

**ЗАРЯДКА ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ КОРОННОГО РАЗРЯДА САЖЕВОГО
ЭЛЕКТРОФИЛЬТРА**

А. Н. КАРТАШЕВИЧ, В. А. БЕЛОУСОВ

*УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Беларусь, 213407*

А. В. КРАВЕЦ

*СООО «Белросагросервис»,
г. Минск, Беларусь, 220094*

(Поступила в редакцию 05.04.2018)

Уменьшение негативного воздействия отработавших газов (ОГ) дизельных двигателей, в том числе и выброса сажевых частиц, на окружающую среду является одной из сложнейших задач в области очистки отработавших газов дизелей. Электрофизическая очистка ОГ дизельных двигателей предусматривает установку в системе выпуска электрофизического устройства, позволяющего осуществлять высокую степень очистки ОГ от твердых частиц.

Электрическая очистка ОГ от взвешенных сажевых частиц основана на зарядке сажевых частиц, осаждении, выделенных из газового потока частиц, на электродах или дожигании непосредственно на электродах. Зарядка частиц сажи ОГ в поле коронного разряда электрофильтра является важнейшей составной частью процесса электрофизической очистки. Зарядка сажевых частиц близкая к максимальной определяет эффективность процесса осаждения и, в конечном итоге, степень очистки ОГ.

Рассмотрен процесс зарядки частиц в поле коронного разряда электрофильтра применительно к сажевым частицам ОГ дизельных двигателей. Установлено, что во-первых, величина отношения заряда приводящих частиц к площади их поверхности мало зависит от особенностей строения поверхности частиц и определяется их характерными размерами; во-вторых, можно с достаточной достоверностью принять сферическую форму частиц в процессе "ударного" механизма зарядки.

По результатам выполненных аналитических расчетов можно сделать следующие выводы: 1) величину заряда сажевой частицы ОГ размером 0,1...2 мкм необходимо определять как сумму зарядов, рассчитанных по формулам «ударной» и «диффузионной» зарядки; 2) заряд частицы, перемещающейся в электрическом поле модели сажевого электрофильтра, с достаточной степенью точности, может быть принят по максимальному значению в условиях «ударного» механизма зарядки, так как более 85 % осаждаемых частиц имеют размеры от 5 до 150 мкм.

Ключевые слова: *дизельный двигатель внутреннего сгорания, отработавшие газы, электрическая очистка, сажевые частицы, зарядка в электрическом поле.*

Reducing the negative influence of exhaust gases of diesel engines, including the release of soot particles, on the environment is one of the most difficult tasks in the field of purification of exhaust gases of diesel engines. Electrophysical purification of exhaust gases from diesel engines provides for the installation of an electrophysical device in the exhaust system that allows a high degree of exhaust gas purification from solid particles.

The electrical purification of exhaust gases from suspended soot particles is based on the charging of soot particles and the sedimentation of particles separated from the gas stream on electrodes or afterburning directly on the electrodes. Charging of soot particles of exhaust gases in the field of corona discharge of electric filter is the most important component of the process of electrophysical purification. The charging of soot particles close to the maximum determines the efficiency of sedimentation process and, ultimately, the degree of exhaust gas purification.

We have examined the process of charging of particles in the field of corona discharge of an electric filter with reference to soot particles of exhaust gases of diesel engines. We have established that, first, the value of ratio of the charge of leading particles to the area of their surface depends little on the features of structure of the particle surface and is determined by their characteristic dimensions; second, it is possible to assume with sufficient confidence the spherical shape of particles in the process of "shock" charging mechanism.

According to the results of performed analytical calculations, the following conclusions can be drawn: 1) the value of charge of the soot particle of exhaust gases of a size from 0.1 to 2 μm should be determined as the sum of charges calculated by the formulas of "shock" and "diffusion" charging; 2) the charge of particle moving in the electric field of model of soot electric filter can be accepted with a sufficient degree of accuracy with the maximum value under the conditions of "shock" charging mechanism, since more than 85% of the sedimented particles have sizes from 5 to 150 μm .

Key words: *diesel internal combustion engine, exhaust gases, electric cleaning, soot particles, charging in an electric field.*

Введение

Двигатели внутреннего сгорания занимают весомую роль в загрязнении окружающей среды. Вредные выбросы автотракторных двигателей влияют на урожайность и снижают качество сельскохозяйственных культур, оказывает весьма вредное воздействие на здоровье человека, продуктивность животных, способствует появлению смога в больших городах. Поэтому наряду с улучшением экономических показателей дизелей снижение токсичности отработавших газов

является важнейшей задачей. Отработавшие газы (ОГ) дизелей представляют собой сложную многокомпонентную смесь газов, паров, капель жидкостей и дисперсных твердых частиц (сажи). Сажа является одним из основных токсичных веществ ОГ дизельных двигателей. На выброс сажи может приходиться наибольшая доля токсичности дизеля. Частицы сажи определяют дымность ОГ.

Снижение выброса сажевых частиц является сегодня одной из актуальных задач в области очистки отработавших газов дизелей. Помимо мероприятий, направленных на снижение выбросов CO, CH и NO_x и образования сажи при сгорании топлива непосредственно в двигателе, особое внимание уделяется фильтрации газов на выпуске из него.

Следует отметить, что методы воздействия на рабочий процесс дизельного двигателя, с целью снижения выбросов токсичных компонентов ОГ, являются необходимыми, но недостаточными для удовлетворения требований современных стандартов. Поскольку не существует единого универсального метода, обеспечивающего значительное снижение выброса с ОГ всего спектра токсичных компонентов, задача снижения токсичности ОГ может быть решена применением комплекса мероприятий, включающих в себя как средства и методы воздействия на рабочий процесс, так и средства физико-химической очистки ОГ в системе выпуска. Эффективным способом очистки ОГ от сажевых частиц является их задержание посредством специальных фильтров: фильтры с «металлической шерстью», фильтры с керамическими фильтрующими элементами, спиральные фильтры с керамическим наполнителем, электрофильтры и другие.

Электрофизическая очистка ОГ дизельных двигателей является перспективным направлением теоретических и экспериментальных исследований. Электрофизическая очистка ОГ основана на взаимодействии потока ОГ с электрическим полем высокой напряженности. Данная технология предусматривает установку в системе выпуска электрофизического устройства, позволяющего осуществлять высокую степень очистки ОГ как от твердых частиц, так и от газообразных токсичных компонентов. Однако в настоящее время данное направление является недостаточно разработанным и требует проведения ряда исследований с целью уточнения основных показателей и характеристик процесса очистки ОГ.

Электрическая очистка ОГ от взвешенных сажевых частиц основана на следующем. В процессе ионизации газовых молекул ОГ электрическим разрядом происходит зарядка сажевых частиц, содержащихся в ОГ, затем под действием электрического поля эти частицы осаждаются на электродах, выделяются из газового потока или дожигаются непосредственно на электродах. Сложность и многообразие явлений, протекающих в электрофильтре, являются серьезным препятствием при их строгом аналитическом описании.

Зарядка частиц сажи ОГ в поле коронного разряда электрофильтра является важнейшей составной частью процесса электрофизической очистки. Зарядка сажевых частиц близкая к максимальной определяет высокую эффективность процесса осаждения и в конечном итоге степень очистки ОГ.

Рассмотрим процесс зарядки частиц в поле коронного разряда электрофильтра применительно к сажевым частицам ОГ дизельных двигателей.

Частица сажи, попадающая в электрическое поле с униполярным объемным зарядом, приобретает избыточный заряд. Скорость изменения заряда dq/dt будет равна количеству ионов, попадающих на частицу в единицу времени, умноженному на заряд иона q_i , т. е.

$$\frac{dq}{dt} = q_i \Phi,$$

где q – заряд частицы, κ ; t – время зарядки и движения частицы, c ; q_i – заряд иона, κ ; Φ – поток ионов на частицу, $ион/м^2$.

Можно также записать:

$$\frac{dq}{dt} = q_i \int_{S_u} \vec{f}_i d\vec{S}_u,$$

(1)

где \vec{f}_i – вектор плотности потока ионов; S_u – поверхность, окружающая частицу, $м^2$.

Плотность потока ионов определяется силами результирующего электрического поля и диффузии (закон Фика) [1]:

$$\vec{f} = n_i k \vec{E} - D \text{grad } n_i,$$

(2)

где \vec{E} – напряженность поля на поверхности S_q ; D – коэффициент диффузии; n_i – концентрация ионов в точках, принадлежащих поверхности, $\text{ион}/\text{м}^3$.

Из условия неразрывности плотности потока ионов следует:

$$\text{div} \vec{f} = \frac{\partial n_i}{\partial t}.$$

Тогда из (2) имеем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_i}{\partial t} &= \text{div} \vec{f} = \text{div} \{ kn_i \vec{E} - D \text{grad} n_i \} \quad \text{или} \\ \frac{\partial n_i}{\partial t} &= k \vec{E} \nabla n_i - kn_i \Delta \varphi - D \Delta n_i \end{aligned}$$

(3)

Первый член в правой части уравнения (3) учитывает движение ионов под действием электрического поля, второй дает составляющую потока, обусловленную неоднородностью распределения концентрации ионов вокруг частицы.

Таким образом, ионы перемещаются к поверхности частицы под действием электрического поля и в результате процесса диффузии. С увеличением размера частиц уменьшается значение градиента концентрации ионов у поверхности частицы и, следовательно, уменьшается вклад процесса диффузии в зарядку («диффузионная» зарядка частиц) и возрастает роль движения ионов под действием поля («ударная» зарядка). Согласно данным [2, 3, 4], для частиц радиусом $a < 0,05$ мкм влиянием электрического поля можно пренебречь и считать, что происходит чисто «диффузионная» зарядка, т. е. $D \text{grad} n_i \gg kn_i \vec{E}$. Для крупных частиц $a > 2$ мкм, при достаточно большой напряженности поля ($E > 1$ кВ/см) в большей степени преобладает зарядка в результате движения ионов под действием поля, т. е. «ударная» зарядка $D \text{grad} n_i \ll kn_i \vec{E}$. Частицы размером $0,05 < a < 2$ мкм приобретают заряд, определяемый двумя вышеизложенными способами.

Заряд крупных частиц, за счет направленного движения ионов, можно определить, если принять концентрацию ионов постоянной $\partial n_i / \partial t = 0$. Тогда кинетика заряда частицы, т. е. изменение заряда во времени, может быть рассчитана интегрированием потока ионов по поверхности частицы во времени (1). Для сферической частицы соответствующая формула была получена М. Потенье [5]:

$$q \approx 4\pi\epsilon_0 E a^2 \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right) \frac{kq_0 n_0 t}{4\epsilon_0 + kq_0 n_0 t},$$

(4)

где a – радиус частицы, м; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость частицы, Φ/m ; n_0 – концентрация ионов в межэлектродном промежутке, $\text{ион}/\text{м}^3$; ($n_{0(max)}$ – у коронирующего электрода; $n_{0(min)}$ – у осадительного электрода), $n_0 = i/keE_0$ [6]; e – заряд электрона, к.

Если принять частицу сажи, состоящую в основном из углерода, и обладающую диэлектрической проницаемостью, близкой к проводящим частицам, то формула (4) для максимального заряда частицы примет вид:

$$q \approx 12\pi\epsilon_0 E a^2.$$

(5)

О скорости зарядки частиц можно судить по следующим цифрам. Если принять для концентрации ионов n_0 значение типичное для полей коронного разряда 10^8 $\text{ион}/\text{см}^3$, то из (2.39) получаем, что за время t , равное 10^{-3} , 10^{-2} и 10^{-1} с, частица приобретает заряд, соответственно равный 8, 45 и 90 % своего предельного заряда [5].

Если частицы достаточно малы или напряженность электрического поля невелика, то движение ионов к частице происходит в основном под действием градиента их концентраций.

Для сферической частицы полный поток ионов вычисляется по следующей формуле [6]:

$$\vec{\Phi} = \int_{S_q} \vec{f} d\vec{S}_q = 4\pi r^2 \left(D \frac{dn_i}{dr} - kn_i \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \right),$$

(6)

где r – текущая координата, направленная от центра частицы.

В этом выражении мы не учли силу зеркального отображения, т. к. она влияет на заряд частиц, имеющих размеры более 0,05 мкм [7].

За положительное направление вектора $d\vec{S}$ принято направление к центру частицы. Решение уравнения (6) относительно концентрации дает:

$$n_i = e^{-\frac{k-q}{D4\pi a r}} \left[\frac{\epsilon_0 \Phi}{kq} \left(1 - e^{-\frac{k-q}{D4\pi a r}} \right) + C \right],$$

где $C_0 = n_0$, так как при $r \rightarrow \infty$, $n_i \rightarrow n_0$.

Чтобы определить Φ , необходимо задать граничные условия, т. е. концентрацию на поверхности сферы, описанной вокруг частицы. В непосредственной близости от поверхности частицы $n_i \approx 0$ [8]. Полагая $n_i \approx 0$, при $r = a$, имеем:

$$\Phi = \frac{kn_0q}{\epsilon_0 \left(e^{-\frac{k-q}{D4\pi a a}} - 1 \right)}.$$

(7)

Поскольку изменение заряда частицы происходит за счет потока ионов, то $dq/dt = q_i \Phi$. Интегрирование последнего уравнения дает:

$$t = \frac{\epsilon_0}{q_i n_0 k} \left[Ei \left(\frac{k-q}{D4\pi \epsilon_0 a} \right) - C_0 - \ln \left(\frac{k-q}{D4\pi \epsilon_0 a} \right) \right],$$

(8)

где $Ei \left(\frac{k-q}{D4\pi \epsilon_0 a} \right)$ – интегральная показательная функция; $C_0 = 0,5772$ – постоянная Эйлера.

Так как уравнение (8) не решается в явном виде относительно заряда частиц, то для удобства определения зависимости заряда от времени и концентрации ионов рассчитан график (рис. 1) функции

$$A(n_0 t) \equiv \frac{k-q}{D4\pi \epsilon_0 a}.$$

(9)

Это выражение показывает, что в случае чисто «диффузионной» зарядки заряд частицы пропорционален ее радиусу. Если коэффициент диффузии представить в виде $D = k k_B T / q_i$ [9], а q_i принять равным заряду электрона $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ К, то заряд частицы можно определить из следующего выражения:

$$q = 4\pi \epsilon_0 a \frac{k_B T}{q_i} A(n_0 t),$$

(10)

где $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $A(n_0 t)$ – определяется по кривой (рисунок).

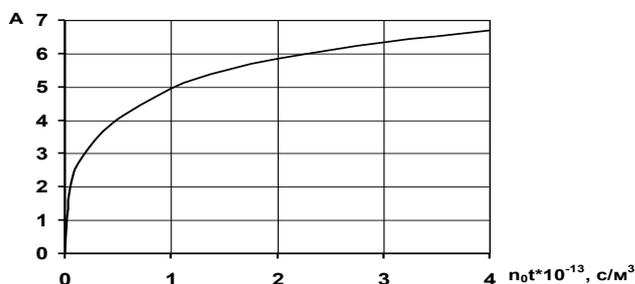


Рис. Зависимость параметра $A(n_0 t)$ от времени заряда и концентрации ионов

Строгое аналитическое решение задачи о зарядке частиц в поле коронного разряда с учетом обоих механизмов движения ионов к поверхности частицы представляет большие трудности. Поэтому величину заряда для частиц размером 0,05...2 мкм предлагается рассчитывать как сумму зарядов, рассчитанных по формулам «ударной» (4) и «диффузионной» (10) зарядки:

$$q_i = 4\pi\epsilon\epsilon_0 a^2 \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right) \frac{kq_i n_0 t}{4\epsilon_0 + kq_i n_0 t} + \frac{4\pi\epsilon_0 k_0 T}{q_i} A n_0 t \quad (11)$$

Нами рассмотрен вопрос зарядки частиц сферической формы. К ним можно отнести первичные сажевые частицы сферической формы с радиусом 0,0075...0,085 мкм. Для таких частиц присущ «диффузионный» механизм зарядки. Частицы больших размеров имеют неправильную геометрическую форму, но анализ фотоснимков частиц сажи, приведенных в работе [10], позволяют сделать вывод, что сажевые агрегаты с размерами более 1 мкм имеют конфигурацию формы проекции, близкой к сферической и эллипсоидной.

Установлено, что «величина отношения заряда приводящих частиц к площади их поверхности мало зависит от особенностей строения поверхности частиц и определяется их характерными размерами» [3]. В работе [4] в результате решения уравнений, описывающих кинетику ударной зарядки эллипсоидной проводящей частицы, обнаружено, что скорость зарядки не зависит от формы частицы. В [5] указывается, что если большая полуось эллипса превосходит меньшую не более чем в 2 раза, то заряд эллипсоида и шара с равной площадью поверхности различаются не более чем на 10 %.

Исходя из вышеизложенного можно с высокой достоверностью принять сферическую форму частиц в процессе «ударного» механизма зарядки.

По результатам выполненных аналитических расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Величину заряда сажевой частицы ОГ размером 0,1...2 мкм необходимо определять как сумму зарядов, рассчитанных по формулам «ударной» и «диффузионной» зарядки, т. е. по формуле (11).

2. Заряд частицы, перемещающейся в электрическом поле модели сажевого электрофильтра, с высокой степенью точности, может быть принят по максимальному значению в условиях «ударного» механизма зарядки, так как более 85 % осаждаемых частиц имеют размеры от 5 до 150 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сивухин, Д. В. Электричество: Общий курс физики / Д. В. Сивухин. – М., 1983. – 688 с.
2. Дымовые электрофильтры / И. П. Верещагин [и др.]; Под ред. В. И. Левитова. – М.: Энергия, 1980. – 448 с.
3. Мирзабекян, Г. З. Зарядка аэрозолей в поле коронного разряда / Г. З. Мирзабекян // Сильные электрические поля в технологических процессах: Электронно-ионная технология. – Выпуск 1 / Под ред. акад. В. И. Попкова. – М.: Энергия, 1969. – С. 20–39.
4. Мирзабекян, Г. З. Зарядка несферических частиц аэрозолей в поле коронного разряда / Г. З. Мирзабекян М. М. Пашин // Сильные электрические поля в технологических процессах: Электронно-ионная технология. – Выпуск 2 / Под ред. акад. В. И. Попкова. – М.: Энергия, 1971. – С. 48–82.
5. Основы электрогазодинамики дисперсных систем / И. П. Верещагин [и др.]. – М.: Энергия, 1974. – 480 с.
6. Макальский, Л. М. Экспериментальное исследование зарядки частиц размером 0,2...4 мкм ионами воздуха / Л. М. Макальский, Г. З. Мирзабекян. // Сильные электрические поля в технологических процессах: Электронно-ионная технология. – Выпуск 2 / Под ред. акад. В. И. Попкова. – М.: Энергия, 1971. – С. 95–108.
7. Arendt P., Kallmann H., Ueber den Mechanismus der Aufladung von Nebelteilchen, Z. Fur Phys., Bd 35. – 1926. – № 6. – S. 421–441.
8. Фукс, Н. А. Механика аэрозолей / Н. А. Фукс. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 352 с.
9. Мак-Даниэль, И. Подвижность и диффузия ионов в газах / И. Мак-Даниэль, Э. Мэзон. – М.: Мир, 1976. – 420 с.
10. Мачульский, Ф. Ф. Дисперсность и структура дизельной сажи / Ф.Ф. Мачульский // Токсичность двигателей внутреннего сгорания и пути её снижения: Доклады участников симпозиума, 6–10 декабря 1966 г. – М: Наука, 1966. – С. 206–219.