

УДК 621.43.068.4

*А. Н. Кондратенко, асп., А. П. Строков, д-р техн. наук,
А. Н. Авраменко, канд. техн. наук*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ФИЛЬТРЕ
ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЯ
ЧАСТЬ 1: МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ФИЛЬТРА И ДОПОЛНЕНИЕ
БАЗЫ ДАННЫХ ПО СВОЙСТВАМ ПОРИСТОГО ТЕЛА**

Постановка проблемы и анализ литературных источников

Создание эффективного, технологичного и надежного фильтра твердых частиц отработавших газов дизелей является актуальной задачей, стоящей перед специалистами в области двигателестроения. Повышение точности математического моделирования тепло- и массообменных процессов в таких фильтрах позволяет более эффективно осуществлять оптимизацию их конструкции.

В предыдущих публикациях авторами описаны новая конструкция и способ функционирования фильтра твердых частиц (ФТЧ) отработавших газов (ОГ) дизеля [1]. Также описана математическая модель процесса движения ОГ в полостях ФТЧ [1,2].

Очевидно, что представленная математическая модель не достаточно адекватно описывает исследуемые процессы. С ее помощью были выполнены предварительные сравнительные расчеты, для чего ее точности было вполне достаточно [1,2]. Но для моделирования реальных процессов, происходящих в фильтрующем элементе (ФЭ) вышеупомянутую модель следует усовершенствовать.

Цель и постановка задачи исследования

Цель данного исследования – повышение точности математического моделирования тепло- и массообменных процессов в полостях фильтрующего элемента (ФЭ) фильтра твердых частиц дизеля за счет ее дополнения данными о свойствах материалов ФЭ и рабочего тела.

Задачи данного исследования:

- 1) повышение технологичности конструкции ФЭ;
- 2) дополнение базы данных по свойствам пористого тела (ПТ);
- 3) дополнение базы данных по свойствам реального рабочего тела;
- 4) анализ литературных данных о влиянии шероховатости поверхностей полостей и теплофизических свойств материалов ФЭ на характеристики ФЭ;

5) дополнение базы данных по свойствам твердых частиц (ТЧ);

6) экспериментальное получение значений краевых условий, необходимых для моделирования процесса течения ОГ через ФТЧ.

В данной части исследования пункты 1 и 2 будут раскрыты более подробно.

Обоснование повышения технологичности конструкции модуля ФЭ

Авторами были предложены новая конструкция и способ функционирования ФТЧ дизеля. Конструкция предполагала выполнение модулей ФЭ из стального листа, соединяемых точечной сваркой и покрытых высокопористым жаростойким покрытием [1,2].

Ввиду того, что зазоры размером менее 0,5 мм в процессе функционирования ФТЧ будут забиваться ТЧ, а в процессе термической регенерации будут коксоваться, элементы конструкции под швы точечной сварки у модуля отсутствуют.

Способ функционирования ФТЧ предполагает, что ТЧ будут адсорбироваться на поверхностях полостей ячеек при омывании их потоком ОГ, формируемым отверстиями в соединительной пластине. Соответственно, поверхности полостей должны обладать большой адсорбционной способностью, т.е. в первую очередь обладать развитой поверхностью. Сами же ТЧ также обладают крайне развитой поверхностью (сажа) и высокой адгезией (углеводороды, адсорбированные сажевыми частицами). Таким образом, для ФТЧ такого типа важна адсорбция небольшого по толщине слоя ТЧ на поверхностях полостей ФЭ (первичного), а следующие слои ТЧ уже осядут на первичный слой.

Тканые сетки из нержавеющей стали с различными параметрами ячеек обладают следующими параметрами: имеется широкий выбор размеров ячеек, изготавливаются из не окисляемого и прочного материала, легко поддаются механической обработке, имеют малый удельный вес, доступны и имеют не большую стоимость [3]. Испытания об-

разцов на моторном стенде с дизелем 2Ч10,5/12 показали, что на таких сетках, расположенных вдоль потока ОГ, ТЧ осаживаются, а на расположенных поперек потока ОГ, ТЧ осаживаются в гораздо меньшей степени (сдуваются и/или выгорают). Сетки воздействию потока ОГ с его параметрами, характерными для сечения на срезе за выхлопным коллектором, переносят без заметного изменения своих физических свойств.

Произведена замена в конструкции модуля ФЭ соединительной пластины с круглыми отверстиями пластиной с как можно большими по площади отверстиями прямоугольной формы, закрытыми такими сетками. Сетки, расположенные вдоль поверхностей полостей модуля в виде полых деталей коробчатой конструкции (кассет), используются в качестве адсорбирующей поверхности. Сетки не покрывают некоторых поверхностей полостей модуля, что сэкономит до 40% материала. Все поверхности полостей модуля подвергаются пескоструйной обработке.

Перегородки выполняются из материала соединительной пластины. Все стенки ячеек ФЭ имеют вид швеллерообразного кожуха с упорами на одном конце. Для предотвращения смещения всех деталей модуля друг относительно друга из материала соединительной пластины формируются направляющие.

Таким образом, весь модуль ФЭ будет состоять всего из трех типов деталей: кожух – 2 шт., соединительная пластина – 1 шт., кассета из сетки – 4 шт. Эскиз модуля приведен на рис. 1. Эскизы деталей представлены на рис. 2. Размеры модуля пересмотрены таким образом, что модуль приобретает квадратное сечение.

Известно три способа удаления нерастворимых фракций ТЧ из ФТЧ: 1) обратная продувка, 2) разборка с промывкой, 3) полная замена и утилизация ФЭ – и все они реализуются вне транспортного

средства (ТС). ФТЧ данной конструкции может быть очищен от нерастворимых фракций ТЧ любым из вышеуказанных способов.

Как известно из опыта зарубежных производителей ФТЧ [4], подобные фильтры имеют ФЭ, объем которого приблизительно равен литражу ДВС, как и объем глушителя шума системы выпуска дизеля. Модуль ФЭ имеет объем $V_{\text{мод}}$, равным 49130 мм^3 , а площадь проходного сечения $S_{\text{мод}}$ 105 мм^2 . Литраж дизеля 2Ч10,5/12 zV_h равен $2078168,4 \text{ мм}^3$. Соответственно, возможное количество модулей ФЭ для него $i_m = z \cdot V_h / V_{\text{мод}}$ равно 43.

Площадь проходного сечения отверстия в выходном фланце выпускного коллектора S_d равна 1875 мм^2 [2], поэтому необходимое количество модулей ФЭ $i_m = S_d / S_{\text{мод}}$ равно 18. Однако, в процессе работы ФТЧ неизбежно засорение ФЭ ТЧ, существует вероятность отказа бортовой системы регенерации, а временной интервал между процессами регенерации зависит от его емкости ФЭ, а значит от количества модулей. Таким образом, принимаем количество модулей ФЭ для дизеля 2Ч10,5/12 равное 36 (для улучшения их компоновки в корпусе ФТЧ – в 6 рядов по 6 модулей в ряду).

Вес модуля при толщине стали 0,75 мм и толщине сетки 0,5 мм составляет 95,4 г, а при толщине стали 0,5 мм – 63 г.

Дополнение базы данных по свойствам пористых тел

Стальная нержавеющая тканая сетка, выбранная авторами для оценки, имеет следующие параметры: диаметр проволоки имеет значение 0,09 мм, размер проходного сечения ячейки сетки (имеет квадратное проходное сечение) – $0,14 \times 0,14 \text{ мм}$, расстояние между осями отдельных проволок – 0,23 мм, соотношение площади проходного сечения ячейки к площади повторяющегося элемента сетки – 0,371 [3].

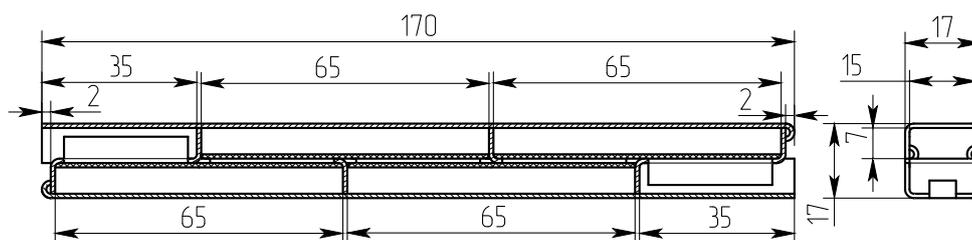


Рис. 1. Эскиз модуля ФЭ

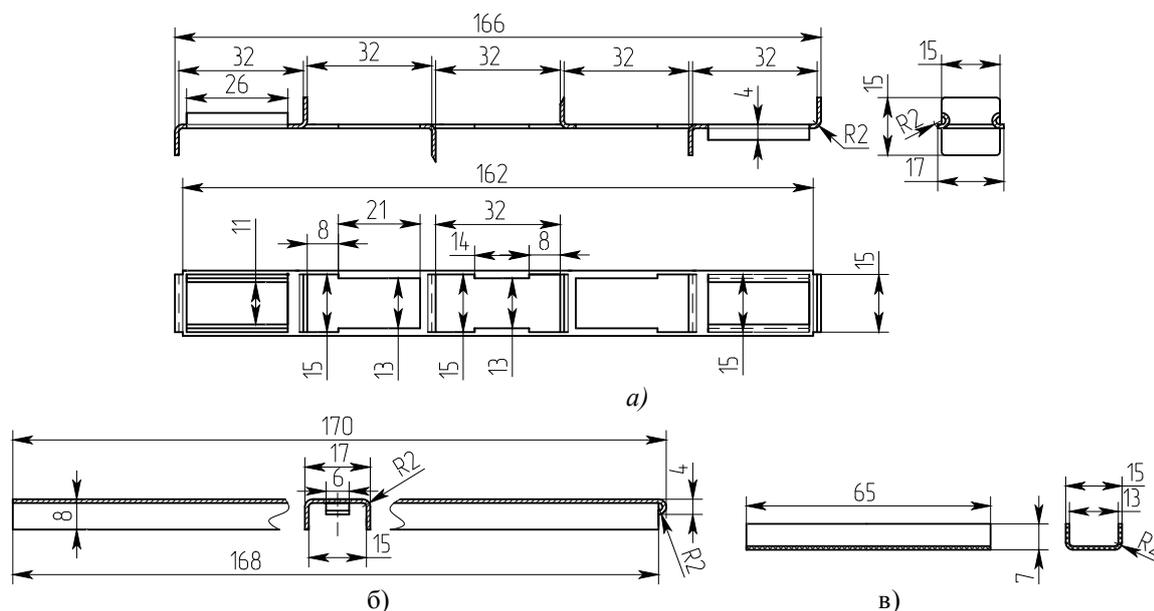


Рис. 2. Эскизы деталей модуля ФЭ:
 а) соединительная пластина; б) кожух; в) кассета

Программный комплекс CosmosFlo-Works позволяет учитывать наличие пористых тел (ПТ) в конструкциях объектов расчета. Более того, разработчики данного программного комплекса рекомендуют описывать объекты типа сеток как пористые тела, в виду крайнего усложнения расчетной модели из-за излишнего измельчения расчетной сетки, необходимого для описания объектов типа сеток [5]. База данных по свойствам ПТ в указанном программном комплексе несет в себе информацию о свойствах ПТ, необходимую для учета их гидравлического сопротивления.

В CosmosFloWorks, если текучая среда проходит сквозь пористое тело, то его влияние на параметры течения моделируются как рассредоточенное гидравлическое сопротивление:

$$\Delta p_{ПТ} = -k \cdot \delta_{ij} \cdot \rho \cdot u_{ij},$$

где δ_{ij} – дельта-функция Кронекера ($\delta_{ij}=1$ при $i=j$ и $\delta_{ij}=0$ в остальных случаях), u_{ij} – скорость текучей среды, k – вектор силы сопротивления пористого тела (определяется свойствами пористого материала).

$$k = -grad(P)/(\rho \cdot V),$$

где P , ρ , V – давление, плотность и скорость текучей среды, grad берется по характерным направлениям проницаемости, k по характерным направлениям проницаемости моделируется по следующей зависимости:

$$k = \Delta P \cdot S / (G_m \cdot L),$$

где ΔP – перепад давления между противоположными сторонами ПТ в данном направлении, $G_m = G_V \cdot \rho$ – массовый расход текучей среды в данном направлении, S и L – площадь поперечного сечения и длина ПТ в данном направлении. Величина k задается зависимостью $\Delta P = f(G_m)$ и константами S и L . Для стальных тканых сеток эти данные отсутствуют. Их возможно получить на безмоторном испытательном стенде, спроектированном и изготовленном авторами, и описанном в [6]. Тканые сетки характеризуются однонаправленным видом проницаемости (материал проницаем только в одном направлении) [5].

Для получения данных о гидравлическом сопротивлении стальной тканой сетки был спроектирован и изготовлен держатель (эскиз и внешний вид которого представлены на рис. 2), а также объекты исследования – образцы круглой формы (рис. 2). Для предотвращения протечки рабочего тела (РТ) в продольном направлении периферийные области образцов обработаны герметиком.

Программа исследования включала:

1) получение зависимости гидравлического сопротивления пакетов сеток от количества их слоев в пакете, при расстоянии между соседними слоями сеток в пакете, равном нулю;

2) получение зависимости гидравлического сопротивления пакетов из сеток от массового расхода рабочего тела в безмоторном стенде для количества

сеток в пакете 1, 2 и 3, при расстоянии между соседними слоями сеток в пакете равном нулю;

3) получение зависимости гидравлического сопро-

тивления двух слоев сеток от массового расхода рабочего тела в безмоторном стенде для различных значений расстояния между ними.

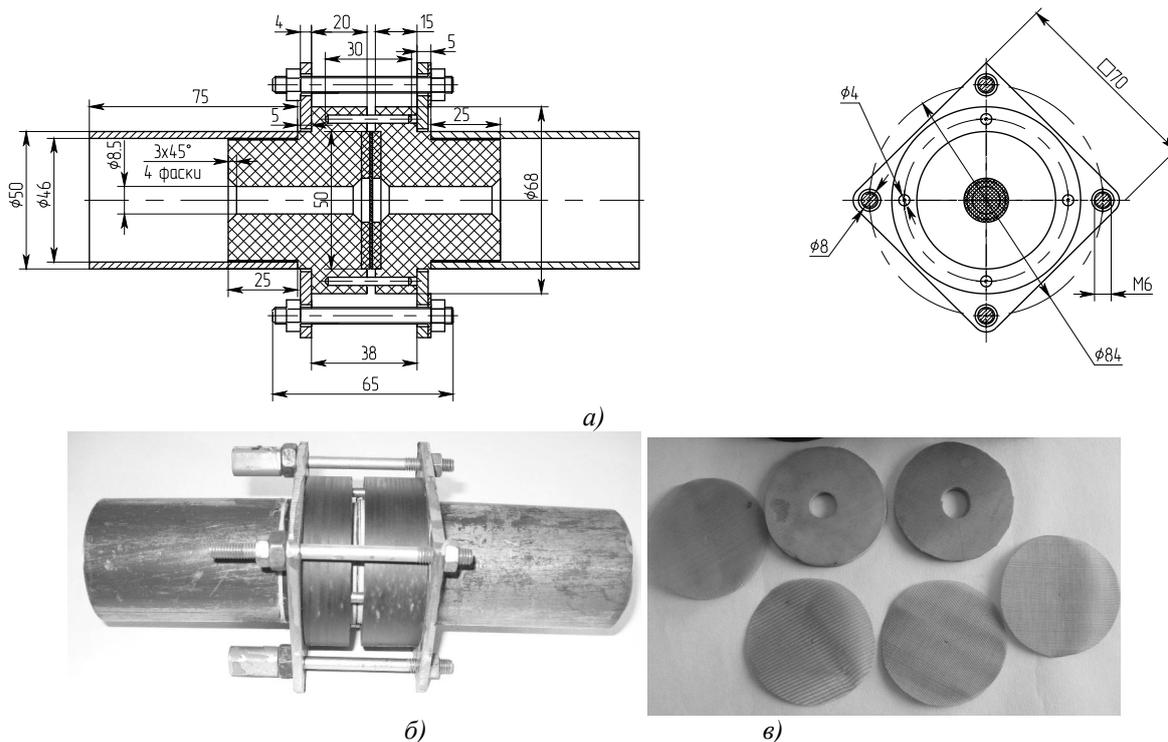


Рис. 2. Держатель сеток:
а) эскиз; б) внешний вид держателя; в) образцы и уплотнители

При получении зависимости гидравлического сопротивления пакетов сеток от количества их слоев в пакете, при расстоянии между соседними слоями сеток в пакете, равном нулю, режим течения рабочего тела (воздух) в полостях и трубопроводах стенда для всех пакетов образцов (с различным количеством слоев сеток в пакете j и расстояниями между соседними слоями сеток равными нулю) характеризовался следующими параметрами: объемный расход РТ $G_v=1,308 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, температура РТ $t_{\text{возд}}=11,3 \text{ }^\circ\text{C}$, давление РТ $p_{\text{возд}}=334797 \text{ Па}$. Условия окружающей среды были следующими: барометрическое давление $B_0=99700 \text{ Па}$, температура $t_0=9,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Этот режим соответствует максимально открытому положению регулирующего крана стенда. Массовый расход РТ в стенде G_m равен $5,485 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$. В ходе эксперимента были исследованы варианты с 1...7 слоями сеток в пакете. Проходное сечение отверстия в держателе сеток имеет площадь $S_{\text{ДС}}$ равную 57 мм^2 , а площадь проходного сечения отверстия в выходном фланце выпускного коллектора S_d равна 1875 мм^2 . Таким образом, соотношение этих площадей $S_d/S_{\text{ДС}}$ равно 25.

Массовый расход РТ, приходящийся на единицу площади проходного сечения для выходного фланца выпускного коллектора $g_{\text{мд}}$, равен $2,93 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{мм}^2)$, а приходящийся на единицу площади отверстия в держателе сеток $g_{\text{мДС}}$ равен $9,67 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{мм}^2)$. То есть, режимы течения в колене испытательного стенда и в отверстии держателя сеток подобны [7]. Результаты исследования представлены на рис. 3.

При получении зависимости гидравлического сопротивления пакетов из сеток от массового расхода рабочего тела в безмоторном стенде, при расстоянии между соседними слоями сеток в пакете равном нулю, пакеты образцов состояли из 1, 2 и 3 сеток. Также исследован вариант без сеток. Режим течения РТ в полостях безмоторного стенда задавался изменением степени открытия регулирующего крана (4 положения), согласно которых изменялись значения объемного расхода РТ через стенд G_v (от $2,2 \cdot 10^{-4}$ до $1,43 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$), давление РТ $p_{\text{РТ}}$ (от 2,8 до $4,7 \text{ кг}/\text{см}^2$) и температура РТ $t_{\text{РТ}}$ (от 12,8 до $16,2 \text{ }^\circ\text{C}$). При этом массовый расход РТ в стенде G_m

менялся от $1,13 \cdot 10^{-3}$ до $6,21 \cdot 10^{-3}$ кг/с. Результаты исследования представлены на рисунке 4.

При получении зависимости гидравлического сопротивления двух слоев сеток от массового расхода рабочего тела в безмоторном стенде для реализации изменения расстояния между ними использовались резиновые прокладки толщиной L_c , равной 0,5; 1,4; 2,6; 3,2 и 5,3 мм. Также исследован вариант с расстоянием между пакетами, равным нулю. Режим течения РТ в полостях безмоторного стенда задавался изменением степени открытия регулирующего крана, положения, согласно которым изменялись значения объемного расхода РТ через стенд, давление РТ и температура РТ. Результаты исследования представлены на рисунке 5.

На рисунке 3 видно, что зависимость гидравлического сопротивления пакетов сеток при расстоянии между соседними сетками в пакете, равном нулю, от количества сеток в пакете (от толщины пакета) носит линейный характер.

Коэффициент пропорциональности для этой зависимости имеет значение 1,5 кПа/слой сетки. На рисунке 3 также видно, что с добавлением второго слоя сеток при расстоянии между ними, равном нулю, проявляется влияние взаимного расположения ячеек сеток, сложившееся в пакете образцов произвольным образом.

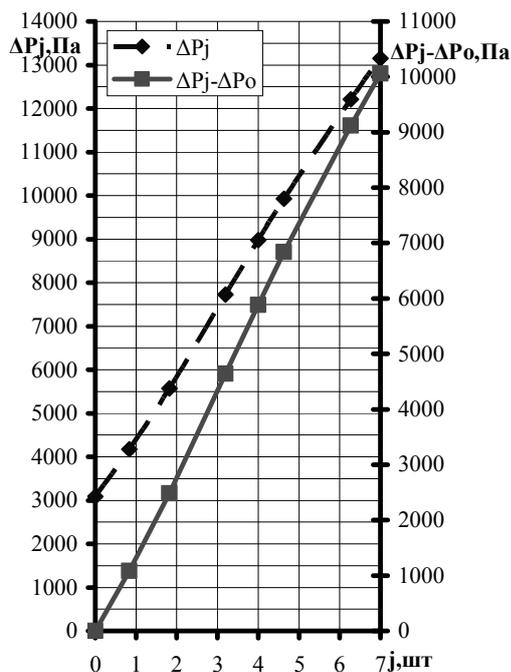


Рис. 3. Зависимости гидравлического сопротивления пакетов сеток от количества их слоев в пакете

На рисунке 4 видно, что зависимость гидравлического сопротивления пакетов сеток при расстоянии между соседними сетками в пакете равным нулю, от массового расхода РТ через сечение в держателе сеток носит характер параболы четвертой степени.

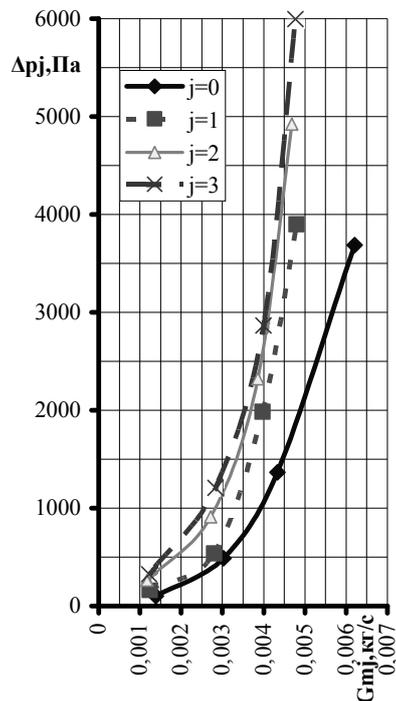


Рис. 4. Зависимости гидравлического сопротивления пакетов из сеток от массового расхода рабочего тела в безмоторном стенде для количества сеток в пакете 1, 2 и 3

На рисунке 5 видно, что зависимость гидравлического сопротивления сеток при расстоянии между ними не равном нулю, от массового расхода РТ через сечение в держателе сеток носит характер параболы четвертой степени.

Полученные кривые (рисунки 4 и 5) представляют собой степенные функции вида

$$\Delta P_j = \sum_{n=0}^4 a_{jn} \cdot G_{mj}^n$$

Определены их коэффициенты для различных значений j .

На рисунке 6 можно увидеть, что зависимость гидравлического сопротивления сеток при расстоянии между ними не равном нулю, при постоянном значении положения регулирующего органа стенда, от величины расстояния между сетками, носит сложный характер с выраженными максимумами и минимумами. Такой характер подобен характеру зависимости величины массового расхода РТ через стенд от положения регулирующего органа стенда,

а также обусловлен проявлением эффекта лабиринтного уплотнения при значении расстояния между сетками L_c от 0 до 3 мм, и имеющим максимальное влияние на эту зависимость при $L_c=1,4$ мм.

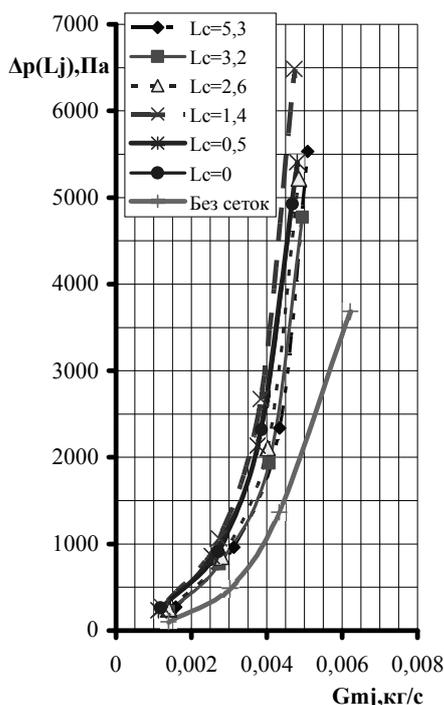


Рис. 5. Зависимости гидравлического сопротивления двух слоев сеток от массового расхода рабочего тела в безмоторном стенде для различных значений расстояния между ними

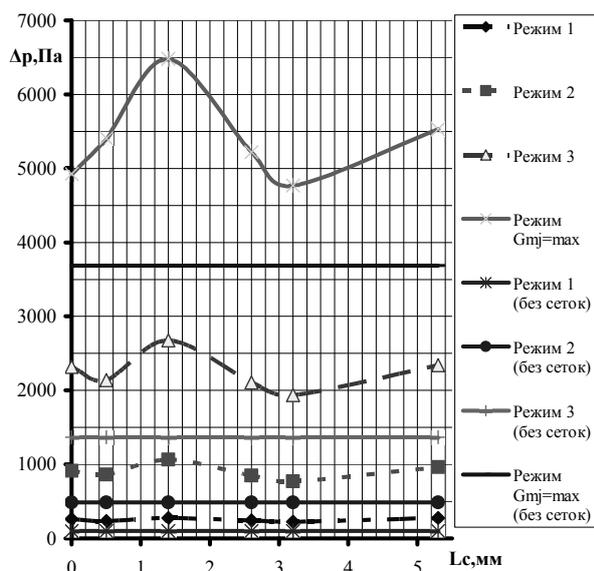


Рис. 6. Зависимости гидравлического сопротивления двух слоев сеток при постоянном положении органа управления стендом от величины расстояния между слоями

Выводы

В работе обоснована и описана конструкция модуля ФЭ с повышенной технологичностью.

Дополнена база данных по свойствам ПТ. При этом получены и проанализированы следующие зависимости гидравлического сопротивления стальных тканых сеток:

- от количества их слоев (носит линейный характер, определен коэффициент пропорциональности этой зависимости);

- от массового расхода РТ через них (носят характер параболы четвертой степени, определены значения коэффициентов при переменных);

- от расстояния между двумя слоями сеток (носят сложный характер).

Список литературы:

1. Строчков А. П. Расчетная оценка гидравлического сопротивления модуля фильтра твердых частиц быстроходного дизеля / А. П. Строчков, А. Н. Кондратенко // Автомобильный транспорт. – 2011. Выпуск 28. – С. 48-54;
2. Строчков А. П. Расчетная оценка гидравлического сопротивления модуля фильтра твердых частиц быстроходного дизеля. Часть 2 / А. П. Строчков, А. Н. Кондратенко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2011. - №2. – С. 86-90.
3. Завод им. Фрунзе. Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.frunze.ua/catalog/caccular/woven_mesh.html
4. Volkswagen Service Training. Пособие по программе самообразования 336. Сажевый фильтр с каталитическим покрытием. Устройство и принцип действия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.volkswagen-training-online.com/
5. Алямовский А. А. Компьютерное моделирование в инженерной практике. / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов, А. И. Харитонович, Н. Б. Пономарев – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
6. Строчков А. П. Экспериментальное определение гидравлического сопротивления макета модуля фильтра твердых частиц быстроходного дизеля / А. П. Строчков, А. Н. Кондратенко // Автомобильный транспорт: сборник научных трудов. – 2011. Выпуск 29. – С. 48-54;
7. Аметистов Е. В. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Е. В. Аметистов, В. А. Григорьев, Б. Т. Емцов и др.; Под общ. ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина.–М.: Энергоиздат, 1982.–512 с.

Bibliography (transliterated):

1. Strokov A. P. Raschetnaja ocenka gidravlichesкого soprotivlenija modulja fil'tra tverdyh chastic bystrohodnogo dizelja / A. P. Strokov, A. N. Kondratenko // Avtomobil'nyj transport. – 2011. Vypusk 28. – S. 48-54;
2. Strokov A. P. Raschetnaja ocenka gidravlichesкого soprotivlenija modulja fil'tra tverdyh chastic bystrohodnogo dizelja. Chast' 2 / A. P. Strokov, A. N. Kondratenko // Dvigateli vnutrennego sgoranija. – 2011. - №2. – S. 86-90.
3. Zavod im. Frunze. Katalog produkcii [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: http://www.frunze.ua/catalog/caccular/woven_mesh.html
4. Volkswagen Service Training. Posobie po programme samoobrazovanija 336. Sazhevyj fil'tr s kataliticheskim pokrytiem. Ustrojstvo i princip dejstvija [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: www.volkswagen-training-online.com/
5. Aljajmovskij A. A. Kompjuterное modelirovanie v inzhenernoj prak-

tike. / A. A. Aljamovskij, A. A. Sobachkin, E. V. Odincov, A. I. Hari-tonovich, N. B. Ponomarev – SPb.: BHV-Peterburg, 2005. – 800 s.
6. Stokov A. P. Jeksperimental'noe opredelenie gidravlicheskogo soprotivlenija maketa modulja fil'tra tverdyh chastic bystrohodnogo dizelja / A. P. Stokov, A. N. Kondratenko // Avtomobil'nyj trans-

port: sbornik nauchnyh trudov. – 2011. Vypusk 29. – S. 48-54; 7. Ametistov E. V. Teplo- i massoobmen. Teplotehnicheskij jeksperiment: Spravochnik / E. V. Ametistov, V. A. Grigor'ev, B. T. Emcov i dr.; Pod obw. red. V. A. Grigor'eva i V. M. Zorina. – M.: Jenergoizdat, 1982.–512 s.

УДК 629.33:621.43

А. А. Грабовский, канд. техн. наук, И.И. Артемов, д-р техн. наук

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Введение

С ростом транспортного парка связывают рост загрязнения окружающей среды. Основным источником загрязнения являются ДВС. По оценкам специалистов вредные выбросы, приходящиеся на долю транспорта, составляют 1/3 от общего объема.

Анализ многочисленных исследований транспортных ДВС в эксплуатации показывает, что для них характерны, во-первых, частая смена режимов, во-вторых, значительная доля времени работы на режимах холостого хода и малых нагрузках. Так, для двигателей грузовых автомобилей средней грузоподъемности при эксплуатации в городе холостой ход составляет около 20 % времени. При нагрузке, соответствующей 80 % от максимальной, на данном скоростном режиме – около 40 % времени.

Режим холостого хода для двигателей автобусов в городских условиях составляет 30 % от общего времени работы. Загрузка двигателей тракторов типа Т-150К по мощности колеблется в широких пределах: при нагрузке до 50 % двигатель работает примерно 40% времени, столько же – при нагрузке 50-65 % и только 20 % времени – при нагрузке 70 % и выше.

Эти данные говорят о значимости работ, направленных на повышение топливной эффективности двигателей при работе на холостом ходу, переходных режимах и режимах частичных нагрузок. Они, в основном, определяют эксплуатационный расход топлива и являются наиболее весомыми с

точки зрения расхода топлива и вредных выбросов.

Увеличение удельного расхода топлива при работе ДВС на режимах холостого хода, малых нагрузок и переходных процессов в основном определяется ухудшением смесеобразования, увеличением относительных потерь теплоты в охлаждающую жидкость и масло, температура которых на частичных режимах, как правило, понижается. Так же при работе двигателей на малых нагрузках увеличивается относительная доля затрат полезной мощности на преодоление механических сопротивлений, а при работе на холостом ходу вся развиваемая двигателем мощность (15...25 % от расхода по номинальной мощности) расходуется на преодоление трения, газообмен и на привод вспомогательных механизмов. Все отмеченные факторы приводят к тому, что удельный расход топлива при работе двигателя на малых нагрузках и холостом ходу в 1,5...5 раз выше, чем при работе на номинальной мощности, что напрямую определяет значения экологических показателей.

Проблема охраны окружающей среды является одной из глобальных общечеловеческих проблем, от решения которой зависит жизнь на Земле, здоровье человечества. Уменьшение загрязнения атмосферного воздуха токсичными веществами, выделяемыми автотранспортом, является большой частью проблемы защиты окружающей среды. В таблице 1 приведены данные по содержанию токсических веществ в атмосфере.

Таблица 1. Характеристики режима работы двигателя и показатели токсичности в цикле городского движения (данные автополигона НАМИ)

Режим работы двигателя	Доля режимов, %					По расходу топлива
	По времени	По объему ОГ	По выбросам			
			СО	СН	NO	
Холостой ход	39,5	10	13...25	15...18	0	15
Разгон	18,5	45	29...32	27...30	75...86	35
Установившийся режим	29,5	40	32...43	19...35	13...23	37
Замедление	12,8	5	10...13	23...32	0...15	13