

А.П. СТРОКОВ, д-р. техн. наук, проф. ИПМаш им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков;

А.Н. КОНДРАТЕНКО, асп. ИПМаш им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МАКЕТА МОДУЛЯ ФИЛЬТРА ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ БЫСТРОХОДНОГО ДИЗЕЛЯ. ЧАСТЬ 2

В работе рассмотрен вопрос проектирования и изготовления оригинального безмоторного испытательного стенда и макета модуля фильтрующего элемента фильтра твердых частиц дизеля. Также приведена методика и результаты экспериментального определения зависимостей гидравлического сопротивления макета модуля от значения массовых расходов рабочего тела сквозь безмоторный стенд.

У роботі розглянуто питання проектування та виготовлення оригінального безмоторного випробувального стенду та макету модуля фільтруючого елементу фільтру твердих частинок дизеля. Також наведено методіку та результати експериментального визначення залежностей гідравлічного опору макету модуля від значення масових витрат робочого тіла крізь безмоторний стенд.

The paper discusses the design and manufacture of the original engineless test-band and the layout of the module of filter element of the diesel particulate filter. There are methods and results of experimental determination of dependency of hydraulic resistance of the layout of module from the value of the mass flow rate of the working fluid through engineless test-band.

Введение

В вопросе снижения выбросов твердых частиц (ТЧ) с отработавшими газами (ОГ) дизелей особое место занимают фильтры твердых частиц (ФТЧ). Гидравлическое сопротивление является важной характеристикой ФТЧ, не зависимо от вида их фильтрующего элемента (ФЭ).

Анализ литературных источников

Для разных вариантов конструкции модуля ФЭ ФТЧ новой конструкции, описанного в [1], был проведен ряд расчетов гидравлического сопротивления [2]. Для экспериментальной проверки полученных результатов расчетов, а также с целью идентификации математической модели процесса движения потока ОГ в модуле ФЭ с учетом наличия в нем ТЧ, был спроектирован макет модуля ФЭ [3]. Также спроектирован и изготовлен безмоторный испытательный стенд [3], внешний вид которого представлен на рис. 1.

Цель и задачи исследования

Цель исследования – экспериментальная проверка данных расчетного исследования гидравлического сопротивления макета модуля ФТЧ быстроходного дизеля.

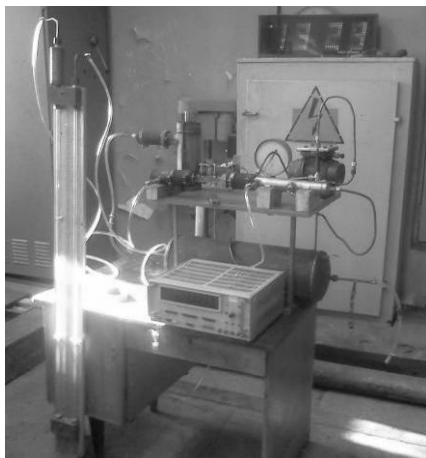


Рисунок 1 – Безмоторный испытательный стенд

Задачи исследования:

- 1) разработка методики безмоторного эксперимента;
- 2) получение зависимости гидравлического сопротивления макета модуля ФЭ от массового расхода рабочего тела (РТ) через стенд.

Объект исследования

Варианты конструкции макета модуля ФЭ отличались количеством отверстий в соединительной пластине на одно место сопряжения полостей ячеек модуля ФЭ. Перечень вариантов:

- вариант «а» – с 6 отверстиями диаметром 1,0 мм на одно место сопряжения полостей разноименных ячеек, расположенные в 2 ряда по 3 отверстия в ряду;

- вариант «б» – с 15 отверстиями диаметром 1,0 мм на одно место сопряжения полостей разноименных ячеек, расположенные в 3 ряда по 5 отверстий в ряду;

- вариант «в» – с 27 отверстиями диаметром 1,0 мм на одно место сопряжения полостей разноименных ячеек, расположенные в 3 ряда по 9 отверстий в ряду;

- вариант «г» – с 48 отверстиями диаметром 1,0 мм на одно место сопряжения полостей разноименных ячеек, расположенные в 4 ряда по 12 отверстий в ряду;

- вариант «д» – с 75 отверстиями диаметром 1,0 мм на одно место сопряжения полостей разноименных ячеек, расположенные в 5 ряда по 15 отверстий в ряду.

Также имелись следующие варианты конструкции соединительной пластины:

- вариант «е» – с индивидуальными для всех мест сопряжения полостей ячеек модуля вырезами в соединительной пластине в форме шпоночного паза с площадью 56% от площади места сопряжения,

- вариант «ж» – то же, вырезы закрыты стальной тканой сеткой в один слой с одной стороны;

- вариант «з» – то же, вырезы закрыты стальной тканой сеткой в один слой с двух сторон.

Внешний вид разных вариантов конструкции макета модуля ФЭ представлен на рис. 2.

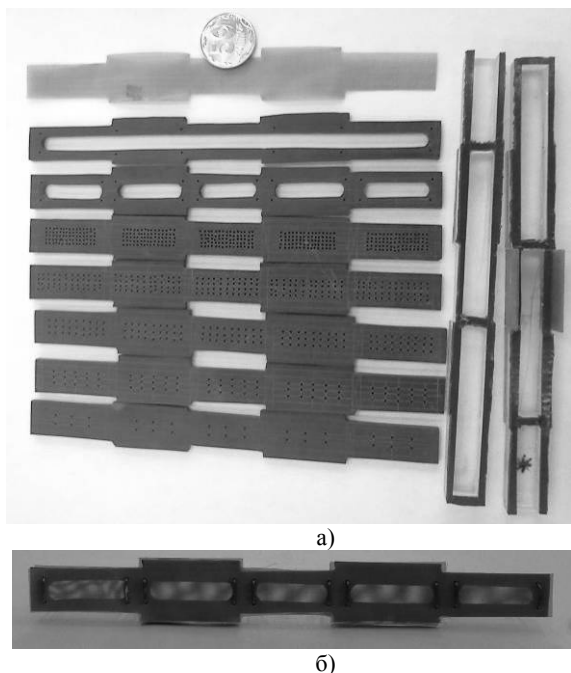


Рисунок 2 – Макет модуля ФЭ:

а – варианты конструкции; б – вариант конструкции с сетками в сборе.

Макет модуля, готовый к проведению экспериментального исследования (смонтированный на стенд и должным образом уплотненный от протечек РТ), показан на рис. 3.

Программа и методика экспериментального исследования **Программа**

Экспериментальное получение зависимостей значений гидравлического сопротивления макета модуля фильтрующего элемента от значения массового расхода рабочего тела через безмоторный стенд для различных вариантов его конструкции.

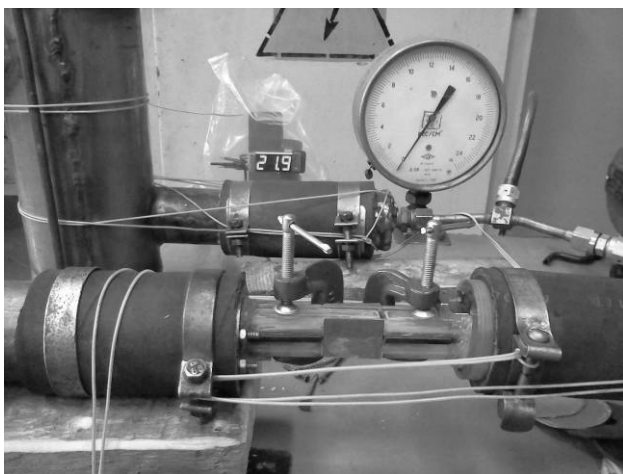


Рисунок 3 – Макет модуля ФЭ на стенде

Методика:

1. Монтировать макета модуля ФЭ определенного варианта конструкции на стенд;
2. выдержать не менее 12 часов;
3. установить режим течения РТ через стенд с помощью управляющего крана;
4. измерять параметры ОС:
 - барометрическое давление P_0 ,
 - температура воздуха t_0 ;
5. включить компрессор и электропитание приборов стенда;
6. выдерживать режим течения РТ через стенд 2 мин.;
7. измерять:
 - объемный расход РТ через стенд – G_v ,
 - избыточное давление РТ перед расходомером газа – P_p ,
 - температуру в измерительном ресивере – t_p ,
 - перепад абсолютных давлений в заторможенном потоке на макете модуля – ΔP_{MM} ,
 - перепад абсолютного давления в заторможенном потоке между макетом модуля ФЭ и атмосферой – ΔP_{OM} ,
 - температуру РТ перед макетом модуля ФЭ – t_{MM} ;
8. выключить компрессор;
9. выдержать до установления избыточного давления РТ в стенде равного 0 кг/см^2 ;
10. повторить пункты 5...9 для остальных режимов течения РТ через стенд;

11. выключить компрессор и электропитание приборов стенда;
12. демонтировать макет модуля ФЭ данной конструкции;
13. повторить пункты 1...12 для остальных вариантов конструкции модуля ФЭ.

Расходные характеристики для каждого варианта конструкции модуля ФЭ снять 3 раза для обеспечения требования повторяемости результатов.

В ходе снятия расходных характеристик для конкретного варианта конструкции модуля ФЭ порядок следования режимов течения РТ через безмоторный стенд выбирать из соображений рандомизации измерений.

Результаты исследования

В ходе экспериментального исследования были зависимости гидравлического сопротивления различных вариантов конструкции макета модуля ФЭ от массового расхода РТ через безмоторный стенд.

Согласно этим данным построены расходные характеристики для различных вариантов конструкции макета модуля ФЭ, представленные на рис. 4.

На рис. 4 по оси абсцисс отложены значения удельного массового расхода РТ через площадь поперечного сечения на входе в макет модуля (равная 54 мм^2).

Каждый вариант конструкции макета модуля ФЭ характеризуется своим значением отношения суммарной площади отверстий в соединительной пластине к площади поперечного сечения на входе в макет модуля. Площадь места сопряжения полостей ячеек модуля составляет 279 мм^2 .

Для варианта «а» это отношение равно 0,083, для варианта «б» – 0,208, для варианта «в» – 0,375, для варианта «г» – 0,667, для варианта «д» – 1,042.

Варианты конструкции соединительной пластины с вырезом в виде шпоночного паза (с площадью, равной 157 мм^2), закрытой стальной тканой сеткой (отношение площади проходного сечения ячейки сетки к площади самой ячейки которой равно 0,371) характеризуются отношением площади проходного сечения сетки, площадью равной площади выреза в соединительной пластине (равное $157 \cdot 0,371 = 58 \text{ мм}^2$) к площади поперечного сечения на входе в модуль. Для одного слоя сетки (вариант «ж») это отношение равно 1,08, для варианта расположения сеток с обеих сторон отверстия в соединительной пластине (вариант «з») – также 1,08 ввиду относительно большого расстояния между слоями сетки – 3 мм), для варианта без сеток (вариант «е») – отношение площади проходного сечения вырезов в соединительной пластине к площади поперечного сечения на входе в макет модуля – 2,91.

На рис. 4 вертикальной прямой линией обозначено значение удельного массового расхода ОГ на номинальном режиме работы дизеля 2Ч10,5/12 (Д21А1) (равного $0,055 \text{ кг/с}$) через площадь поперечного сечения на выходе из выхлопного коллектора (равную 875 мм^2) – $6,287 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(с} \cdot \text{мм}^2)$. Штриховой кривой обозначены результаты расчета гидравлического

сопротивления вариантов конструкции соединительной пластины с отверстиями в программном комплексе CosmosFloWorks.

Как видно на рис. 4, полученные в ходе экспериментального исследования могут быть описаны полиномами 4-ой степени. Коэффициенты полиномов представлены в табл.

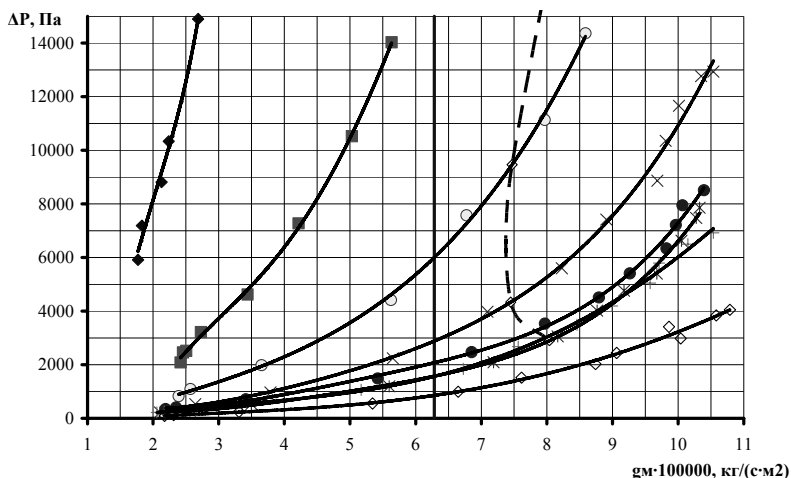


Рисунок 4 – Расходные характеристики вариантов конструкции макета модуля ФЭ:
 ♦ – вариант «а», ■ – вариант «б», ● – вариант «в», × – вариант «г», ● – вариант «д»,
 ◇ – вариант «е», * – вариант «ж», + – вариант «з».

Таблица – Коэффициенты полинома

Вариант	Кол-во отверстий	Соотнош. площадей	Коэффициент при				
			$g_v^4 \cdot 10^{-20}$	$g_v^3 \cdot 10^{-15}$	$g_v^2 \cdot 10^{-10}$	$g_v^1 \cdot 10^{-5}$	g_v^0
а	6	0,083	2112,4	-13919	32336	-21822	0
б	15	0,208	-48,94	951,2	-5961,7	17757	-17598
в	27	0,375	1,928	-3,144	19,01	579,18	-614,8
г	48	0,667	3,543	-61,05	466,01	-1118,7	1136,3
д	75	1,042	3,786	-70,41	513,47	-1360,2	1412,9
е	без сеток	2,91	-0,225	10,18	-75,384	317,41	-333,9
ж	1 сетка	1,08	-0,552	24,83	-212,58	888,3	-920,5
з	2 сетки	1,08	4,711	-94,44	727,67	-2038,7	2240,9

Обсуждение результатов

1) вариант конструкции соединительной пластины макета модуля ФЭ с максимальным количеством отверстий на одно место сопряжения полостей его ячеек имеет гидравлическое сопротивление практически равное сопротивлению для вариантов конструкции соединительной пластины с вырезами, закрытыми стальной тканой сеткой в один слой с двух сторон, то есть замена первого варианта конструкции на второй при модернизации конструкции модуля ФЭ является корректной и полноценной;

2) для вариантов конструкции соединительной пластины с вырезами, закрытыми стальной тканой сеткой в один слой с одной и с двух сторон, гидравлическое сопротивление практически одинаково, поэтому рационально в конструкции реального модуля ФЭ использовать закрытие вырезов в пластине с двух сторон;

3) для варианта конструкции соединительной пластины с вырезами, не закрытыми стальной тканой сеткой, гидравлическое сопротивление является объективной границей (имеет минимальное значение) для модуля ФЭ такой конструкции;

4) при значении удельного массового расхода РТ через безмоторный стенд, равного значению удельного массового расхода ОГ через выходное отверстие выпускного коллектора дизеля 2Ч10,5/12 на номинальном режиме его работы, модуль ФЭ с оптимальной конструкцией соединительной пластины (вариант с вырезами, закрытыми сеткой с двух сторон) обладает противодавлением, равным 1,7 кПа. При этом следует учесть следующие особенности: а) РТ в безмоторном стенде (воздух) имеет существенно более высокую плотность, чем ОГ в выпускном тракте дизеля, б) значение массового расхода РТ через безмоторный стенд в 10 раз меньше, чем значение массового расхода ОГ в выпускном тракте дизеля 2Ч10,5/12 на номинальном режиме его работы. Таким образом, можно предположить, что значения гидравлического сопротивления для всех вариантов конструкции модуля ФЭ в условиях эксплуатации на дизеле будут выше, чем полученные в ходе данного экспериментального исследования;

5) варианты конструкции макета модуля с отверстиями в соединительной пластине отличались от рабочего прототипа модуля толщиной соединительной пластины и, соответственно, длиной отверстий – 3 мм вместо 0,5...1,0 мм – поэтому для них значения гидравлического сопротивления, предположительно, будут несколько ниже, чем полученные в ходе данного экспериментального исследования.

6) Согласно исследованиям других авторов, ФТЧ с пористыми цельными керамическими элементами обладают гидравлическим сопротивлением порядка 5,5...6,5 кПа [5, 6]. Заметим, что таким гидравлическим сопротивлением обладают не загрязненные ФЭ, т.е. эти данные не учитывают:

- наличие корпуса ФТЧ;
- наличие системы регенерации ФТЧ;

– наличие устройства, снижающего эмиссию продуктов неполного сгорания топлива;

– наличия устройства, снижающего эмиссию оксидов азота и системы ее регенерации;

– наличия традиционных элементов выпускной системы дизеля: глушителя шума выпуска, выпускного коллектора, выпускного трубопровода (составляет 3...10 кПа [7]);

– факта неизбежного засорения ФТЧ в процессе эксплуатации (увеличивает противодавление на выпуске на величину до 20 кПа на номинальном режиме работы дизеля [4])

Таким образом, наличие системы снижения эмиссии вредных веществ с ОГ дизеля существенно увеличивает противодавление на выпуске, а значит увеличивает коэффициент остаточных газов, величину насосных потерь и, соответственно уменьшает механический КПД дизеля.

Выводы

Спроектирован и изготовлен безмоторный испытательный стенд. Удельный массовый расход рабочего тела через образцы, обеспечиваемый стендом в два раза превосходит удельный массовый расход ОГ через срез на выходе из выхлопного коллектора дизеля 2Ч10,5/12. Спроектирован и изготовлен макет модуля ФЭ с различными вариантами конструкции.

Разработана методика экспериментального определения гидравлического сопротивления макета модуля ФЭ в зависимости от массового расхода рабочего тела через безмоторный стенд.

Получены зависимости гидравлического сопротивления различных вариантов конструкции макета модуля ФЭ в зависимости от массового расхода рабочего тела через безмоторный стенд экспериментальным путем. Эти зависимости имеют вид полинома 4-ой степени. Определены коэффициенты полиномов.

Список литературы: 1. *Строков А.П.* Расчетная оценка гидравлического сопротивления модуля фильтра твердых частиц быстроходного дизеля / *Строков А.П., Кондратенко А.Н.* // Автомобильный транспорт: сборник научных трудов. – 2011. Выпуск 28. – С. 48-54. 2. *Строков А.П.* Расчетная оценка гидравлического сопротивления модуля фильтра твердых частиц быстроходного дизеля. Часть 2 / *Строков А.П., Кондратенко А.Н.* // Двигатели внутреннего сгорания. – 2011. - №2. – С. 86-90. 3. *Строков А.П.* Экспериментальное определение гидравлического сопротивления макета модуля фильтра твердых частиц быстроходного дизеля / *Строков А.П., Кондратенко А.Н.* // Автомобильный транспорт: сборник научных трудов. – 2011. Выпуск 29 – С. 48-54. 4. Volkswagen Service Training. Пособие по программе самообразования 336. Сажевый фильтр с каталитическим покрытием. Устройство и принцип действия. Режим доступа: www.volkswagen-training-online.com. 5. *Евстигнеев В.В.* Моделирование процессов очистки отработавших газов химических производств и дизельных агрегатов от твердых частиц СВС-фильтрами / *Евстигнеев В.В., Новоселов А.Л., Полубников В.И.* и др. // Известия Томского политехнического университета. – 2005. Т. 308. №1. – С. 138-143. 6. *Льченко А.В.* Визначення гідравлічного опору пористого матеріалу фільтруючого елемента фільтра відпрацьованих газів / *Льченко А.В., Балок В.Ю.* // Автомобильный транспорт: сборник научных трудов. – 2011. Вып. 29. – С. 148 – 151. 7. *Дьяченко В.Г.* Методические указания к курсовой работе: Расчет рабочих процессов в двигателях внутреннего сгорания // Харьков, изд-во ХНАДУ, 2001. – 34 с.

Поступила в редколлегию 03.04.2012