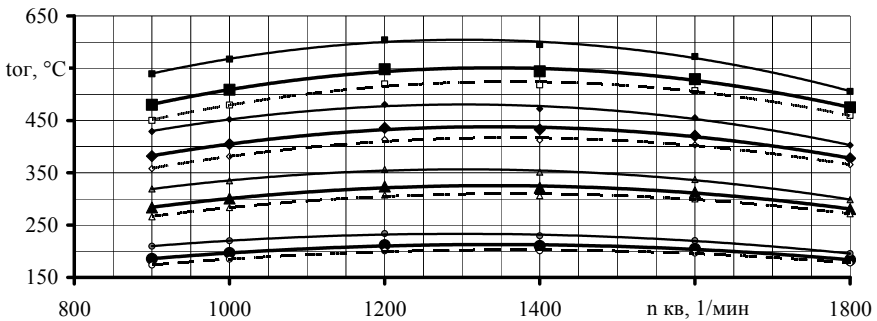


Рис. 1 – Распределение температуры ОГ по режимам в.с.х. для разных мест установки ДМЦ ФЭ: ■, □, ▣ – $t_{ог} = 605$ °C; ◆, ◇, ▤ – 480 °C; ▲, △, ▴ – 355 °C; ●, ○, ◐ – 235 °C;
■, ◆, ▲, ● – $t_{ог}$; □, ◇, △, ○ – $t_{ФТЧвх}$; ▣, ▤, ▴, ◐ – $t_{ФТЧвых}$

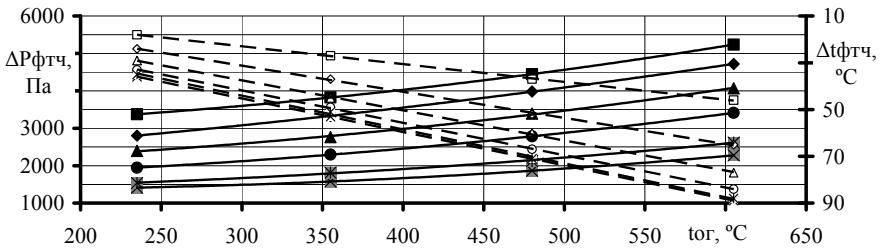


Рис. 2 – Зависимости ГС ФТЧ и перепада температуры ОГ на ФТЧ от максимальной температуры ОГ на входе в ФТЧ по в.с.х.:

■, ◆, ▲, ●, ✕, ✕ – $\Delta P_{ФТЧ}$; □, ◇, △, ○, *, × – $\Delta t_{ФТЧ}$; ■, □ – $n_{ка} = 1800$ мин⁻¹; ◆, ◇ – 1600 мин⁻¹; ▲, △ – 1400 мин⁻¹; ●, ○ – 1200 мин⁻¹; ✕, * – 1000 мин⁻¹; ✕, × – 900 мин⁻¹.

Зависимость величины $t_{ФТЧвыхmax}$ (в °C) от $L_{вып}$ (в м) для МИС является нелинейной и описывается формулой следующего вида:

$$t_{ФТЧвыхmax} = 2,176 \cdot L_{вып}^2 - 61,272 \cdot L_{вып} + 591,2; R^2 = 0,98621. \quad (1)$$

ГС ДМЦ ФЭ, как видно на рис. 2, изменяется как в функции $L_{вып}$ (а зна-

чит и в функции $t_{\Phi TЧex\max}$), так и в функции $n_{кв}$ (а значит и в функции $g_{m,OG}$) нелинейно (полиномы 2-й степени, получены методом линейной регрессии [9]). Тоже касается и величин $\Delta P_{вып}$ и ΔP_{MB} . Характер зависимостей подобен зависимости, полученной в ходе предыдущего этапа исследований при $L_{вып} = 0$ м. Поэтому, для описания этих зависимостей пригоден предложенный ранее способ [3], но с дополнением, которое учитывает влияние величины $L_{вып}$ на максимальное значение $t_{\Phi TЧex}$ по в.с.х., наблюдаемое для всех $L_{вып}$ (то есть всех мест установки МВ) на режиме с $M_{кр\max}$ (рис. 3).

Такой учет предлагается проводить путем введения в математическую модель ГС ФТЧ соответствующего коэффициента – компоновочного k_L , равного соотношению ГС ДМЦ ФЭ на режиме с $M_{кр\max}$ при текущем значении $L_{вып}$ и при $L_{вып} = 0$ м.

При анализе экспериментальных данных, полученных в ходе данного этапа исследований на МИС, значения компоновочного коэффициента k_L для различных мест установки МВ приняли следующие значения:

- при $L_{вып} = 8,0$ м ($t_{\Phi TЧex\max} = t_{\Phi TЧex}(M_{кр\max}) = 235$ °С) $k_L = 0,571$;
- при $L_{вып} = 5,0$ м ($t_{\Phi TЧex\max} = t_{\Phi TЧex}(M_{кр\max}) = 355$ °С) $k_L = 0,673$;
- при $L_{вып} = 1,5$ м ($t_{\Phi TЧex\max} = t_{\Phi TЧex}(M_{кр\max}) = 480$ °С) $k_L = 0,816$;
- при $L_{вып} = 0,0$ м ($t_{\Phi TЧex\max} = t_{\Phi TЧex}(M_{кр\max}) = 605$ °С) $k_L = 1,0$.

Последнее обусловлено физическим смыслом данного коэффициента.

Зависимость k_L (в долях единицы) от $L_{вып}$ (в м) и $t_{\Phi TЧex\max}$ (в °С) выражается следующим уравнением:

$$\begin{aligned} k_L &= 1,248 \cdot 10^{-6} \cdot t_{\Phi TЧex\max}^2 + 1,073 \cdot 10^{-6} \cdot t_{\Phi TЧex\max} + 0,478 = \\ &= 2,337 \cdot 10^{-6} \cdot L_{вып}^2 - 6,721 \cdot 10^{-2} \cdot L_{вып} + 0,959; \\ R^2(t_{\Phi TЧex\max}) &= 0,99996; R^2(L_{вып}) = 0,97920. \end{aligned} \quad (2)$$

Предложенный способ описания в данном случае предполагает получение расходных характеристик при $t_{OG} = const$ для каждого значения $L_{вып}$ путем умножения всех коэффициентов при $t_{OG} = const$ при $L_{вып} = 0$ м (полученной, в свою очередь, умножением значений расходной характеристики ПММ ФЭ на настроечный коэффициент k_0), на компоновочный коэффициент k_L . И далее для получения прогнозируемых значений ГС ДМЦ ФЭ при $t_{OG} \neq const$ можно использовать температурный коэффициент k_t .

Для уточнения такой расходной характеристики прогноза предлагается использовать значения прогнозируемого температурного коэффициента $k_{t,прогн}$, равного соотношению ГС ДМЦ ФЭ, определяемых по расходным характеристикам при $t_{OG} = const$ для текущего значения $L_{вып}$ и при $L_{вып} = 0$ м. Такой подход, очевидно, может быть использован для описания экспериментальных данных, поскольку форма расходной характеристики при

$t_{OG} = const$, полученной для ПММ ФЭ на БИУ, отражает сущность физических процессов, происходящих в модуле ФЭ, равно как и форма кривых семейства, полученных при использовании коэффициентов k_0 и k_L .

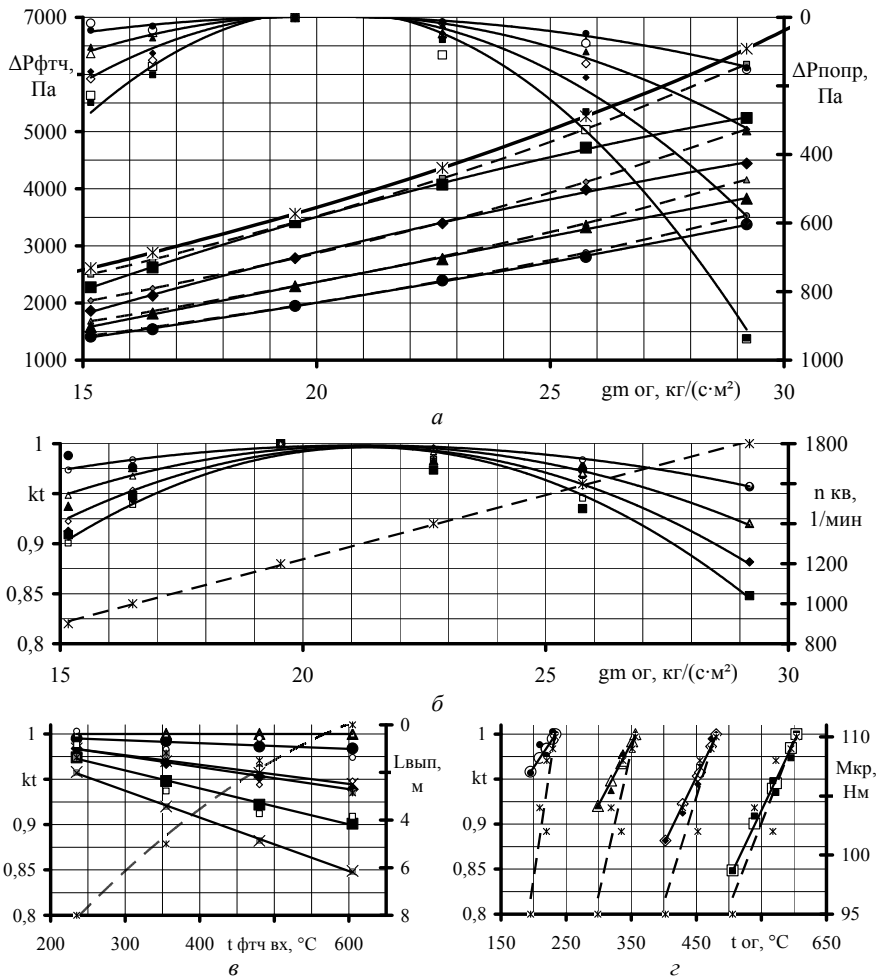


Рис. 3 – Влияние температуры ОГ режимов в.с.х. дизеля 2Ч10,5/12 на ГС ДМЦ ФЭ: Для а: * – ПММ ФЭ 100 % Ц; ■, □, ▣ – $t_{фгч_{\max}} = 605$ °C; ♦, ◇, ◊ – 480 °C; ▲, △, ▴ – 355 °C; ●, ○, ◉ – 235 °C; ■, ◆, ▲, ● – $\Delta P_{фгч_{\max}}$; ▣, ◊, ▣, ◊ – $\Delta P_{фгч_{\max}}$; □, ◇, △, ○ – $\Delta P_{фгч_{\max}}$; для б, в, д: ●, ○ – при $t_{фгч_{\max}} = 235$ °C; ▲, △ – 355 °C; ◆, ◇ – 480 °C; ■, □ – 605 °C; ●, ▲, ◆, ■ – экспериментальные данные; ○, △, ◇, □ – спрогнозированные данные; для г: ■, □ – при $n_{кв} = 900$ мин⁻¹; ◆, ◇ – 1000 мин⁻¹; ▲, △ – 1200 мин⁻¹; ●, ○ – 1400 мин⁻¹; * , * – 1600 мин⁻¹; ×, × – 1800 мин⁻¹; ●, ▲, ◆, ■, * , × – экспериментальные данные; ○, △, ◇, □, * , × – спрогнозированные данные

Согласно этому подходу, при определении $k_{t,прогн}$ выявлено, что значе-

ния этого коэффициента зависят не только от $t_{\Phi TЧex}$, но и от $n_{кв}$, а значит и $g_{m.ОГ}$. Эта уточненная зависимость для $L_{вып} = const$ и $t_{ТС} = const$ (то есть для зависимостей, полученных для постоянной температуры ТС и пригодных, в связи с этим, для сравнения с расходной характеристикой ПММ ФЭ, полученной на БИУ) имеет вид:

$$k_{t.прогн} = \frac{\Delta P_{\Phi TЧ|t_{ТС}}(n_{кв}|_{\Phi TЧex})}{\Delta P_{\Phi TЧ|t_{ТС}}(n_{кв}|_{\Phi TЧex\ max})} = 1 - \frac{\Delta P_{нопр}}{\Delta P_{\Phi TЧ|t_{ТС}}(n_{кв}|_{\Phi TЧex\ max})} =$$

$$= (\Delta P_{\Phi TЧ|t=const}(L_{вып} = 0) - \Delta P_{нопр}) / \Delta P_{\Phi TЧ|t=const}(L_{вып} = 0) =$$

$$= 1 - \Delta P_{нопр} / \Delta P_{\Phi TЧпрогн}; \quad (3)$$

$$\Delta P_{нопр.прогн} = \Delta P_{\Phi TЧпрогн}(t_{\Phi TЧex\ max}) - \Delta P_{\Phi TЧпрогн}(t_{\Phi TЧex}) =$$

$$= \Delta P_{\Phi TЧпрогн}(t_{\Phi TЧex\ max}) \cdot (1 - k_{t.прогн}) =$$

$$= (5,599 \cdot 10^{-6} \cdot n_{кв} - 1,773 \cdot 10^{-3}) \cdot (t_{\Phi TЧex\ max}^2 - t_{\Phi TЧex}^2) \Big|_{n_{кв}=const} +$$

$$+ (2,048 \cdot 10^{-4} \cdot n_{кв} - 7,288 \cdot 10^{-2}) \cdot (t_{\Phi TЧex\ max} - t_{\Phi TЧex}) \Big|_{n_{кв}=const}; \quad (4)$$

$$\Delta P_{нопр.эксн} = \Delta P_{\Phi TЧпрогн} - \Delta P_{\Phi TЧэксн} = \Delta P_{\Phi TЧпрогн} \cdot (1 - k_{t.эксн}); \quad (5)$$

$$k_{t.эксн} = (1,119 \cdot 10^{-9} \cdot n_{кв}^2 + 2,903 \cdot 10^{-6} \cdot n_{кв} - 1,882 \cdot 10^{-3}) \cdot t_{\Phi TЧex} + 1,0. \quad (5)$$

$$k_{t.прогн} = \Delta P_{\Phi TЧпрогн}(t_{\Phi TЧex}) / \Delta P_{\Phi TЧпрогн}(t_{\Phi TЧex\ max}); \quad (6)$$

$$\Delta P_{\Phi TЧпрогн}(L_{вып} = 0) = k_L(t_{\Phi TЧex\ max} = const) \cdot k_0 \cdot \Delta P_{ПММ100\%Ц}(g_{m.ОГ}); \quad (7)$$

$$\Delta P_{\Phi TЧпрогн}(L_{вып} \neq 0) = k_L(t_{\Phi TЧex\ max} =$$

$$= const) \cdot k_0 \cdot \Delta P_{ПММ100\%Ц}(g_{m.ОГ}) \cdot k_t(t_{\Phi TЧex}). \quad (8)$$

где $\Delta P_{нопр}$ – поправка значения ГС, Па.

По экспериментальным данным, полученным на этом этапе моторных исследований, рассчитаны экспериментальные значения $\Delta P_{нопр.эксн}$ и $k_{t.эксн}$ по формулам (3) и (4), вместе с прогнозными описаны методом линейной регрессии [9] и представлены на рис. 3. Отклонения экспериментальных значений $\Delta P_{нопр.эксн}$ от прогнозных $\Delta P_{нопр.прогн}$ находятся в диапазоне 19 – 37 % и уменьшаются с ростом $t_{\Phi TЧex\ max}$, что объясняется особенностями распределения погрешности измерения $t_{\Phi TЧex}$ термопарами ТХА и прибором А566 в их рабочем диапазоне измерения. Для величины k_t отклонение практически не изменяется и составляет около 0,65 %.

Как следует из приведенных данных, а также это видно на рис. 3, предложенный подход пригоден для описания результатов моторных исследований, а предположения, положенные в его основу, нашли свое подтверждение.

Тогда далее между величинами $\Delta P_{нопр}$ и k_t , обозначаемыми индексами *эксн.* и *прогн.*, различий в описании результатов экспериментов и математической модели ГС ФТЧ делаться не будет, сами индексы будут опускаться и под соответствующими величинами будут пониматься полученные с приме-

нением предложенного способа, то есть прогнозные. Для $L_{вын} = 0$ м они описываются формулами (9) – (13), для $L_{вын} = 1,5$ м – (14) – (18), для $L_{вын} = 5,0$ м – (19) – (23) и для $L_{вын} = 8,0$ м – (24) – (28). Зависимости от $t_{ФТЧех}$ величин $\Delta P_{ФТЧ}$, $\Delta t_{ФТЧ}$ и k_t при постоянной $n_{кв}$ описываются формулами (29) – (31) для $n_{кв} = 900$ мин⁻¹, (32) – (34) для $n_{кв} = 1200$ мин⁻¹, (35) – (37) для $n_{кв} = 1800$ мин⁻¹. Упомянутые зависимости имеют вид:

$$\Delta P_{ФТЧэксн} = 3,511 \cdot 10^{-4} \cdot n_{кв}^2 + 2,341 \cdot n_{кв} - 4,766 \cdot g_{m.ОГ}^2 + 423,72 \cdot g_{m.ОГ} - 3061,2; \\ R^2(g_{m.ОГ}) = 0,99971; R^2(n_{кв}) = 0,99157; \quad (9)$$

$$\Delta P_{ФТЧпрогн} = 0,117 \cdot g_{m.ОГ}^3 - 1,868 \cdot g_{m.ОГ}^2 + 166,77 \cdot g_{m.ОГ}; R^2 = 0,99998; \quad (10)$$

$$\Delta t_{ФТЧ} = -5,793 \cdot 10^{-5} \cdot n_{кв}^2 + 0,110 \cdot n_{кв} + 36,4; R^2 = 0,99804; \quad (11)$$

$$\Delta P_{нонр} = 11,654 \cdot g_{m.ОГ}^2 - 471,92 \cdot g_{m.ОГ} + 4755,1; R^2 = 0,98970; \quad (12)$$

$$k_t = -6,024 \cdot 10^{-7} \cdot n_{кв}^2 + 1,568 \cdot 10^{-3} \cdot n_{кв} - 2,319 \cdot 10^{-2} = \\ = -2,431 \cdot 10^{-3} \cdot g_{m.ОГ}^2 + 0,104 \cdot g_{m.ОГ} - 0,109 = 1,519 \cdot 10^{-3} \cdot t_{ОГ} + 7,960 \cdot 10^{-2}; \\ R^2(g_{m.ОГ}) = 0,98613; R^2(n_{кв}) = 0,99080; R^2(t_{ОГ}) = 0,99788; \quad (13)$$

$$\Delta P_{ФТЧэксн} = 4,12 \cdot 10^{-4} \cdot n_{кв}^2 + 1,783 \cdot n_{кв} - 3,274 \cdot g_{m.ОГ}^2 + 331,96 \cdot g_{m.ОГ} - 2438,4 \\ R^2(n_{кв}) = 0,99304; R^2(g_{m.ОГ}) = 0,99937; \quad (14)$$

$$\Delta P_{ФТЧпрогн} = 9,557 \cdot 10^{-2} \cdot g_{m.ОГ}^3 - 1,539 \cdot g_{m.ОГ}^2 + 136,07 \cdot g_{m.ОГ}; R^2 = 0,99998; \quad (15)$$

$$\Delta t_{ФТЧ} = -4,148 \cdot 10^{-5} \cdot n_{кв}^2 + 7,471 \cdot 10^{-2} \cdot n_{кв} + 37,4; R^2 = 0,99714; \quad (16)$$

$$\Delta P_{нонр} = 7,359 \cdot g_{m.ОГ}^2 - 297,69 \cdot g_{m.ОГ} + 2998,0; R^2 = 0,98910; \quad (17)$$

$$k_t = -1,879 \cdot 10^{-3} \cdot g_{m.ОГ}^2 + 8,007 \cdot 10^{-2} \cdot g_{m.ОГ} + 0,143 = \\ = -4,658 \cdot 10^{-7} \cdot n_{кв}^2 + 1,212 \cdot 10^{-3} \cdot n_{кв} + 0,210 = 1,491 \cdot 10^{-3} \cdot t_{ОГ} + 0,281; \\ R^2(n_{кв}) = 0,98882; R^2(g_{m.ОГ}) = 0,98366; R^2(t_{ОГ}) = 0,99791; \quad (18)$$

$$\Delta P_{ФТЧэксн} = 4,0 \cdot 10^{-4} \cdot n_{кв}^2 + 1,419 \cdot n_{кв} = -0,126 \cdot g_{m.ОГ}^2 + 165,99 \cdot g_{m.ОГ} - 901,6 \\ R^2(n_{кв}) = 0,99938; R^2(g_{m.ОГ}) = 0,99935; \quad (19)$$

$$\Delta t_{ФТЧ} = -3,018 \cdot 10^{-5} \cdot n_{кв}^2 + 5,359 \cdot 10^{-2} \cdot n_{кв} + 28,5; R^2 = 0,99618; \quad (20)$$

$$\Delta P_{ФТЧпрогн} = 7,882 \cdot 10^{-2} \cdot g_{m.ОГ}^3 - 1,269 \cdot g_{m.ОГ}^2 + 112,22 \cdot g_{m.ОГ}; R^2 = 0,99998; \quad (21)$$

$$\Delta P_{нонр} = 4,111 \cdot g_{m.ОГ}^2 - 166,32 \cdot g_{m.ОГ} + 1674,7; R^2 = 0,99070; \quad (22)$$

$$k_t = -1,272 \cdot 10^{-3} \cdot g_{m.ОГ}^2 + 5,421 \cdot 10^{-2} \cdot g_{m.ОГ} + 0,420 = \\ = -3,153 \cdot 10^{-7} \cdot n_{кв}^2 + 8,20 \cdot 10^{-4} \cdot n_{кв} + 0,465 = 1,362 \cdot 10^{-3} \cdot t_{ОГ} + 0,513; \\ R^2(n_{кв}) = 0,99056; R^2(g_{m.ОГ}) = 0,98589; R^2(t_{ОГ}) = 0,99782; \quad (23)$$

$$\Delta P_{ФТЧэксн} = 3,723 \cdot 10^{-4} \cdot n_{кв}^2 + 1,186 \cdot n_{кв} = 1,662 \cdot g_{m.ОГ}^2 + 66,459 \cdot g_{m.ОГ} + 11,22;$$

$$R^2(n_{кв}) = 0,99809; R^2(g_{m.ОГ}) = 0,99955; \quad (24)$$

$$\Delta t_{ФТЧ} = -1,563 \cdot 10^{-5} \cdot n_{кв}^2 + 2,218 \cdot 10^{-2} \cdot n_{кв} + 28,6; R^2 = 0,99949; \quad (25)$$

$$\Delta P_{ФТЧпроги} = 6,688 \cdot 10^{-2} \cdot g_{m.ОГ}^3 - 1,077 \cdot g_{m.ОГ}^2 + 95,22 \cdot g_{m.ОГ}; R^2 = 0,99998; \quad (26)$$

$$\Delta P_{нонр} = 1,780 \cdot g_{m.ОГ}^2 - 71,66 \cdot g_{m.ОГ} + 719,4; R^2 = 0,99210; \quad (27)$$

$$k_t = -6,442 \cdot 10^{-4} \cdot g_{m.ОГ}^2 + 2,734 \cdot 10^{-2} \cdot g_{m.ОГ} + 0,708 = \\ = -1,60 \cdot 10^{-7} \cdot n_{кв}^2 + 4,145 \cdot 10^{-4} \cdot n_{кв} + 0,730 = 1,079 \cdot 10^{-3} \cdot t_{ОГ} + 0,747;$$

$$R^2(n_{кв}) = 0,98774; R^2(g_{m.ОГ}) = 0,98122; R^2(t_{ОГ}) = 0,99774; \quad (28)$$

$$\Delta P_{ФТЧ} = 3,867 \cdot 10^{-3} \cdot t_{ОГ}^2 - 0,919 \cdot t_{ОГ} + 1416,1; R^2 = 0,99998; \quad (29)$$

$$\Delta t_{ФТЧ} = 0,143 \cdot t_{ОГ} + 2,2; R^2 = 0,99998; \quad (30)$$

$$k_t = -1,983 \cdot 10^{-4} \cdot t_{ОГ} + 1,019; R^2 = 0,99675; \quad (31)$$

$$\Delta P_{ФТЧ} = 4,294 \cdot 10^{-3} \cdot t_{ОГ}^2 + 0,347 \cdot t_{ОГ} + 1630,0; R^2 = 0,99999; \quad (32)$$

$$\Delta t_{ФТЧ} = 0,138 \cdot t_{ОГ} + 0,3; R^2 = 0,99980; \quad (33)$$

$$k_t = 1,0 \cdot t_{ОГ} + 1,0; R^2 = 0,99999; \quad (34)$$

$$\Delta P_{ФТЧ} = 5,262 \cdot 10^{-3} \cdot t_{ОГ}^2 + 0,611 \cdot t_{ОГ} + 2942,2; R^2 = 0,99998; \quad (35)$$

$$\Delta t_{ФТЧ} = 7,611 \cdot 10^{-2} \cdot t_{ОГ} - 0,1; R^2 = 0,99962; \quad (36)$$

$$k_t = -2,955 \cdot 10^{-4} \cdot t_{ОГ} + 1,026; R^2 = 0,99833. \quad (37)$$

Таким образом, по результатам проведения данного этапа моторных исследований можно сделать следующий вывод: температура ОГ, как ТС, оказывает существенное влияние на все рабочие характеристики ДМЦ ФЭ. Ее снижение, достигнутое за счет перенесения ФТЧ по длине выпускного тракта дизеля, благоприятно сказывается как на эффективности очистки им ОГ от ТЧ, так и на его ГС. Причем это влияние тем сильнее, чем выше температура ОГ на входе в ФТЧ, и наоборот, при приближении ее значения к температуре ОС, тем менее значительный эффект достигается. В связи с вышесказанным, следует сделать вывод о том, что рациональное место размещения разработанного ФЭ по длине выпускного тракта МИС находится в окрестности значения $L_{вып}$, равного 5,0 м. Этот вывод также подкрепляется анализом геометрических параметров (в частности, длины) выпускных трактов существующих АТС, оснащенных автотракторными дизелями, у которых значение $L_{вып}$, превышающее 5,0 м, не нашло широкого распространения.

Следует заметить, что по сути температурный k_t и компоновочный k_L коэффициенты в представленной модели выполняют одинаковые функции – учет влияния температуры ОГ на ГС ФТЧ. В связи с этим, их можно было бы объединить в один – глобальный или абсолютный температурный коэффициент k_T , а коэффициент k_t приобретал бы функции учета локального или относительного изменения температуры ОГ (то есть, от режима к режиму в пределах одной в.с.х.). Однако при таком подходе теряется связь между самим изменением температуры ОГ и его причинами.

Определению физического смысла и значений временного коэффициента k_τ , позволяющего учесть влияние на ГС ФТЧ динамики засорения его ФЭ в процессе эксплуатации, посвящена следующая, завершающая, часть 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 компоновочного коэффициента, позволяющего учесть влияние на гидравлическое сопротивление ФТЧ места его размещения вдоль выпускного тракта дизеля, определяющего максимальную температуру ОГ на входе в его корпус. Экспериментально определены его значения для разных мест размещения ФТЧ.

Список литературы: 1. 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. 2. 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. 3. *Кондратенко А.Н.* Математическая модель гидравлического сопротивления фильтра твердых частиц дизеля. Часть 1: настроечный коэффициент // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 18 (1061). – С. 68 – 80. 4. *Кондратенко А.Н.* Математическая модель гидравлического сопротивления фильтра твердых частиц дизеля. Часть 2: температурный коэффициент // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 18 (1061). – С. 80 – 89. 5. *Вамболь С.О., Строков О.П., Кондратенко О.М.* Стендові випробування автотракторного дизеля 2410,5/12 за стандартизованими циклами для визначення ефективності роботи ФТЧ // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 10 (1053). – С. 11 – 18. 6. *Кондратенко О.М.* Зниження викиду 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. 7. *Парсаданов І.В.* Підвищення якості і конкурентоспроможності дизелів на основі комплексного паливно-екологічного критерію: Монографія. – Харків: Видавничий центр НТУ «ХПІ», 2003. – 244 с. 8. *Александров А.А.* Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания / *А.А. Александров, И.А. Ирхаров, В.В. Багров и др.* Под ред. *А.А. Александрова, В.А. Маркова*. – М.: ООО НИЦ "Инженер", ООО "Онико-М", 2012. – 791 с. 9. *Эберт К., Эдерер Х.* Компьютеры. Применение в химии: Пер. с нем. – М.: Мир, 1988. – 416 с.

Bibliography (transliterated): 1. 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. 4 May 2011. Print. 2. 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. 3. *Kondratenko, A. N.* "Matematicheskaja model' gidravlicheskogo soprotivlenija fil'tra tverdyh chastic dizelja. Chast' 1: nastroecnyj koefjicient." *Visnyk NTU «KhPI»*.

Ser.: Matematychnye modeljuvannja v tehnici ta tehnologijah. No. 18 (1061). Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. 69–80. Print. 4. Kondratenko, A. N. "Matematicheskaja model' gidravlicheskogo soprotivlenija fil'tra tverdyh chastic dizelja. Chast' 2: temperaturnyj koeficient." *Visnyk NTU «KhPI».* *Ser.: Matematychnye modeljuvannja v tehnici ta tehnologijah.* No. 18 (1061). Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. 80–89. Print. 5. Vambol', S. O., O. P. Stokov and O. M. Kondratenko. "Stendovni vyprobuvannja avtotraktornogo dyzelja 2Ch10.5/12 za standartyzovanymy cyklamy dlja vyznachenja efektyvnosti roboty FTCh." *Visnyk NTU «KhPI».* *Ser.: Avtomobile- ta traktorobuduvannja.* No. 10 (1053). Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. 11–18. Print. 6. Kondratenko, O. M. *Znyzhennja vykydu tverdyh chastynek transportnyh dyzeliv, shho perebuvajut' v ekspluataciji'. Avtoref. dys. na zdobuttja nauk. stupenja kand. tehn. nauk.* Kharkiv, 2013. Print. 7. Parsadanov, I. V. *Pidvyschemnja jakosti i konkurentospromozhnosti dyzeliv na osnovi kompleksnogo palyvno-ekologichnogo kryteriju. Monografija.* Kharkiv: Vydavnychij centr NTU «KhPI», 2003. Print. 8. Aleksandrov, A. A., et al. *Al'ternativnye topliva dlja dvigatelej vnutrennego sgoranija.* Ed. A. A. Aleksandrov, and V. A. Markov. Moscow: OOO NIC "Inzhener", OOO "Oniko-M", 2012. Print. 9. Jebert, K., and H. Jederer. *Komp'jutery. Primenenie v himii. Per. s nem.* Moscow: Mir, 1988. Print.

Поступила (received) 02.03.2015

УДК 621.646.942

А.П. КОНОНЕНКО, д-р техн. наук, проф., ДонНТУ, Донецк;
В.П. ОВСЯННИКОВ, канд. техн. наук, доц., ДонНТУ, Донецк;
М.В. ОВЕРКО, аспирант, ДонНТУ, Красноармейск

ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИХРЕВОГО ДИОДА ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УДАРОВ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

Наиболее часто мощные вертикальные трубопроводы применяются на шахтных водоотливных установках. Опасный гидравлический удар возникает в них при внезапном отключении насоса. В этих условиях средством защиты от опасных колебаний давления может быть гидравлический диод, установленный, например, в середине трубопровода. Наиболее приемлемым типом диода выбран вихревой струйный диод. Трудностью при моделировании переходного процесса в вертикальном трубопроводе с вихревым диодом является его существенная инерционность. Задача была решена с помощью локальной системы координат, которая вводится в программу расчета на время существования обратного тока жидкости. Используя разработанную модель можно определить размеры вихревого диода и рассчитать энергетические потери, которые могут возникнуть при использовании данной схемы защиты.

Ключевые слова: водоотливная установка, защита, напорный трубопровод, моделирование, гидравлический удар, вихревой гидравлический диод.

Введение. Как показывают результаты моделирования динамических процессов в вихревом диоде, время его выхода на режим максимального обратного сопротивления зачастую соизмеримо с фазой гидравлического удара [1]. Это говорит о том, что при расчете колебательного процесса в напорном трубопроводе водоотливной установки его нельзя рассматривать как дискретный безынерционный модуль с двумя значениями гидравлического сопротивления. С другой стороны, эффективность защиты от гидравлического