

УДК 621.43.068.4

## РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МОДУЛЯ ФИЛЬТРА ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ БЫСТРОХОДНОГО ДИЗЕЛЯ

**А.П. Строков, профессор, д.т.н.,  
А.Н. Кондратенко, аспирант,  
ИПМаш имени А.Н. Подгорного НАН Украины**

*Аннотация.* Сформулированы требования к конструктивным параметрам фильтра твердых частиц дизеля. Проведена предварительная оценка гидравлического сопротивления модуля для нескольких вариантов конструкции фильтра. Сформулированы рекомендации для уточненного расчета гидравлического сопротивления модуля фильтра твердых частиц дизеля.

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

## РОЗРАХУНКОВА ОЦІНКА ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ МОДУЛЯ ФІЛЬТРА ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК ШВИДКОХІДНОГО ДИЗЕЛЯ

**О.П. Строков, профессор, д.т.н.,  
О.М. Кондратенко, аспирант,  
ИПМаш імені А.М. Підгорного НАН України**

*Анотація.* Сформульовано вимоги до конструктивних параметрів фільтра твердих частинок дизеля. Проведено попередню оцінку гідравлічного опору модуля для декількох варіантів конструкції фільтра. Сформульовано рекомендації для уточненого розрахунку гідравлічного опору модуля фільтра твердих частинок дизеля.

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

## ACCOUNTING ESTIMATION OF HYDRAULIC RESISTANCE OF THE FILTER MODULE OF HARD PARTICLES OF HIGH-SPEED DIESEL ENGINE

**A. Strokov, Professor, Doctor of the Technical Sciences,  
A. Kondratenko, postgraduate,  
IPMash im. A. Podgornogo NAN of Ukraine**

*Abstract.* The paper has formulated requirements to the diesel engine hard particles. Preliminary estimation of hydraulic resistance of the module designs has been carried one. Specified recommendations for calculating of hydraulic resistance of the diesel engine hard particles module are given in the article.

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

### Введение

Одной из наиболее важных проблем, стоящих перед специалистами в области дизельных двигателей внутреннего сгорания, является снижение выбросов твердых частиц

(ТЧ) с их отработавшими газами (ОГ), поскольку ТЧ являются носителями канцерогенных веществ, адсорбированных на их поверхности. Именно поэтому на ТЧ вместе с оксидами азота приходится 95 % эквивалентной токсичности компонентов ОГ [1].

Одним из наиболее действенных методов решения этой задачи является очистка ОГ различными устройствами. Основными недостатками конструкций таких устройств являются их дороговизна, нетехнологичность и значительное гидравлическое сопротивление.

### Анализ публикаций

На основе анализа литературных источников и патентного поиска по вопросам современных способов очистки отработавших газов дизелей от ТЧ авторами были предложены новая конструкция и способ функционирования фильтра твердых частиц (ФТЧ) на основе фильтрующего элемента (ФЭ) поверхностно-адсорбционного типа [2]. Ближайшими аналогами являются керамический ФТЧ системы рециркуляции ОГ [3] и ленточный навитой ФТЧ [4]. Предлагаемый ФТЧ имеет существенные отличия в конструкции и способе функционирования.

Способ функционирования такого ФТЧ заключается в том, что при прохождении потока ОГ в полостях ФЭ на их поверхностях будут адсорбироваться и удерживаться ТЧ вплоть до момента регенерации ФТЧ. Сами полости ограничены металлическими пластинами различной формы с нанесенным на их поверхности высокопористым покрытием с большой адсорбционной способностью. Полости сообщаются между собой посредством отверстий цилиндрической формы определенного диаметра. Поэтому поток ОГ в ФЭ самоорганизуется в вихри, омывающие поверхности полостей [2].

### Цель и постановка задачи

Целью данной работы является предварительная оценка гидравлического сопротивления модуля ФТЧ новой конструкции.

Задачей данного исследования является определение геометрических параметров модуля ФТЧ и оценка влияния некоторых из них на его гидравлическое сопротивление.

### Конструкция ФТЧ

ФТЧ состоит из ФЭ и герметичного коробчатого корпуса с соединительными фланцами. ФЭ состоит из одинаковых по конструкции модулей, соединенных между собой не-

разъемно и герметично. Количество модулей при их неизменных геометрических параметрах и параметры соединительных отверстий определяют пропускную способность ФТЧ. Модуль ФЭ состоит из двух одинаковых по конструкции ячеек, соединенных между собой неразъемно пластиной с соединительными отверстиями. Количество, диаметры и расположение осей соединительных отверстий одинаковы для всех мест сопряжения полостей ячеек. Ячейка ФЭ представляет собой неразъемно и герметично соединенные между собой металлические пластины, образующие три герметично отделенные друг от друга полости, имеющие форму призм с прямоугольниками в основании [2].

Для предварительного определения оптимальных геометрических характеристик всего ФЭ необходимо сначала определить их для одного модуля ФЭ. При этом в качестве критериев качества будут выступать: гидравлическое сопротивление ФТЧ и эффективность очистки ОГ от ТЧ.

Поскольку рассматриваемый ФТЧ имеет принципиально новую конструкцию и способ функционирования, точных данных о его эффективности нет, и получить их расчетным путем затруднительно. Они будут получены экспериментальным путем в ходе моторных испытаний быстроходного дизеля 2Ч10,5/12 на моторном стенде. При этом будет использоваться его рабочий прототип, который должен быть изготовлен на основе заранее определенных геометрических параметров ФЭ. Поэтому некоторые из них следует определить исходя из типа дизеля, режима его работы и технологических соображений. Целесообразно принять количество модулей  $i_m$  равное 50. Принимаем количество отверстий на одно сопряжение  $i_d$  равное 6, их целесообразно распределить по площади сопряжения ячеек равномерно.

Единственным геометрическим параметром, значение которого целесообразно варьировать, является диаметр соединительного отверстия  $d_0$ . Исходя из особенностей технологии выполнения отверстий и нанесения покрытия на пластину непосредственно около них, принимаем: верхний предел варьирования  $d_{0 \max} = 3,5$  мм, нижний предел варьирования  $d_{0 \min} = 0,5$  мм, шаг изменения параметра  $\Delta d_0 = 0,5$  мм. На рис. 1 представлен эскиз модуля ФЭ.

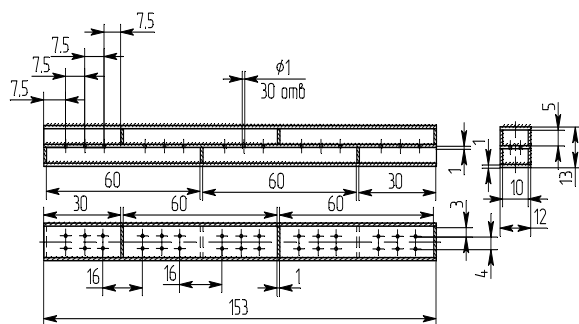


Рис. 1. Эскиз модуля ФЭ

### Математическая модель процесса движения ОГ в модуле ФЭ

Для выполнения математического моделирования газодинамических процессов в модуле ФТЧ согласно его эскизу (рис. 1) синтезирована исходная геометрия для каждого значения диаметра соединительных отверстий в системе графического проектирования SolidWorks2006.

В среде COSMOSFlowWorks сгенерирована расчетная область в виде параллелепипеда, включающего в себя область, занятую текучей средой, и неподвижное тело, в котором текучая среда будет двигаться. Расчетная область автоматически разбивается расчетной сеткой, с учетом настроек базовой сетки, разрешения особенностей геометрии в пределах расчетной области, для чего при необходимости самопроизвольно локально дробятся ее ячейки [5].

В COSMOSFlowWorks движение и теплообмен текучей среды моделируется с помощью уравнений Навье - Стокса, описывающих в нестационарной постановке законы сохранения массы, импульса и энергии этой среды. Кроме того, используются уравнения состояния компонентов текучей среды, а также эмпирические зависимости вязкости и теплопроводности этих компонентов среды от температуры. Расчет движения и теплообмена текучей среды выполняется методом конечных объемов [5].

При выполнении расчета приняты следующие допущения:

1) не учитывается наличие ТЧ в потоке ОГ (а значит, не учитывается явление витания ТЧ, обусловленное малыми скоростями потока и парусностью ТЧ, явление коагуляции ТЧ, обусловленное многократным изменением

направления движения потока ОГ, а также изменение геометрии ячейки, обуславливаемое осаждением на ее стенках ТЧ); 2) не учитывается шероховатость стенок внутренних полостей ячеек; 3) не учитываются явления теплообмена; 4) предполагается, что температура текучей среды не изменяется; 5) не учитывается наличие сварочных швов и соединительных деталей, изменяющих геометрию ячейки модуля ФЭ; 6) предполагается, что ФТЧ установлен в самом конце выпускного тракта, а истечение текучей среды происходит в атмосферу; 7) в качестве текучей среды принят воздух с параметрами идеального газа; 8) базовая расчетная сетка имеет равномерный шаг; 9) корпус ФТЧ моделируется с помощью дополнения модели геометрии модуля ФЭ буферными объемами на входе и выходе. Их параметры приняты из конструктивных соображений. Граничные условия задаются в сечениях на входе и выходе из этих объемов; 10) не учитывается влияние гравитации.

В качестве граничных условий выбраны:

1) в сечении буферного объема на входе в модуль:

а) секундный массовый расход текучей среды через модуль ФЭ. В качестве характерного режима работы дизеля, в ходе моторных испытаний которого будут определены экспериментальным путем параметры эффективности рабочего прототипа ФТЧ, принимаем номинальный режим, т.к. он характеризуется максимальным расходом ОГ. Секундный массовый расход ОГ через модуль ФЭ при  $i_m=50$  равен 0,0011 кг/с [7];

б) температура текучей среды на входе в ФТЧ  $t_{ог}$ . Принимаем  $t_{ог}=t_0=293$  К;

в) приблизительное давление текучей среды на входе в ФТЧ. Принимаем  $p_{ог}=0,2$  МПа.

2) в сечении буферного объема на выходе из модуля: параметры окружающей среды.

Так как режим работы дизеля принимается как установившийся, необходимость задания начальных условий по времени отсутствует. В качестве начальных условий выступают параметры окружающей среды. Исходная геометрия, границы расчетной области, базовая расчетная сетка и граничные условия на входе и выходе из модуля показаны на рис. 2.

Особенности расчетной сетки показаны на рис. 3 и 4.

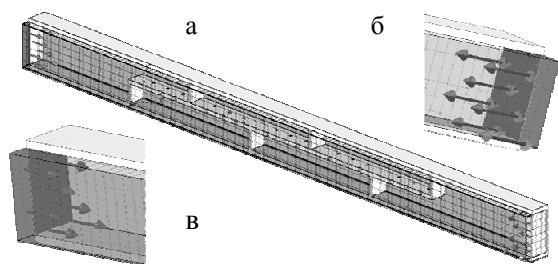


Рис. 2. Исходная геометрия, границы расчетной области, базовая расчетная сетка (а) и граничные условия на входе (в) и выходе (б) из модуля

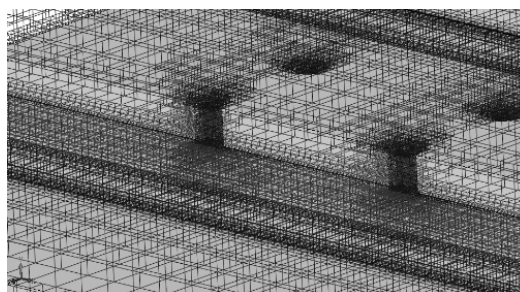


Рис. 3. Расчетная сетка (изометрия)

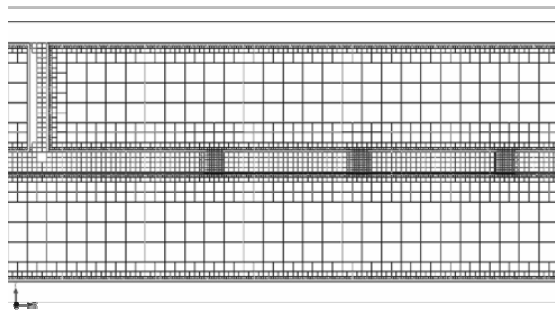


Рис. 4. Расчетная сетка (в сечении)

### Результаты расчета

Результаты расчета сведены в табл. 1. По данным табл. 1 построена зависимость гидравлического сопротивления модуля ФЭ от диаметра соединительных отверстий при неизменном количестве и расположении соединительных отверстий. Эта зависимость представлена на рис. 6.

Траектории движения потока ОГ и картина распределения давления ОГ в продольном сечении, проходящем через оси соединительных отверстий в модуле для варианта с диаметром соединительных отверстий 1,0 мм, представлены на рис. 5.

Графики распределения давления ОГ в представленном на рисунке 5 сечении вдоль линий в ячейке №2 модуля ФТЧ представлены на рисунке 7. Линия №1 проходит по середине высоты модуля, линия №2 – в 1/4 высоты ячейки от стенки с соединительными отверстиями, линия №3 – в 3/4 высоты ячейки от стенки с соединительными отверстиями, линия №4 – в 0,5 мм от стенки с соединительными отверстиями, линия №5 – в 0,5 мм от стенки, противоположной стенке с соединительными отверстиями.

На рис. 7 видно, что в областях ячейки, расположенных вблизи входных соединительных отверстий и стенки ячейки без отверстий, наблюдаются зоны с повышенным давлением, а в областях ячейки, расположенных вблизи стенки с входными и выходными соединительными отверстиями, наблюдаются зоны с пониженным давлением.

Таблица 1 Гидравлическое сопротивление модуля ФЭ

Диаметр соединительного отверстия	Количество соединительных отверстий	Суммарная площадь проходного сечения соединительных отверстий	Максимальное давление в модуле	Минимальное давление в модуле	Перепад давления в модуле
мм	-	мм <sup>2</sup>	Па	Па	Па
0,5	6	1,1781	234382	90616	143766
1,0	6	4,7124	233570	91092	142478
1,5	6	10,6029	140137	97983	42154
2,0	6	18,8496	115865	99658	16207
2,5	6	29,4525	108367	100079	8288
3,0	6	42,4116	105603	100463	5140
3,5	6	57,7269	104408	100984	3424

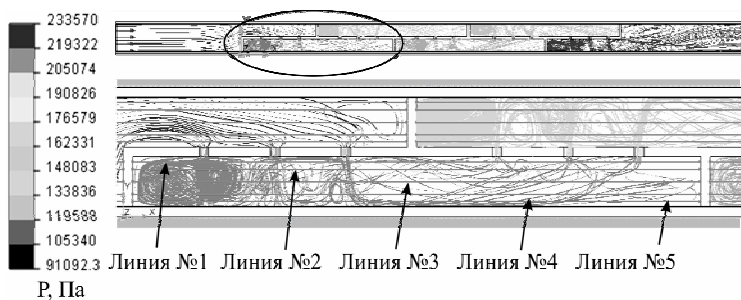


Рис. 5. Траектории движения потока ОГ и картина распределения давления ОГ

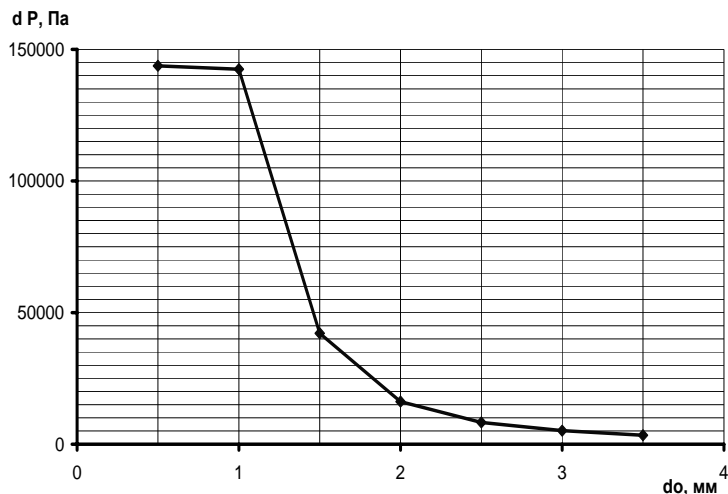


Рис. 6. Зависимость гидравлического сопротивления модуля ФЭ от диаметра соединительных отверстий

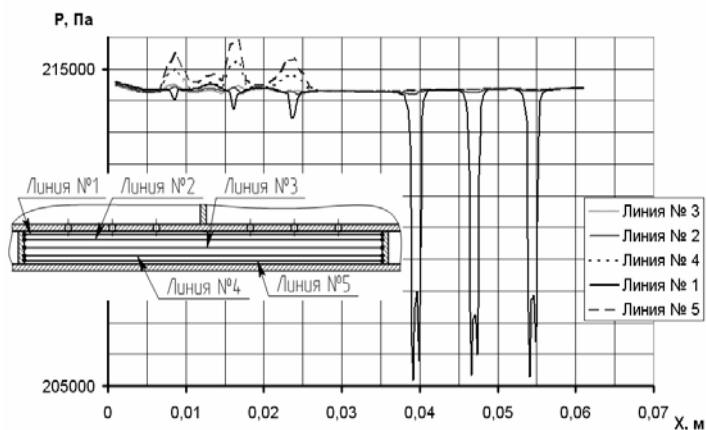


Рис. 7. Графики распределения давления ОГ по высоте ячейки

### Выводы

Как можно увидеть из результатов расчета, модуль ФЭ с такими геометрическими параметрами соединительных отверстий обладает значительным гидравлическим сопротивлением. Значение гидравлического сопротив-

ления достигает приемлемых величин лишь при диаметре соединительного отверстия 3,5 мм. Оптимальным значением диаметра соединительного отверстия, с точки зрения технологичности конструкции модуля ФЭ, является 1,0 мм. Это обусловлено тем, что отверстия диаметром менее 1,0 мм получить

в таком количестве затруднительно с приемлемым уровнем качества и низкой себестоимостью. Также такие отверстия больше подвержены засорению. Отверстия диаметром более 1,0 мм, как видно из результатов расчета, целесообразно выбирать не менее 3,5 мм, что отрицательно скажется на характере течения ОГ в полостях модуля ФЭ и тем самым снизит его эффективность.

При этом целесообразным представляется увеличение количества соединительных отверстий до 25–50 на одно место сопряжения ячеек модуля ФЭ, при сохранении диаметра отверстий 1 мм.

Целесообразным является проведение уточненного расчета гидравлического сопротивления модуля ФЭ с принятым диаметром соединительных отверстий, варьируя их количество. При этом для улучшения достоверности моделирования газодинамических процессов в модуле ФЭ, необходимо отказаться от некоторых принятых ранее допущений, а именно: 1) сгустить базовую расчетную сетку; 2) в качестве текучей среды принять ОГ дизеля с соответствующими теплофизическими свойствами; 3) учитывать шероховатость стенок и явления теплообмена в модуле; 4) задавать экспериментально полученные значения давления и температуры ОГ на входе и выходе из модуля.

При этом возникают трудности технологического характера в нанесении покрытия на соединительную пластину модуля ФЭ. При таком увеличении количества отверстий резко уменьшается площадь соединительной пластины, пригодная для нанесения покрытия. Поэтому во избежание засорения отверстий от налипания на их кромки ТЧ целесообразным представляется отказ от нанесения покрытия на соединительную пластину.

Для регенерации ФТЧ иностранного производства обычно потребляют топливо, подаваемое дополнительно в выпускной тракт дизеля. Расход топлива во время процесса регенерации увеличивается на режимах с минимальной нагрузкой до 40 % от эффективного расхода топлива и до 15 % – на номинальном режиме. Однако ввиду малой длительности процесса регенерации ФТЧ увеличивает расход топлива ТС в среднем на 1–3 % [8]. Энергопотребление системы реге-

нерации ФТЧ предлагаемой конструкции, предположительно, не будет превышать этих значений.

### Литература

1. Каніло П.М. Автомобіль та навколишнє середовище / П.М. Каніло, І.С. Бей, О.І. Ровенський. – Харків : Прапор, 2000. – 304 с.
2. Строков А.П. Современные методы очистки отработавших газов дизелей от твердых частиц / А.П. Строков, А.Н. Кондратенко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2010. – №2. – С. 99–104.
3. Low pressure EGR system for diesel engines Пат. US 6,301,887 В1 США, МПК<sup>7</sup> F 02 В 33/44, Gorel, Alexander; Calabrese, John Lawrence; заявитель и патентообладатель Engelhard Corporation, Iselin, NJ (US); заявл. 2000-03-26; опубл. 2001-10-01;
4. Catalyst substrate support Пат. US 7,655,194 В2 США, МПК<sup>7</sup> В 01 D 50/00, В 01 D 53/34 Muter, John P.; заявитель и патентообладатель DCL International Inc. (US); заявл. 2005-01-18; опубл. 2010-02-02;
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. Двигатель Д21А1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ВТФ Владимирец СССР. – М. : Внешторгиздат. Изд. № 3288А. ВТИ. – 36 с.
7. Разработка технологии конвертации дизеля средней мощности в газовый двигатель с искровым зажиганием: отчет НИР (заключительный) / ИПМаш НАНУ; рук. А. Левтеров. – 2002. – 83 с. – № ГР 0102U001477.
8. A. Schilling. Simulation of DPF regeneration strategies: Liebherr GT-SUITE Users Conference, Frankfurt a. M., 20.10.2008. [Электронный ресурс] / A. Schilling, Dr. R. Röthlisberger. – Режим доступа: [http://www.gtisoft.com/archive/confarch/Liebherr\\_DPF\\_Regeneration.pdf](http://www.gtisoft.com/archive/confarch/Liebherr_DPF_Regeneration.pdf).

Рецензент: Ф.И. Абрамчук, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 10 июня 2011 г.