

Расчетно-экспериментальный анализ процесса межэлектродного дожига частиц дизельной сажи при работе электрофильтра-дожигателя

Wpłynęło 17.12.2015 r.
Zrecenzowano 21.01.2016 r.
Zaakceptowano 18.02.2016 r.

A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

Анатоли Николаевич КАРТАШЕВИЧ^{1) ADEF},
Владимир Алексеевич БЕЛОУСОВ^{1) BDEF},
Jan Radosław KAMIŃSKI^{2) BDEF}, *Zbigniew KOGUT*^{3) BDEF}

¹⁾ *Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, Горки, Беларусь*

²⁾ *Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Inżynierii Produkcji, Katedra Maszyn Rolniczych i Leśnych, Warszawa*

³⁾ *Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach, Mazowiecki Ośrodek Badawczy w Kludzienku*

Do cytowania For citation: Kartashevich A. N., Belousov W. F., Kamiński J.R., Kogut Z. 2016. Расчетно-экспериментальный анализ процесса межэлектродного дожига частиц дизельной сажи при работе электрофильтра-дожигателя [Design-experiment analysis of interelectrode burning of diesel soot particulates in an electrical filter-afterburner]. *Problemy Inżynierii Rolniczej*. Z. 4 (94) s. 77–90.

Резюме

Теоретически рассмотрен вопрос межэлектродного дожига частиц дизельной сажи, накопленной между осадительными электродами, при работе сажевого электрофильтра-дожигателя. Составленный тепловой баланс сажевого элемента позволил получить дифференциальное уравнение нагрева. Решение дифференциального уравнения нагрева выполнено численными методами, а при условии кратковременного нагрева и начальной температуре образца более 600 K, аналитически. Предложена теория развития процесса межэлектродного дожига частиц дизельной сажи, где установлено, что в процессе начального поджига присутствует ионизационная форма пробоя.

Ключевые слова: мотор дизель, электрофильтр-дожигатель, электрода, процесс дожига

Введение

В выхлопных газах дизелей находятся частицы сажи [KAMIŃSKI и др. 2015; KARTASHEVICH, KUKHARENOK 2011; RYMASZEWSKI 2007]. Актуально используется разные методы ограничения дымности согласно с нормами Stage IIIB и Stage IV

[KRUCZYŃSKI и др. 2014; MYSZKOWSKI 2015]. Очистка отработавших газов (ОГ) автотракторных дизелей электрофильтром-дожигателем является одним из наиболее эффективных методов улавливания содержащихся в них сажевых частиц [KARTASHEVICH и др. 2013; 2015]. Образование слоя частиц на осадительном электроде требует периодического удаления осевших частиц, так как при достаточно большой толщине слоя (при соответствующих конструктивных решениях) увеличивается аэродинамическое сопротивление электрофильтра, а также, при недостаточном значении сил адгезии, может произойти отрыв слоя осевших частиц от поверхности электрода. Удаление слоя осевших частиц возможно различными способами, в частности, термической регенерацией.

Анализ и результаты исследований

Количество тепла, необходимое для увеличения теплосодержания слоя частиц, определяется следующим выражением:

$$dQ_1 = c\gamma_{cl} \frac{\delta\vartheta}{d\tau} dV_{cl} d\tau \quad (1)$$

где:

dQ_1 = количество тепла, необходимого для разогрева частиц [Дж];

c = удельная теплоемкость осевших частиц сажи [Дж·кг⁻¹·К⁻¹];

γ_{cl} = плотность [кг·дм⁻³];

dV_{cl} = объём сажевого отложения [дм³];

$d\tau$ = время разогрева [с];

$\delta\vartheta$ = температура в данной точке сажевого отложения [К].

В процессе термической регенерации осадительных электродов, необходимое количество тепла можно подвести различными способами в зависимости от выбранного типа системы регенерации.

Рассмотрим нестационарный процесс нагрева образовавшегося слоя частиц сажи при одномерном тепловом потоке. Допустим, что образовавшийся на электродах слой частиц сажи представляет собой "мостик", соединяющий противоположные электроды, и является однородным изотропным телом. Он обладает постоянной, определенной длиной, а также площадью поперечного сечения, близкой к кругу. Основными теплофизическими параметрами тела являются: плотность слоя частиц γ_{cl} ; удельная теплоемкость c ; коэффициент теплопроводности λ ; удельное объемное электросопротивление ρ_v , причем значения c и ρ_v зависят от температуры. В процессе нагрева за время от $\tau_{нач} = 0$ до $\tau_{кон}$ необходимо нагреть, образовавшийся "мостик" сажи от температуры $\vartheta_{нач}$ до $\vartheta_{кон}$, при этом теплофизические параметры газа $\vartheta_{ог}$, окружающего тело, постоянны как в объеме, так и на границе тела. При решении задачи нами условно принято, что отсутствует перепад температуры в плоскости любого сечения тела, т.е.:

$$\partial\vartheta/\partial y = \partial\vartheta/\partial z = 0; \quad \partial^2\vartheta/\partial y^2 = \partial^2\vartheta/\partial z^2 = 0$$

Принятое допущение будет справедливо в случае межэлектродного дожига, теплом, выделяющимся при прохождении электрического тока (Джоулево

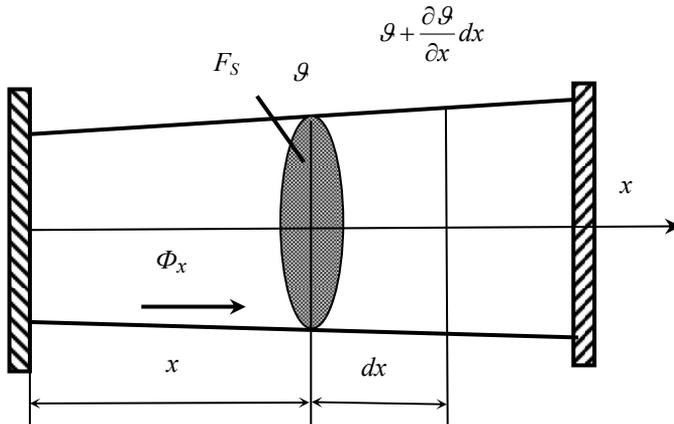
тепло). В других случаях нагрева (электроподогрев, пламенная регенерация и др.) справедливость принятого допущения не совсем приемлема.

Таким образом, имеем однородный элемент, состоящий из сажевых частиц, площадью поперечного сечения F_S и длиной dx , расположенный на расстоянии x от поверхности осадительного электрода (рис. 1). Пусть ось Ox совпадает с осью образовавшегося "мостика" сажи, а начало оси расположено на поверхности одного из осадительных электродов. Составим тепловой баланс элемента dx с учетом осевого перепада температур. Температуры нагрева сечений, ограничивающих участок dx , равны ϑ и $\vartheta + (\frac{\partial \vartheta}{\partial x})dx$. Количество тепла, входящее в элемент dx за время $d\tau$ можно найти по закону Фурье:

$$dQ_x = \Phi_x d\tau = -\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} F_S d\tau \quad (2)$$

где:

Φ_x = тепловой поток [Вт·м⁻²].



Источник: разработка авторов. Source: own elaboration.

Рис. 1. Схема дифференциального уравнения нагрева частиц сажи
Fig. 1. Diagram of the differential equation describing the heating of the soot

Количество тепла, выходящее из элемента dx за время $d\tau$:

$$dQ_{(x+dx)} = -\lambda \frac{\partial \left(\vartheta + \frac{\partial \vartheta}{\partial x} dx \right)}{\partial x} F_S d\tau = -\lambda F_S \frac{\partial \vartheta}{\partial x} d\tau - \lambda F_S \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} dx d\tau$$

Тогда, количество тепла которое осталось в элементе dx за время $d\tau$:

$$dQ_2 = dQ_x - dQ_{(x+dx)} = \lambda \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} F_S dx d\tau \quad (3)$$

Изменение теплосодержания элемента dx , равное суммарному количеству тепла dQ_2 , определяется не только теплоотдачей к поверхности электродов, но и неодинаковым по длине мостика сечением F_S .

Количество тепла, отданное элементом dx за время $d\tau$ в отработавших газах (ОГ) через поверхность площадью S_F равно:

$$dQ_3 = k_T S_x (\vartheta - \vartheta_{OG}) dx d\tau \quad (4)$$

где:

S_x = периметр сечения F_S [м].

Количество прироста тепла в элементе dx за счет интенсивности внутренних источников тепла равно:

$$dQ_4 = q_\delta F_S dx d\tau \quad (5)$$

где:

q_δ = интенсивность внутренних источников тепла; $q_\delta = k_d \delta_i^2 \rho_v$ = для случая нагрева Джоулевым теплом;

δ_i = средняя плотность тока, $\delta_i = I/F_S$;

I = сила тока, проходящего через "мостик" сажи [А];

$k_d = R_{\perp}/R_{\parallel}$ = отношение сопротивлений при переменном и постоянном токе; $k_d = 1$, т.к. ρ_v определялось опытным путем.

Тепловой баланс элемента dx имеет следующий вид:

$$dQ_1 + dQ_2 + dQ_3 - dQ_4 = 0 \quad (6)$$

В уравнении (6) не учтено количество тепла, выделяемое при окислении сажевых частиц. Так как данное количество тепла имеет место при интенсивном горении сажевых частиц [GOLOVINOY (ред.) 1963; КНИТРИН 1957; РОМОНАСЕВ (ред.) 1973], поэтому в случае разогрева и начального периода горения учитывать его не будем.

Тогда согласно (6) с учетом (1), (3), (4), (5) имеем:

$$\lambda \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + c \gamma_{ca} \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} + k_T \frac{S_x}{F_S} (\vartheta - \vartheta_{OG}) - \delta_i^2 \rho_v = 0 \quad (7)$$

Так как в процессе нагрева меняются теплофизические свойства сажи, то уравнение (7) в окончательном виде необходимо записать следующим образом:

$$\lambda(\vartheta) \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + c(\vartheta) \gamma_{ca}(\vartheta) \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} + k_T(\vartheta; \vartheta_{OG}) \frac{S_x}{F_S} (\vartheta - \vartheta_{OG}) - \delta_i^2 \rho_v(\vartheta) = 0 \quad (8)$$

Полученное нами дифференциальное уравнение нагрева (8) описывает изменение температуры нагрева образовавшегося "мостика" сажи как по длине, так и во времени. Уравнение не имеет аналитического решения в элементарных

функциях, даже при условии постоянства температуры поперечного сечения F_S по всей длине, в начальный момент времени $\tau = 0$.

Решим уравнение численными методами, при условии отсутствия осевого перепада температур, т.е. $\partial \vartheta / \partial x = 0$, $\partial^2 \vartheta / \partial x^2 = 0$. Данное условие выполнимо исходя из следующих допущений: во-первых, образовавшийся мостик сажи имеет одинаковое поперечное сечение по всей длине; во-вторых, отсутствие теплового обмена между мостиком и электродами. В результате интерполирования опытных данных по определению температурной зависимости удельной теплоемкости и удельного электрического сопротивления получены следующие зависимости [KARTASHEVICH и др. 2000]:

$$c = c_0 - c_1 e^{-\beta \vartheta} \quad (9)$$

$$\rho_v = \rho_0 e^{-\alpha \vartheta} \quad (10)$$

где:

$c_0, c_1, \beta, \rho_0, \alpha$ = численные коэффициенты, определяемые экспериментально.

Значение суммарного коэффициента теплоотдачи k_T принимаем средним для интервала разогрева сажевых частиц от $\vartheta_{нач}$ до $\vartheta_{кон}$, т.е. $k_T = (k_T(\vartheta_{нач}) + k_T(\vartheta_{кон}))/2$. Граничные значения коэффициента теплоотдачи определяем, используя критериальные уравнения теплообмена:

$$\left. \begin{aligned} Nu &= C_T Re^\sigma Pr^\chi \\ Nu &= C_T (GrPr)^\chi \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где:

Nu = критерий Нуссельта [-];

Re = критерий Рейнольдса [-];

Gr = критерий Грасгофа [-];

Pr = критерий Прандтля [-];

C_T, χ, σ = численные коэффициенты.

Первое уравнение системы (11) характеризует конвективный теплообмен при вынужденном движении газа. Второе – при естественной конвекции.

На основе вышесказанного имеем дифференциальное уравнение нагрева:

$$\frac{d\vartheta}{d\tau} = \frac{I^2 \rho_0 e^{-\alpha \vartheta} - k_T S_x F_S (\vartheta - \vartheta_{ог})}{F_S^2 \gamma_{сж} (c_0 - c_1 e^{-\beta \vartheta})} \quad (12)$$

В уравнении (12) значение силы тока находим по формуле:

$$I = \frac{UF_S}{H\rho_0 e^{-\alpha \vartheta}} \quad (13)$$

где:

U = напряжение между электродами [В];

Решение дифференциального уравнения (12) выполнено численными методами в программе "MathCAD-2000" на ЭВМ, предварительно задав начальные условия ($\vartheta_{нач}$, $\tau_{нач}$). При весьма кратковременном процессе нагрева и $\vartheta_{нач} > 600$ К в первом приближении можно исходить из адиабатического характера нагрева при отсутствии теплообмена с окружающей средой. Действительно, если ток при резком снижении удельного электрического сопротивления увеличивается в десять раз, то потеря энергии в проводнике возрастает в сто раз по сравнению с потерями при большом электрическом сопротивлении и малом токе ($\vartheta_{нач} < 600$ К). Отдача же тепла в окружающую среду пропорциональна разности температур проводника и окружающей среды и поэтому даже при высоких температурах нагрев увеличивается всего лишь в несколько раз.

Уравнение теплового баланса для кратковременного разогрева «мостика» сажи при начальной температуре более 600 К можно записать следующим образом:

$$c(\vartheta)\gamma_{сл} \frac{d\vartheta}{d\tau} = \frac{I^2}{F_S^2} \rho_v(\vartheta) \quad (14)$$

С учетом температурной зависимости $c(\vartheta)$ и $\rho_v(\vartheta)$, разделяя переменные имеем:

$$\frac{I^2}{F_S^2} d\tau = \frac{\gamma_{сл}(c_0 - c_1 e^{-\beta\vartheta})}{\rho_0 e^{-\alpha\vartheta}} d\vartheta \quad (15)$$

Для определения нагрева электропроводящего «мостика» сажи за время прохождения тока $d\tau$ левую часть уравнения (15) проинтегрируем в пределах от нуля до $\tau_{кон}$, а правую от $\vartheta_{нач}$ до $\vartheta_{кон}$.

$$\frac{I^2}{F_S^2} \int_0^{\tau_{кон}} d\tau = \frac{\gamma_{сл}}{\rho_0} \int_{\vartheta_{нач}}^{\vartheta_{кон}} (c_0 e^{\alpha\vartheta} - c_1 e^{(\alpha-\beta)\vartheta}) d\vartheta \quad (16)$$

Если действующее значение тока не изменяется во времени, то интегрирование данного уравнения в указанных пределах приводит к следующему выражению:

$$\frac{I^2}{F_S^2} \tau_{кон} = B_{кон} - B_{нач} \quad (17)$$

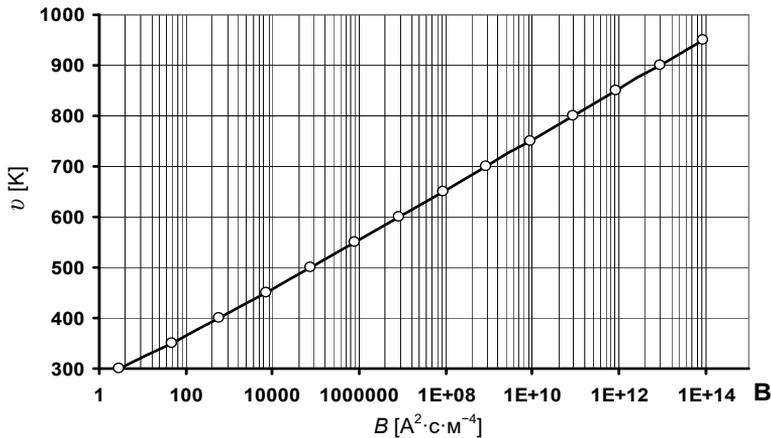
где:

$$B_{кон} = \frac{\gamma_{сл}}{\rho_0} \left(\frac{c_0}{\alpha} e^{\alpha\vartheta_{кон}} - \frac{c_1}{\alpha-\beta} e^{(\alpha-\beta)\vartheta_{кон}} \right)$$

$$B_{нач} = \frac{\gamma_{сл}}{\rho_0} \left(\frac{c_0}{\alpha} e^{\alpha\vartheta_{нач}} - \frac{c_1}{\alpha-\beta} e^{(\alpha-\beta)\vartheta_{нач}} \right)$$

На основании полученного уравнения (17) и известных для сажи значениях c_0 ,

$c_1, \rho_0, \gamma_{сп}, \alpha, \beta$ построена кривая $\mathcal{G} = f\left(\frac{I^2}{F_S^2} \tau_{кон}\right)$ (рис. 2).



Источник: разработка авторов. Source: own elaboration.

Рис. 2. Линия адиабатического нагрева частиц сажи, где: u = температура сажи; B = квадратное соотношение силы тока, проходящего через «мостик» сажи до сечения его площади в определенном времени

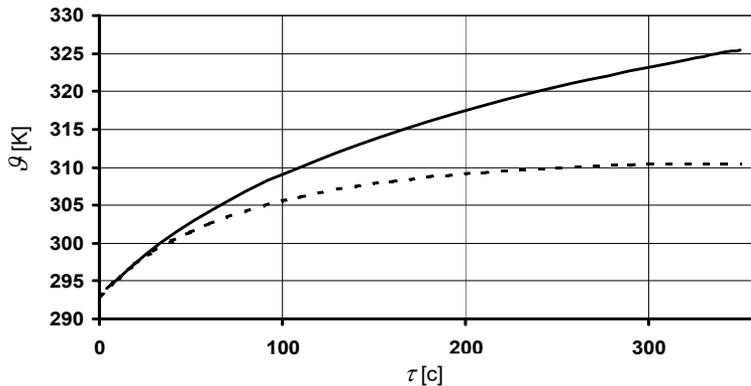
Fig. 2. The line of adiabatic heating of the soot particles: u = temperature of soot; B = squared from the quotient of the intensity and the cross-sectional area of the "bridge" between the electrodes, at a specified time

С помощью графика (рис. 2) для принятых значений $\mathcal{G}_{нач}$ и $\mathcal{G}_{кон}$ определяем соответствующие им значения $B_{нач}$ и $B_{кон}$. Зная $B_{нач}$, $B_{кон}$, и I , F_S можно определить время разогрева $\tau_{кон}$, либо при заданных F_S , $\tau_{кон}$ – ток I . В обратной последовательности, задав значения I , F_S , $\tau_{кон}$ и $\mathcal{G}_{нач}$ по графику (рис. 2) можем определить $\mathcal{G}_{кон}$.

На рисунке 3 показаны результаты расчета процесса нагрева "мостика" сажевых частиц длиной 0,004 м и площадью поперечного сечения $F_S = 9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ при напряжении на электродах 700 В.

Анализ кривых на рисунке 3 показывает, что при заданных начальных условиях, с учетом процесса теплообмена с окружающей средой (естественная конвекция), разогрев сажевых частиц в течении 5 минут выполняется всего на 18 К, после чего температура достигает установившегося значения 311 К и её рост стабилизируется и прекращается. Разогрев частиц, при заданных условиях, без учета процесса теплообмена также не дал ожидаемых результатов, т.е. незначительный прирост температуры (на 50 К) занимает большой промежуток времени 5 ч. Вместе с тем, расчеты показали, что повышение $\mathcal{G}_{нач}$ интенсифицирует процесс нагрева. Разогрев от $\mathcal{G}_{нач} = 493 \text{ К}$ до $\mathcal{G}_{кон} = 593 \text{ К}$ выполняется за 3 с, после чего темп прироста температуры значительно снижается и также несколько стабилизируется.

Значительно труднее определить время $\tau_{\text{кон}}$ или температуру нагрева $\vartheta_{\text{кон}}$, когда ток I не является величиной постоянной, а изменяется с течением времени. На изменение величины проходящего тока оказывают влияние не только свойства сажи, но тип и характеристики источника питания. Поэтому, при изменяющемся во времени значении силы тока, для достоверной информации большое значение приобретает экспериментальное определение $I(\tau)$.



Источник: разработка авторов. Source: own elaboration.

Рис. 3. Результаты расчета процесса нагрева сажевых частиц; ϑ = температура; τ = время; (—) = расчет по формуле (17); (- - -) = расчет по формуле (12)

Fig. 3. The results of the calculation in the process heating of the soot particles; ϑ = temperature; τ = time; (—) = using the formula (17); (- - -) = using the formula (12)

Решение дифференциального уравнения нагрева (15) численными методами при естественной конвекции воздуха показало, что разогрев частиц сажи в межэлектродном промежутке, полностью заполненном частицами, при $H_C = 4$ мм и $U_{\text{пр}} = 800$ В от 20°C до 37°C происходит за 300 с. После чего температура слоя достигает установившегося значения 38°C и больше не поднимается. Расчет процесса нагрева, согласно полученного уравнения (17), без учета теплоотдачи в окружающую среду показывает, что разогрев "мостика" сажи под действием напряжения 800 В в течении 300 с выполняется всего до 50°C. Полученные значения температуры, при нагреве в течении 5 мин, в обоих случаях объясняются высоким удельным объемным электросопротивлением (УЭС) слоя частиц и, соответственно, небольшими значениями протекающего тока ($I \approx 0,178 \text{ A} \cdot \text{м}^{-2}$).

Вместе с тем, проделанный анализ экспериментальных графических зависимостей показывает, что пробой и интенсивное выгорание сажевых частиц при аналогичных условиях происходит при меньших значениях приложенного напряжения (до 800 В). Следовательно, следует предположить несколько иную природу процессов, осуществляющих предварительный разогрев образца в районе температур менее 200°C и участвующих в последующих стадиях межэлектродного дожига.

Так как в диапазоне указанных температур удельная проводимость сажевых частиц соответствует проводимости полупроводников ($2 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}^{-1}$), поэтому сажа является практически слабым диэлектрическим материалом. Исходя из этого можно предположить, что если на образовавшийся "мостик" сажи воздействует электрическое поле, образуемое между осадительными электродами, то существует критическая напряженность поля, при которой происходит пробой межэлектродного промежутка, заполненного сажей. Процесс сопровождается интенсивными тепловыми, механическими, световыми, звуковыми и химическими явлениями.

Из курса физики диэлектриков известно, что в зависимости от характеристик диэлектрика, рода приложенного напряжения и других обстоятельств различают три вида пробоя: электрический, тепловой и ионизационный. К сожалению, в настоящее время сам механизм пробоя ни теоретическими, ни практическими исследованиями полностью не выяснен и до сих пор является одним из наиболее сложных вопросов электротехники. Одной из причин возникающих затруднений является невозможность математически отобразить весь очень сложный комплекс обстоятельств пробоя диэлектрика, обладающего неоднородностью структуры, сложностью химического состава, наличием посторонних включений и др. В данной работе не ставится задача глубокого теоретического и экспериментального изучения механизма пробоя, т.к. это несколько выходит за рамки поставленной проблемы. Данная проблема может быть в какой-то степени решена в отдельном научном исследовании. С практической точки зрения регенерации осадительных электродов на основе проведенного эксперимента необходимо выявить влияние на значения пробивного напряжения следующих параметров: расстояния между электродами, формы электродов, начальной температуры образца, удельного веса, наличия и величины воздушного промежутка между границей слоя частиц сажи и электродом, толщины слоя. На основе полученных экспериментальных данных и их анализа появляется возможность уточнения природы возникновения пробоя и условий его дальнейшего развития.

Исходя из вышеизложенного следует, что в формуле (5) интенсивность внутренних источников тепла q_δ определяется не только выделением Джоулева тепла в процессе прохождения электрического тока, но и процессами, протекающими в образовавшемся мостике сажи под действием электрического поля. Причем в первоначальный момент разогрева при низких температурах ($\vartheta < 200^\circ\text{C}$) последние приобретают решающее значение. Джоулево тепло выделяется в том случае, если все межэлектродное расстояние заполнено частицами сажи, т.е. образуется электропроводящий "мостик". Пробой и выгорание слоя частиц сажи, не занимающих весь межэлектродный промежуток, подтверждает правильность вывода о наличии тепловых процессов, отличных от Джоулева тепла.

На наш взгляд, из всех существующих видов пробоя наиболее соответствует данному случаю ионизационная форма пробоя. Ионизационный пробой вызывается в результате воздействия ионизационных процессов в газовых включениях, имеющихся в слое сажевых частиц. Наличие газовых включений подтверждается отличием истинной плотности частиц сажи ($1450 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$) от плотности

слоя ($292 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$). При превышении напряженности поля в слое частиц выше критической $E_{кр}$ в газовых включениях могут возникать частичные разряды в виде короны, скользящих разрядов или частичных пробоев отдельных элементов [КОСТЕНКО (ред.) 1973]. Если плавно повышать напряжение на испытуемом образце, то при некотором его значении $U_{нач}$ в слое частиц появляются частичные разряды слабой интенсивности. Момент их начала фиксировался по хорошо наблюдаемому свечению в слое. При выдержке напряжения $U_{нач}$ в пределах нескольких минут они могут прекращаться на некоторое время и появляться вновь. При снижении напряжения $U < U_{нач}$ эти процессы прекращаются.

Если дальше повышать напряжение $U_{нач} < U$, то при некотором его значении интенсивность частичных разрядов резко возрастает и образуется большое количество искр. Это приводит к резкому снижению напряжения и повышению силы тока. Образование частичных и искровых разрядов вызывает повышение температуры внутри слоя частиц. При достижении температурой необходимого значения удельная проводимость слоя частиц повышается и в процесс включается Джоулево тепло. Данный момент был взят как показатель начального напряжения поджига. При выполнении поджига образца сажевых частиц происходит интенсивное его выгорание. Если не ограничить проходящий ток установкой добавочного сопротивления, то, при достаточной мощности источника питания, возникает интенсивный дуговой разряд.

Очевидно, возникновение частичных разрядов будет соответствовать пробивной напряженности поля внутри слоя частиц, которая может быть определена из выражений

$$U_{сл} = E_{сл} h_{сл} = i \rho_v h_{сл} \quad (18)$$

где:

$U_{сл}$ = падение напряжения в слое [В];

i = плотность тока коронного разряда [$\text{А}\cdot\text{м}^{-2}$];

$h_{сл}$ = толщина слоя частиц [м].

$$\frac{U_{np}}{U_0} = \frac{(0,306 \frac{R_2}{R_1} - 0,642)}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (19)$$

где:

U_{np} = пробивное напряжение между электродами [В];

U_0 = начальное напряжение коронного разряда [В].

При проведении экспериментальных исследований пробивная напряженность поля находилась в пределах $E_{np} = 50\text{--}290 \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}$. В работе VERESHCHAGINA и др. [1990] указывается, что максимальная напряженность в слое будет вблизи поверхности электрода. Пробивное напряжение воздуха в открытых и закрытых порах приблизительно одинаково, для поры толщиной 10–50 мм величина пробивного напряжения соответствует нижней части кривой Пашена и лежит в пределах 320–550 В ($E_{np} = 110\text{--}320 \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}$) [КОСТЕНКО 1973]. Некоторое различие в значениях пробивной напряженности, вероятно, связаны с неравномерным её распределением внутри слоя.

Для системы электродов, образующих неоднородное электрическое поле, характерно явление образования "обратной короны". При работе электрофильтров образование "обратной короны" является нежелательным явлением, так как: 1) ионизационные процессы в слое сопровождаются появлением в зоне вблизи слоя ионов противоположного знака, что приводит к уменьшению заряда частиц и уменьшению или прекращению их осаждения; 2) уменьшается напряженность поля вблизи слоя, что также замедляет процесс осаждения частиц; 3) пробой в слое приводит к частичному разрушению слоя и уносу частиц, что нарушает структуру слоя. При осуществлении процесса межэлектродного дожига частиц сажи в неоднородном электрическом поле появление "обратной короны" вызывает процесс появления частичных разрядов, что вызывает повышение температуры слоя и выгорание частиц.

Выводы

1. Результаты расчета процесса нагрева сажевых частиц посредством протекания по ним электрического тока свидетельствуют о неэффективности разогрева при начальной температуре образца менее 200°C. Установлено, что достижение приемлемых параметров дожига (нагрев до 700°C не более чем за 5 с) возможно при начальной температуре образца более 250°C.
2. Исследование процесса межэлектродного дожига частиц сажи свидетельствует о том, что при начальной температуре образца менее 200°C поджиг сажевых частиц осуществляется в результате воздействия ионизационных процессов в газовых включениях; при этом напряженность поля между электродами должна быть не менее 2 кВ·см⁻¹, а расстояние не более 5 мм; при достижении температурой значения выше 250°C в процесс разогрева включается Джоулево тепло. Величина начального напряжения поджига повышается с уменьшением высоты слоя частиц на электроде и увеличением неоднородности поля между электродами. Установлено, что наиболее приемлемой является конструкция, состоящая из пластинчатых электродов с межэлектродным расстоянием 2–5 мм и напряжением 650–750 В.

Список литературы

- GOLOVINA E. S. (ред.) 1963. Реакции углерода с газами [Reaction of the carbon and gases]. Москва. Издательство иностранной литературы сс. 360.
- KAMIŃSKI J.R., KRUK I. S., SZEPTYŃSKI A. 2015. Ciągnikowe agregaty maszynowe w nowoczesnym rolnictwie [Tractor-machine sets in modern agriculture]. Inżynieria w Rolnictwie. Monografie. Nr 18. Falenty. Wydaw. ITP. ISBN 978-83-62416-72-1 сс. 133.
- KARTASHEVICH A. N., BELOUSOV V. A., SUSHNEV A. A. 2000. К вопросу очистки отработавших газов дизельных двигателей. В: Тепломассообмен в энергетических установках [To the problem of purifying exhaust of diesel engines. In: Heat transfer in power equipment]. Материалы IV – Минского международного форума по тепломассообмену. Минск, 22–26 мая 2000 г. Минск. Т. 10 с. 78–85.
- KARTASHEVICH A. N., КУКНАРЕНКО Г. М. 2011. Двигатели внутреннего сгорания. Основы теории и расчета. Учебное пособие [Internal combustion engines. The theoretical basis and calculations. Handbook]. Горки. БГСХА. ISBN 978-985-467-309-7 сс. 315.

KARTASHEVICH A. N., PONTALEV O. V., GORDEENKO A. V. 2013. Тракторы и автомобили. Конструкция. Учебное пособие [Tractors and cars. Construction. Handbook]. Минск. Новое знание. Москва. ИНФРА-М. ISBN 978-5-16-006882-4 сс. 311.

KARTASHEVICH A. N., ТОВСТУКА V. S., GORDEENKO A. V. 2015. Топливо, смазочные материалы и технические жидкости. Учебное пособие [The fuel greases and technical fluids. Handbook]. Минск. Новое знание. Москва ИНФРА-М. ISBN 978-985-475-795-6 сс. 420.

КНИТРИН L. N. 1957. Физика горения и взрыва [Physics of combustion and explosion]. Москва. Издательство московского университета. ISBN 5-9221-0438-1 сс. 442.

KOSTENKO M. V. (ред.) 1973. Техника высоких напряжений: Учебное пособие для вузов [High voltage technique. Handbook for students]. Москва. Высшая школа. ISBN 978-1-84919-263-7 сс. 528.

KRUCZYŃSKI S., CHRUPEK B., WOJS M.K. 2014. Metody ograniczania poziomu emisji stosowane w silnikach maszynach budowlanych w świetle wymagań norm emisji spalin: Stage III B/Stage IV [Methods of the emission reducing of engines used in construction machines in the light of the requirements of the regulations for emission stage IIIB/stage IV]. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów. Nr 1(97) с. 109–118.

MYSZKOWSKI S. 2015. Filtry cząstek stałych. Cz. III. Technika motoryzacyjna [Particulate filters. Vol. III. Automotive a technique] [онлайн]. [Дата обращения 16.12.2015]. Режим доступа: <http://www.e-autonaprawa.pl/artykuly/5901/filtry-czastek-stalych-cz-iii.html>

POMERANCEVA V. V. (ред.) 1973. Основы практической теории горения [Basics of practical theory of combustion]. Ленинград. Энергия. ISBN 5-9221-0438-1 сс. 246.

RYMASZEWSKI E. 2007. Pomiar zadymienia spalin silników (ZS) za pomocą dymomierzy optycznych [The smoke measurement values for compression ignition engines (CI) using optical opacimeters] [онлайн]. Auto Moto Serwis. Nr 12. [Дата обращения 16.12.2015]. Режим доступа: <http://zssplus.pl/publikacje/publikacje35.htm>

VERESHCHAGIN I. P., KOTLYARSKIY L. B., MOROZOV V. S. 1990. Технология и оборудование для нанесения полимерных покрытий в электрическом поле [Technology and tooling for application of polymer coatings in the electrical field]. Москва. Энергоатомиздат. ISBN 5-283-00520-8 сс. 240.

***Anatoli Nikolaevich Kartashevich, Vladimir Alekseevich Belousov,
Jan Radosław Kamiński, Zbigniew Kogut***

DESIGN-EXPERIMENT ANALYSIS OF INTERELECTRODE BURNING OF DIESEL SOOT PARTICULATES IN AN ELECTRICAL FILTER-AFTERBURNER

Summary

Cleaning of the exhaust gasses from vehicle and tractor diesels with an electric filter-afterburner is one of the most effective methods of soot particulate recovery. Formation of a particles stratum on a collecting electrode requires regular removal of accumulated particles as with rather a thick layer (under corresponding design characteristics) aerodynamic resistance of the electric filter increases. Besides, in case of under-adherence, there can be a break off of this stratum from the electrode surface. In the offered design of a soot electrical filter-afterburner reactivation of a collecting surface is carried out by means of inter-electrode burning. In this paper the theory of inter-electrode burning of the formed bridge of soot particles is considered. When making up a heat balance of a soot

element, the heat amount needed to increase the total heat content of the particles layer is determined, and the differential heating equation with due account of varying thermal properties of soot is derived. This differential heating equation is solved by computer-aided numerical methods, with preset initial conditions. For a short-term heating under the absence of heat exchange with the environment the differential heating equation is solved analytically. The study results show that:

1. Heating of soot particles by electric current proves inefficiency of a heat-up at the sample initial temperature less than 200°C. It was established that to achieve reasonable burning parameters (heating up to 700°C for no longer than 5 s) is possible at the initial sample temperature exceeding 250°C.
2. When the initial sample temperature is less than 200°C, burning of soot particles results from ionization processes in gas inclusions; field strength between electrodes should not be less than 2 kV·cm⁻¹, and spacing should not exceed 5 mm; when the temperature reaches 250°C and more, Joule heat is engaged in the heat-up process. The value of initial voltage is going up with the decrease in particles layer thickness on an electrode and the increase of heterogeneity of the field between electrodes. It has been established that the most acceptable design is that of collectors plates with 2–5 mm spacing and 650 to 750 V voltage.

Key words: burning process, Diesel engine, electrical filter-afterburner, electrode

*Anatoli Nikolaevič Kartaševič, Vladimir Alekseevič Belousov
Jan Radosław Kamiński, Zbigniew Kogut*

**OBLICZENIOWO-EKSPERYMENTALNA ANALIZA
PROCESU MIĘDZYELEKTRODOWEGO DOPALANIA CZĄSTEK SADZY
W GAZACH WYDECHOWYCH SILNIKÓW WYSOKOPRĘŻNYCH
PODCZAS PRACY ELEKTROFILTRA-DOPALACZA**

Streszczenie

Oczyszczanie spalin wysokoprężnych silników ciągnikowych z wykorzystaniem elektrofiltru-dopalacza jest jedną z najbardziej efektywnych metod wychwytywania znajdujących się w nich cząstek sadzy. Formowanie warstwy cząstek sadzy na elektrodzie osadczej wymaga okresowego wydalania osadzonych cząstek, ponieważ w warunkach odpowiednio grubej warstwy (w odpowiednich rozwiązaniach konstrukcyjnych) zwiększa się opór aerodynamiczny elektrofiltru, a także – gdy siły adhezji są niedostateczne – może zachodzić odrywanie warstwy osiadłych cząstek od powierzchni elektrody. W zaproponowanej konstrukcji elektrofiltru-dopalacza sadzy regeneracja powierzchni osadczej realizowana jest za pomocą międzyelektrodowego dopalania. W pracy rozpatrzono teoretycznie proces międzyelektrodowego dopalania tworzącego się mostka z cząstek sadzy. W procesie sporządzania bilansu cieplnego elementu sadzy określono ilość ciepła konieczną do zwiększenia wartości cieplnej warstwy cząstek i otrzymano równanie różniczkowe nagrzewania z uwzględnieniem zmieniających się cieplno-fizycznych właściwości sadzy. Rozwiązywanie równania różniczkowego procesu nagrzewania przeprowadzono metodą cyfrową z wykorzystaniem elektronicznej techniki obliczeniowej (ETO), zadając wstępnie warunki początkowe. W przypadku krótko trwającego procesu nagrzewania, przyjmując warunek niewystępowania wymiany ciepła z otaczającym środowiskiem, równanie różniczkowe nagrzewania rozwiązano analitycznie. Na podstawie wyników badań ustalono, że:

- 1) nagrzewanie cząstek sadzy drogą przebiegu po nich strumienia elektrycznego świadczy o nieefektywności rozgrzania, gdy temperatura początkowa próbki wynosi poniżej 200°C; osiągnięcie odpowiednich parametrów dopalania (nagrzewanie do 700°C nie dłużej niż 5 s) jest możliwe, gdy początkowa temperatura próbki wynosi powyżej 250°C;
- 2) w warunkach początkowej temperatury próbki poniżej 200°C zapalenie żarzących się cząstek sadzy zachodzi w rezultacie występowania procesów jonizujących we wtrąceniach gazowych, przy czym napięcie między elektrodami powinno być nie mniejsze niż 2 kV·cm⁻¹, a rozstaw elektrod nie większy niż 5 mm; po osiągnięciu temperatury powyżej 250°C w proces podgrzewania włącza się ciepło Joule'a; wartość początkowego napięcia zapłonowego zwiększa się ze zmniejszeniem grubości warstwy cząstek sadzy na elektrodzie i ze zwiększeniem niejednorodności pola między elektrodami; najbardziej odpowiednia jest konstrukcja, składająca się z płytkowych elektrod z międzyelektrodową odległością 2–5 mm i napięciem 650–750 V.

Słowa kluczowe: elektroda, elektrofiltr-dopalczyk, proces spalania, silnik Diesla

Adres do korespondencji

dr hab. inż. Zbigniew Kogut, prof. nadzw. ITP
Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach
Mazowiecki Ośrodek Badawczy w Kłudzienku
05-825 Grodzisk Mazowiecki
tel. 22 755-60-41 wew. 111; e-mail: z.kogut@itp.edu.pl