

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫГОРАНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В СТРУКТУРЕ ДИЗЕЛЬНОГО САЖЕВОГО ФИЛЬТРА

Ю.И. Шеховцов, аспирант,

Л.С. Заиграев, канд. техн. наук, доцент,

Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, г. Луганск, Украина

Общая постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами

Современные экологические характеристики дизельных двигателей по выбросам с отработавшими газами (ОГ) твердых частиц (ТЧ) обеспечиваются с помощью дизельных сажевых фильтров (СФ), устанавливаемых в системе выхлопа. Требования, предъявляемые к фильтрам заключаются в выполнении ряда условий, таких, как: высокая эффективность улавливания ТЧ нанометрического диапазона, допустимое гидравлическое сопротивление фильтрующего слоя и скорость его нарастания, надежная и дешевая регенерация фильтрующих поверхностей СФ, невысокие градиенты температур, возникающих при выгорании ТЧ в СФ.

Особое значение приобрели последние три условия, определяющие надежность и долговечность работы СФ и сложность его системы регенерации. Прогнозирование состояния фильтрующего элемента (ФЭ) необходимо осуществлять уже в период проектирования системы очистки ОГ от ТЧ для транспортных дизелей с учетом особенностей их эксплуатации. На этой основе проводится выбор стратегии регенерации СФ.

Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем

Моделирование процесса выгорания углеродистой массы ТЧ — сажи - является неотъемлемой частью исследований СФ. Исследования зарубежных авторов в этой области представлены моделями для СФ сотовой конструкции, получивших распространение для транспортных дизелей ввиду своей компактности. При этом существенными их недостатками являются высокая скорость нарастания и величина противодавления, достигающая 11...15 кПа. Эти недостатки от-

сутствуют у СФ с зернистым ФЭ с электромеханическим способом улавливания ТЧ. Эффективность электромеханического СФ с зернистым слоем в начальный момент включения в работу фильтра принимает высокие значения около 80...85 % [1] в отличие от сотовых фильтров, у которых начальная эффективность составляет не более 60 % [2].

Современные электрические системы нейтрализации токсичных компонентов ОГ дизелей, в том числе и ТЧ, работают также по принципу образования активных молекул-радикалов, которые участвуют в окислении токсикантов на каталитическом покрытии, нанесенном на поверхность зернистого слоя небольшой толщины. В основе этого метода лежит механизм организации нетермической плазмы с помощью электрического барьерного разряда [3]. Подобные процессы происходят и в электромеханическом СФ при коронирующем разряде.

Для проектного и прогностического исследования комплексных электрических систем нейтрализации токсикантов ОГ дизелей с зернистым слоем отсутствуют модели позволяющие учитывать особенности процесса выгорания сажи в зернистой структуре ФЭ. А существующие модели для сотовых СФ не учитывают особенностей теплопередачи, накопления и выгорания ТЧ в зернистом слое.

Цель исследований

Целью работы являются результаты разработки математической модели процесса выгорания сажи в структуре зернистого ФЭ СФ на базе модельных исследований фильтров сотовой конструкции и теоретического исследования с помощью разработанной модели регенерации СФ.

Результаты исследований

Анализ моделей для фильтров сотовой конструкции показал, что в качестве основного уравнения баланса энергии используется уравнение нестационарной теплопроводности для стенки ФЭ с источником тепловыделения, например, в работе [4] приведено следующее уравнение:

$$\frac{\partial Q_{\text{вн}}}{\partial t} = H_{\lambda} + H_{\alpha} + H_p. \quad (1)$$

Здесь $Q_{\text{вн}}$ - внутренняя энергия стенки и слоя сажи. Вклад теплопроводности H_{λ} определяется выражением:

$$H_{\lambda} = -\lambda_c \frac{\partial}{\partial z} \left(w \frac{\partial t_{\text{ст}}}{\partial z} \right) - \lambda_{\text{ст}} w_{\text{ст}} \frac{\partial^2 t_{\text{ст}}}{\partial z^2}, \quad (2)$$

где λ_c и $\lambda_{\text{ст}}$ - коэффициенты теплопроводности сажи и стенки соответственно;

w и $w_{\text{ст}}$ - толщина слоя сажи и стенки ФЭ соответственно;

z - координата вдоль стенки ФЭ.

Теплоотдача учитывается слагаемым H_{α} :

$$H_{\alpha} = \alpha_1 (t_1 - t_{\text{ст}}) + \alpha_2 (t_2 - t_{\text{ст}}), \quad (3)$$

где α_1 и α_2 - коэффициенты теплоотдачи от ОГ к стенке, соответственно, по ходу течения ОГ на входе в стенку и выходе из нее;

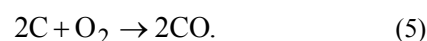
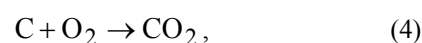
t_1 и t_2 - температура ОГ перед стенкой ФЭ и после нее соответственно;

$t_{\text{ст}}$ - температура стенки и слоя ТЧ.

Скорость тепловыделения от выгорания сажи H_p определяется законом Аррениуса для скорости окисления углерода кислородом. По толщине слоя ФЭ скорость тепловыделения в каждый момент времени является величиной переменной и будет зависеть от распределения ТЧ по структуре ФЭ, концентрации окислителя и термодинамического состояния ФЭ и накопленной в нем сажи.

Для зернистого ФЭ распределение ТЧ по толщине слоя ФЭ имеет экспоненциальный вид и определяется влиянием механизмов улавливания ТЧ с СФ.

В основу модели выгорания сажи в слое дизельного СФ с зернистым ФЭ положен механизм окисления по реакциям:



Реакции (4) и (5) являются итоговыми как для термического механизма взаимодействия углерода с кислородом, так и для каталитического.

При моделировании основными параметрами, характеризующими процесс регенерации, являются: температура газового потока (t), температура слоя (t_c), относительная объемная концентрация кислорода (r), масса сажи (m_c), перепад давления фильтрующего слоя (Δp).

Изменение температуры потока ОГ по толщине зернистого слоя ФЭ определяется из решения уравнения энергии для потока ОГ. При незначительных колебаниях давления процесс можно считать изобарным, поэтому уравнение энергии запишется через изменение энтальпии потока ОГ, равное потоку тепла, отдаваемого или воспринимаемого газом посредством теплоотдачи [5]:

$$\frac{GC_p}{\omega} \frac{\partial t}{\partial \tau} + GC_p \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha A_c (t - t_c); \quad (6)$$

где τ - время;

x - координата по толщине слоя;

G - массовый расход потока ОГ;

C_p - удельная изобарная теплоемкость ОГ;

ω - скорость потока ОГ в живом сечении ФЭ;

α - коэффициент теплоотдачи для системы поток ОГ - зернистый слой;

A_c — поверхность теплоотдачи на единицу длины слоя.

Определить температуру в i -м слое зернистого ФЭ можно из уравнения:

$$\rho_c C_c V_c \frac{\partial t_c}{\partial \tau} = H_p + \alpha F_c (t - t_c), \quad (7)$$

где ρ_c - насыпная плотность зернистого слоя;

C_c - массовая теплоемкость зернистого слоя;

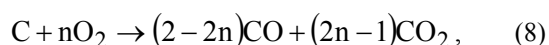
V_c - объем i -го слоя ФЭ;

F_c - поверхность теплоотдачи.

Уравнение (7) имеет более простой вид, чем уравнение нестационарной теплопроводности для тела шарообразной формы. Здесь отсутствуют частные

производные второго порядка, поэтому численное решение уравнения (7) существенно проще осуществляется, чем решение уравнения теплопроводности. На точность решения вид уравнения энергии (7) практически не влияет. Результаты решения по этим уравнениям отличаются на 1...3 % и зависят от способа осреднения размера шарообразного тела.

Поглощение кислорода в ходе регенерации можно определить, например, по способу описанному в работе [4]. Для этого уравнения реакции (4) и (5) запишем в следующем виде:



где $n = 1 - f_{CO}/2$ - удельное количество кислорода, участвующего в окислении сажи.

Здесь f_{CO} - избирательность окисления углерода сажи по реакции (5), определяемая по зависимости:

$$f_{CO} = \frac{1}{1 + K_{S1}/K_{S2}}, \quad (9)$$

где K_{S1} и K_{S2} - удельная скорость выгорания сажи по реакции (4) и (5).

В общем случае в фильтрах с каталитическим покрытием выгорание сажи протекает по термическому и каталитическому механизмам. Поэтому поглощение кислорода в каждом i -м слое ФЭ определится по выражению:

$$\Delta r = \Delta r_1 + \Delta r_2 = r_0 \left[2 - \exp\left(-\frac{\beta n_1 k_1 F_1 \rho}{G}\right) - \exp\left(-\frac{\beta n_2 k_2 F_2 \rho}{G}\right) \right], \quad (10)$$

где r_0 - концентрация O_2 на входе в i -й слой ФЭ;

Δr_1 и Δr_2 - поглощение кислорода по каталитическому и термическому механизмам;

$\beta = M_O/M_C$ - отношение молярных масс соответственно кислорода и углерода;

n_1 и n_2 - удельное количество кислорода, участвующего в каталитической и термической реакциях;

k_1 и k_2 - константы скорости реакций по каталитическому и термическому механизмам;

F_1 и F_2 - поверхность реакции для каталитической и термической реакций;

ρ - плотность ОГ.

Тепловой эффект реакции от выгорания сажи H_p в уравнении (7) определяется по выражению:

$$H_p = Q_{p1}G \frac{M_C \Delta r_1}{M n_1} + Q_{p2}G \frac{M_C \Delta r_2}{M n_2}, \quad (11)$$

где Q_{p1} и Q_{p2} - удельные тепловые эффекты каталитической и термической реакций;

M - молярная масса ОГ.

Баланс количества движения для ФЭ ввиду сложности решения общей задачи сводится к уравнению для перепада давления, которое устанавливает связь между тепловыми потерями и трением среды.

Перепад давления в сотовых фильтрах определяется гидравлическим сопротивлением пористой стенки ФЭ. Величина перепада давления в этом случае описывается законом Дарси. В случае зернистого слоя это уравнение неприемлемо. Необходимо использовать зависимости для зернистого слоя, которые можно представить в известном виде:

$$\Delta p = \zeta_t \frac{\rho_{cp} \omega_{cp}^2}{2}, \quad (12)$$

где ζ_t - коэффициент сопротивления для зернистого слоя и сажи с учетом изменения температуры;

ρ_{cp} - плотность газового потока, рассчитанная по среднеарифметической температуре t_{cp} потока ОГ вдоль слоя;

ω_{cp} - скорость потока перед зернистым ФЭ, взятая по среднеарифметической температуре t_{cp} потока ОГ вдоль слоя.

Численное решение системы уравнений (6), (7), (10), (12) возможно при задании соответствующих начальных и краевых условий. Результаты моделирования позволяют оценивать влияние на процесс регенерации таких факторов, как температура и массовый расход ОГ, начальная температура слоя, концентрация кислорода в ОГ, масса накопленной сажи и характер ее распределения по слою, а также исследовать динамику процесса регенерации при изменении перечисленных факторов.

Результаты расчетного моделирования регенерации зернистого СФ с объемом ФЭ 12,7 л (фильтрация через стенку цилиндра) для случая изменения расхода

ОГ представлены на рисунке при начальной температуре слоя по толщине 350 °С, температуре ОГ на входе СФ 700 °С, толщине ФЭ 30 мм. Начальное количество сажи в слое 112 г, из них 12 г контактирует с катализатором. Результаты моделирования температуры слоя представлены для слоя ФЭ, расположенного на расстоянии 5...10 мм от входа в ФЭ по потоку ОГ.

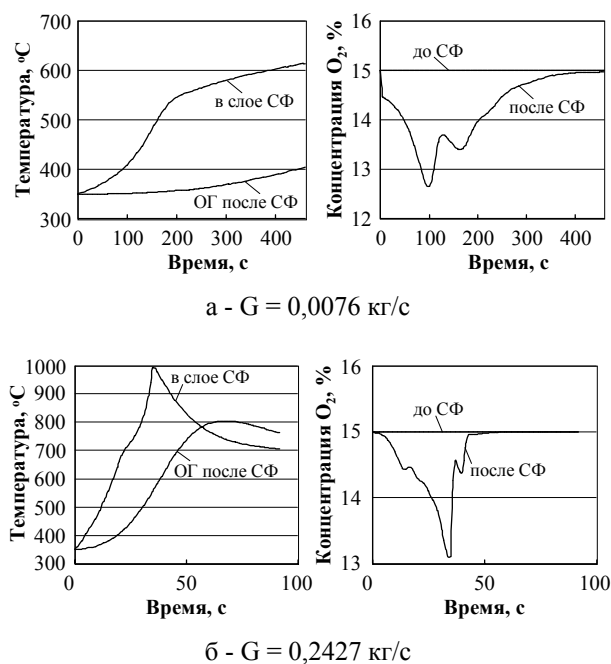


Рис. 1. Результаты моделирования регенерации ФЭ

Перспективы дальнейших исследований

Рассмотренная модель может применяться для исследований как зернистых фильтров, так и фильтров сотовой конструкции. Модель без существенных изменений в ней может применяться при исследовании механизмов окисления дизельной сажи, отличных от механизма, осуществляемого по реакциям (4) и (5), например, система CRT.

Выводы

Предложенная модель выгорания сажи в зернистом слое ФЭ дизельного СФ учитывает процессы теплообмена между ОГ и ФЭ, геометрию фильтрующего слоя, распределение ТЧ по ФЭ и закон тепловыделения, влияние факторов регенерации и может использоваться при проектировании систем нейтрализа-

ции для дизелей различного назначения. На основе результатов расчетного эксперимента можно подбирать оптимальные варианты системы регенерации осадительных поверхностей зернистых фильтров и режимы работы двигателя при экстренной регенерации.

Литература

1. Исследование эффективности электромеханического фильтра при повышенных температурах / Л.С. Заиграев, А.С. Попов, И.П. Васильев, А.М. Красносельский // Экология двигателя и автомобиля: Сб. науч. тр.- М.: НАМИ, 1998.- С.39-46
2. Заиграев Л.С., Попов А.С. Анализ конструкций систем очистки отработавших газов дизельных двигателей от твердых частиц // Экология: Сб. науч. тр. ВУНУ им. В. Даля и Познаньского технического университета.- 2002.- № 2.- С. 57 - 65.
3. Non-Thermal Plasma System Development for CIDI Exhaust Aftertreatment / M.L. Balmer, R. Tonkyn, G. Maupin, S. Yoon, A. Kolwaite, S. Barlow, N. Domingo, J. Storey, J. Hoard, K. Howden // SAE Techn. Pap. Ser.- 2000.- № 2000-01-1601.- P. 1-7.
4. Konstandopoulos A.G., Kostoglou M. Periodically Reversed Flow Regeneration of Diesel Particulate Traps // SAE Techn. Pap. Ser.- 1999.- №1999-01-0469.- 14 p.
5. Кошкин В.К., Калинин Э.К. Теплообменные аппараты и теплоносители.- М.: Машиностроение, 1971.— 200 с.

Поступила в редакцию 25.05.03

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Ю.А. Куликов, каф. «Автомобили» ВНУ им. Даля, г. Луганск; В.Н. Кошель нач. гос. управления экологии и природных ресурсов в Луганской обл. г. Луганск.