



А.Н.Карташевич, доктор технических наук, профессор

В.А.Белоусов, инженер

Белорусская государственная сельскохозяйственная академия

УДК 621.43.038.771.772

Исследование процесса межэлектродного дожига частиц дизельной сажи при регенерации осадительной поверхности электрофильтра-дожигателя

Одним из главных токсических показателей дизельных двигателей является дымность отработавших газов. Применение электрофильтров связано с периодической регенерацией осадительной поверхности. Предлагается способ регенерации посредством межэлектродного дожига. Составлен тепловой баланс образовавшегося "мостика" сажевых частиц и произведен расчет процесса нагрева при отсутствии перепада температуры в плоскости любого поперечного сечения. Решение дифференциального уравнения нагрева с учетом осевого перепада температур выполнено численными методами, а при отсутствии теплообмена с окружающей средой – аналитически. Эффективный разогрев сажевых частиц посредством протекания по ним электрического тока осуществляется при начальной температуре образца более 200°C.

Загрязнение окружающей среды токсичными компонентами отработавших газов дизельных двигателей приводит к снижению урожайности сельскохозяйственных культур, продуктивности животноводства и ухудшению качества продукции. Повышение концентрации токсичных веществ отработавших газов дизелей в атмосфере рабочих мест и в кабинах автомобилей и тракторов (кратность превышения ПДК до 4 раз) вызывает ухудшение состояния здоровья работающих и приводит к снижению производительности труда. Поэтому перед производителями двигателей стоит задача разработать и внедрить комплекс мероприятий, обеспечивающих снижение токсичности и дымности отработавших газов дизельных двигателей в условиях эксплуатации.

В практике эксплуатации сельскохозяйственной техники наиболее доступным является путь снижения дымности отработавших газов дизелей путем установки в системе выпуска устройств снижения дымности. Несмотря на значительное количество исследований, посвященных рассматриваемой проблеме, остаются недостаточно изученными вопросы дожига сажевых частиц дизелей в электрическом поле.

При работе сажевого электрофильтра-дожигателя на осадительном электроде образуется слой осевших частиц, что требует периодической регенерации осадительной поверхности, так как при достаточно большой толщине слоя (при соответствующих конструктивных решениях) увеличивается аэродинамическое сопротивление элек-

One of major toxic indexes of diesel motors is smoke content of the exhaust gases. The application of electric filters is due to periodic reactivation of a sediment surface. The way of reactivation by means of interelectrode upburning is offered. The heat balance of formed bridge of sooty fragments is drawn up and the calculation of the heating process is worked out in the absence of temperature in a plain of any cross-section. The solution of the differential equation of heating in with regard for axial temperature overfall is carried out by the numerical methods, and in the absence of heat exchange with environs analytically. The effective heat up of sooty fragments by means of weep on them of electric current comes true at reference temperature of a sample more than 200°C.

трофильтра, 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.

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

$$dQ_l = c\gamma_{са} \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} dV_{са} d, \quad (1)$$

где dQ_l – количество тепла, необходимого для разогрева частиц, Дж; c – удельная теплоемкость осевших частиц сажи, Дж/кг·К; $\gamma_{са}$ – плотность слоя частиц на осадительном электроде, кг/м³; $V_{са}$ – объем, занимаемый частицами на осадительном электроде, м³; $d\tau$ – время разогрева, с; $d\vartheta$ – 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.

Из курса теплопередачи известно, что нагрев осуществляется тремя основными видами переноса тепла: теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением. Так как теплопередача практически всегда определяется не только тепловыми, но и гидродинамическими явлениями, то совокупность этих явлений описывается системой дифференциальных уравнений [1, 2, 3].

1. Уравнение теплопроводности (Фурье-Киргофа)

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} v_x \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + v_y \frac{\partial \vartheta}{\partial y} + v_z \frac{\partial \vartheta}{\partial z} = \frac{\lambda}{c \gamma_{сл.}} \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right).$$

2. Уравнение движения (Навье-Стокса)

$$\gamma_{сл.} \frac{\partial v_i}{\partial \tau} + \gamma_{сл.} \left(v_x \frac{\partial v_i}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_i}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_i}{\partial z} \right) = \lambda g_i - \frac{\partial P}{\partial i} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_i}{\partial z^2} \right)$$

3. Уравнение сплошности

$$\frac{\partial \gamma_{сл.}}{\partial \tau} + \frac{\partial (\gamma_{сл.} v_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\gamma_{сл.} v_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\gamma_{сл.} v_z)}{\partial z} = 0,$$

где v_x, v_y, v_z – составляющие скорости в данной точке по осям координат, м/с; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$.

Полное математическое описание процесса теплопередачи включает также уравнение теплообмена, которое позволяет определить коэффициент теплоотдачи по известному полю температур:

$$k_T = -\frac{\lambda}{\vartheta - \vartheta_l} \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial n} \right)_{n \rightarrow 0},$$

где k_T – коэффициент теплоотдачи с единицы поверхности, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$; ϑ_l – температура за пограничным слоем; $\partial \vartheta / \partial n$ – производная температуры по нормам к поверхности.

Приведенная система дифференциальных уравнений описывает процесс теплопередачи в самом общем виде. Большое количество переменных, входящих в дифференциальное уравнение теплопередачи, сложность начальных и граничных условий делают решение крайне трудным, а полученные результаты настолько сложны, что применять их практически нецелесообразно. Поэтому в практике таких расчетов разрешаются обоснованные допущения, позволяющие ограничить объем расчетной работы, не искажая конечного результата.

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 $\gamma_{сл.}$; c ; λ ; ρ_v (ρ_v – удельное электрическое сопротивление слоя частиц, $\text{Ом} \cdot \text{м}$), 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.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vartheta}{\partial y} = \frac{\partial \vartheta}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} = 0. \end{aligned}$$

Принятое допущение будет справедливо в случае ме-

жэлектродного 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 $\vartheta + (\partial \vartheta / \partial x) dx$. Количество тепла, входящее в элемент dx за время $d\tau$ можно найти по закону Фурье [4]:

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

где Φ_x – тепловой поток, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

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

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

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 ОГ через поверхность площадью S_x , равно:

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

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 $q \delta$ – интенсивность внутренних источников тепла; $q \delta =$

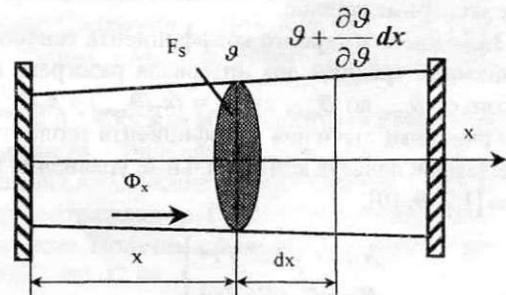


Рис. 1. К выводу дифференциального уравнения нагрева частиц сажи

$= k_d \delta_i^2 \rho_v$ – для случая нагрева Джоулевым теплом; δ_i – средняя плотность тока, $\delta_i = I/F_S$; I – сила тока, проходящего через "мостик" сажи, A ; $k_d = R \approx R =$ – отношение сопротивлений при переменном и постоянном токе, $k_d = 1$, так как 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 [5, 6, 7], поэтому в случае разогрева и начального периода горения учитывать его не будем.

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

$$\lambda \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + c \gamma_{cl.} \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} + k_T \frac{S_x}{F_S} (\vartheta - \vartheta_{O_2}) - \delta_i^2 \rho_v = 0. \quad (7)$$

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

$$\lambda(\vartheta) \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + c(\vartheta) \gamma_{cl.}(\vartheta) \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} + k_T(\vartheta; \vartheta_{O_2}) \frac{S_x}{F_S} (\vartheta - \vartheta_{O_2}) - \delta_i^2 \rho_v(\vartheta) = 0. \quad (8)$$

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 [8]:

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

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

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 [1, 3, 9, 10]:

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

где Nu – критерий Нуссельта; Re – критерий Рейнольдса;

Gr – критерий Грасгофа; Pr – критерий Прандтля; C_T, λ, 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:

$$\frac{d\vartheta}{d\tau} = \frac{I^2 \rho_0 e^{-\alpha \vartheta} - k_T S_x F_S (\vartheta - \vartheta_{O_2})}{F_S^2 \gamma_{cl.} (c_0 - c_1 e^{-\beta \vartheta})}. \quad (12)$$

В уравнении (12) значение силы тока находим по формуле

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

где U – напряжение между электродами, V .

При весьма кратковременном процессе нагрева и $\vartheta_{нач.} > 600 K$ 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 ($\vartheta_{нач.} < 600 K$). 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 K можно записать следующим образом:

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

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

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

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

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

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

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

$$\text{где } B_{кон.} = \frac{\gamma_{cl.}}{\rho_0} \left(\frac{c_0}{\alpha} e^{\alpha \vartheta_{кон.}} - \frac{c_1}{\alpha - \beta} e^{(\alpha - \beta) \vartheta_{кон.}} \right);$$

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

На основании полученного уравнения (17) и известных для сажи значениях c_p , c_r , ρ_p , γ_{cl} , α , β построена

кривая $\vartheta = f\left(\frac{I^2}{F_S^2} \tau_{кон.}\right)$ (рис. 2).

С помощью графика (рис. 2) для принятых значений $\vartheta_{нач.}$ и $\vartheta_{кон.}$ определяем соответствующие им значения $V_{нач.}$ и $V_{кон.}$. Зная $V_{нач.}$, $V_{кон.}$ 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 $\vartheta_{нач.}$ по графику (рис. 2), можем определить $\vartheta_{кон.}$.

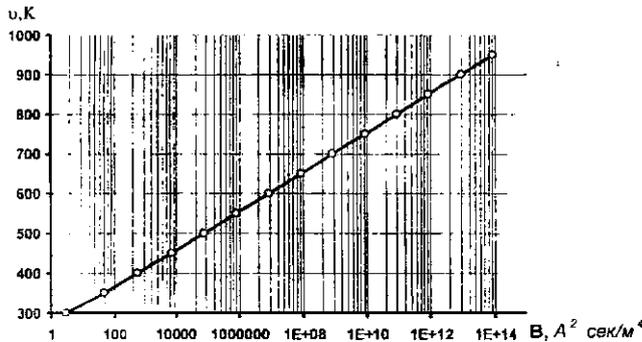


Рис. 2. Линия адиабатического нагрева частиц сажи

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. Решение дифференциального уравнения (13) выполнено численными методами в программе "MathCAD-2000" на ЭВМ, предварительно задав начальные условия ($\vartheta_{нач.}$, $\tau_{нач.}$).

Анализ кривых рисунка 3 показывает, что при заданных начальных условиях, с учетом процесса теплообмена с окружающей средой (естественная конвекция), разогрев сажевых частиц в течение 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 $\vartheta_{нач.}$ интенсифи-

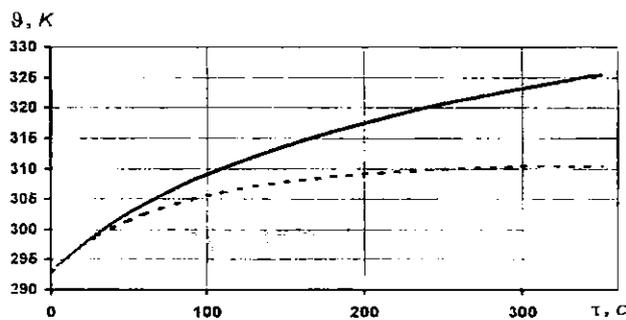


Рис. 3. Результаты расчета процесса нагрева сажевых частиц:

(—) – расчет по (17); (----) – расчет по (12)

цирует процесс нагрева. Разогрев от $\vartheta_{нач.} = 493 \text{ К}$ до $\vartheta_{кон.} = 593 \text{ К}$ выполняется за 3 с, после чего темп прироста температуры значительно снижается и также несколько стабилизируется.

Значительно труднее определить время $\tau_{кон.}$ или температуру нагрева $\vartheta_{кон.}$ 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 $I(\tau)$.

В заключение необходимо отметить, что результаты расчета процесса нагрева сажевых частиц посредством протекания по ним электрического тока свидетельствуют о неэффективности разогрева при начальной температуре образца менее 200 °С. Установлено, что достижение приемлемых параметров дожига (нагрев до 700 °С не более чем за 5 с) возможно при начальной температуре образца более 250 °С.

Результаты расчета легли в основу разработанных конструкций электрофильтров-дожигателей [11, 12] и обоснования их основных конструктивных параметров.

Литература

1. Михеев М. А., Михеева М. А. Основы теплопередачи. – Москва: Энергия, 1977. – 320 с.
2. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. – Москва: Наука, 1987. – 840 с.
3. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. – Москва: Атомиздат, 1979. – 420 с.
4. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – Москва: Высшая школа, 1967. – 600 с.
5. Основы практической теории горения / Под общ. ред. В. В. Померанцева. – Ленинград: Энергия, 1973. – 246 с.
6. Хитрин Л. Н. Физика горения и взрыва. – Москва: Изд-во московского университета, 1957. – 442 с.
7. Реакции углерода с газами / Под ред. Е. С. Головиной. – Москва: Изд-во иностр. лит-ры, 1963. – 360 с.
8. Карташевич А.Н., Белоусов В.А., Сушнев А.А. К вопросу очистки отработавших газов дизельных двигателей // Тепломассообмен в энергетических установках: Материалы IV Минского международного форума по тепломассообмену, 22–26 мая 2000 г. – Минск, 2000. – Том 10. – С. 78–85.
9. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – Москва: Энергоатомиздат, 1988. – Кн. 2. – 557 с.
10. Жукаускас А., Жюгжда И. Теплоотдача в ламинарном потоке жидкости. – Вильнюс: Минтис, 1969. – 56 с.
11. Карташевич А.Н., Белоусов В.А., Сушнев А.А. Сажевый фильтр-нейтрализатор. Патент Республики Беларусь // Изобретения. Полезные модели. Промышленные образцы. – 2000. – №1. С. 98.
12. Карташевич А.Н., Белоусов В.А., Сушнев А.А. Устройство для очистки отработавших газов от сажи. Патент Республики Беларусь // Изобретения. Полезные модели. Промышленные образцы. – 1999. – №3. — С. 46.