

ОЦЕНКА ЗАРЯЖЕННОСТИ ЧАСТИЦ НАНОДИСПЕРСНОГО КОРУНДА, ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ ПРИ ВЫЖИГАНИИ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ РАКЕТ

В работе произведена оценка соотношения между различными видами энергий в процессе взаимодействия частиц аэрозольной корундовой пыли, образующейся при утилизации твердого топлива ракет путем сжигания. Это позволило определить необходимый удельный электрический заряд для осаждения корундовой пыли.

При утилизации твердотопливных ракет способом выжигания в струе продуктов сгорания образуется большое количество корунда (Al_2O_3), выброс которого в атмосферу, с одной стороны, вреден, а с другой – расточителен [1].

Образующийся в жидкой фазе корунд, остывая вместе со струей продуктов сгорания твердого топлива ракеты, отвердевает в виде частиц шарообразной формы (рис. 1). Более крупные частицы корунда могут быть осаждены циклонированием, а примерно десятая (по массе) часть корунда, диаметр частиц в которой менее микрона, улетает в виде аэрозольной пыли в атмосферу.

Причина этого явления, очевидно, в том, что приобретая в процессе своего образования в струе продуктов сгорания положительный заряд, нанодисперсный корунд превращается в аэрозольную пыль и может долго диффундировать в воздухе во взвешенном состоянии, не оседая самостоятельно. Если помножить этот разлетающийся корунд на огромное количество ракет, подлежащих утилизации в связи с сокращением стратегических вооружений, то становится весьма очевидной актуальность решения проблемы улова нанодисперсного корунда.

В работе оценивается возможность решения с помощью озонной техники вышеописанной экологической и хозяйственно-стратегической проблемы, сопутствующей утилизации твердотопливных ракет.

Для осаждения частиц нанодисперсной аэрозольной корундовой пыли необходимо нейтрализовать имеющийся на ее частицах положительный заряд путем подачи зарядов противоположного знака. Озон, полученный в барьерном электрическом разряде, – это отрицательно заряженный газ, активный во взаимодействиях с другими веществами, поэтому он может использоваться для разрядки нанодисперсного корунда. Удельная мощность коронного разряда в озонаторе может быть более 10 кВт/м^2 , при этом в разрядном промежутке барьерного электрического озонатора создается большой электрический заряд отрицательного знака, благодаря асимметрии явлений автоэлектронной эмиссии. Частицы аэрозольного корунда, пе-

ремешиваясь с озонированным газом, теряют свой преимущественно положительный заряд, коагулируют и осаждаются.

Оценим сначала количественную потребность в отрицательном заряде, необходимом для осаждения одной частицы корундовой пыли. Для этого выясним количественные параметры диффундирующих аэрозольных частиц корунда. На основе материала (рис. 1) можно считать, что в не осаждающейся циклоном дисперсной корундовой пыли частицы имеют радиус не больше 1 мк.

Чтобы выяснить, что является определяющим в характере движения частиц, сравним кинетические энергии Броуновского движения частиц и их турбулентного движения в потоке с энергией электрического взаимодействия.

Средне квадратичная кинетическая энергия Броуновского движения частицы W_{Br} может быть оценена с помощью формулы

$$W_{Br} = \frac{3}{2} k_B T, \quad (1)$$

где k_B – постоянная Больцмана, T – температура выбросов из циклона.

Средне-квадратическая кинетическая энергия турбулентного движения частиц W_{turb} может быть

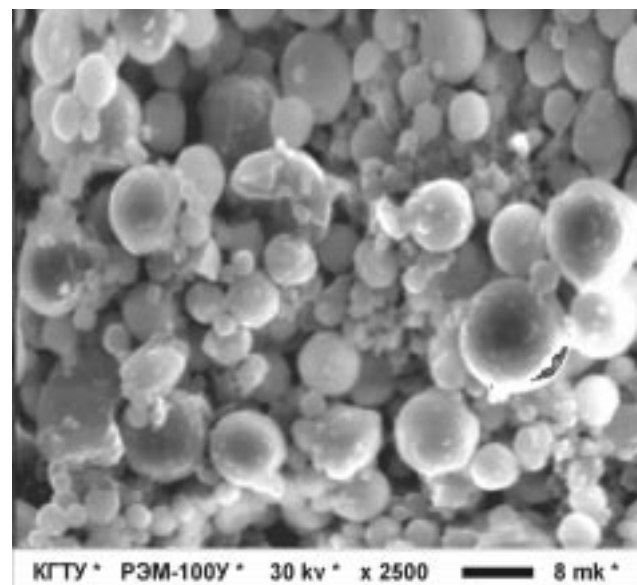


Рисунок 1. Изображение дисперсного корунда, взятого из циклона в 2500-кратном увеличении на электронном микроскопе (на фоне масштабного отрезка в 8 мк).

подсчитана согласно иерархической теории турбулентности Колмогорова через среднюю скорость направленного движения газа V , ибо они имеют одинаковый порядок. Поскольку при столкновении двух частиц их относительная скорость должна быть удвоена, то для максимальной энергии столкновения получаем

$$W_{\text{турб}} = \frac{mV^2}{2} \cdot a \quad W_{\text{турб}} = 2mV^2 \quad (2)$$

Здесь масса одной частицы m подсчитывается в соответствии с определенным выше как масса шара с плотностью корунда $\rho_c \approx 3,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$

$$m = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho_c \quad (3)$$

Выражение для энергии электрического взаимодействия заряженных частиц с расстоянием r между их центрами может быть записано в виде

$$W_{\text{el}}(r) = \varphi(r) q, \quad (4)$$

где $\varphi(r) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}$ – потенциал собственного электрического поля частицы, q – заряд частицы, ϵ_0 – электрическая постоянная.

Для решения вопроса о том, какая из энергий играет здесь определяющую роль в «соперничестве» с энергией электростатического отталкивания, необходимо сравнить между собой W_{Br} и $W_{\text{турб}}$. Результаты их расчетов для двух случаев приведены в табл. 1.

Таблица 1.

	Масса топлива – 3600кг		Масса топлива - 22000 т	
	Броуновское движение	Турбулентное движение	Броуновское движение	Турбулентное движение
Скорость, м/с	$9,19 \cdot 10^{-4}$	3,8	$9,52 \cdot 10^{-4}$	19,6
Энергия, Дж	$6,89 \cdot 10^{-21}$	$0,47 \cdot 10^{-12}$	$7,41 \cdot 10^{-21}$	$12,5 \cdot 10^{-12}$

Список использованной литературы:

1. Разработка и создание озонной установки для совершенствования системы улова и нейтрализации продуктов сгорания на экологическом стенде испытаний и утилизации твердотопливных ракет двигателей МБР РВСН / Рук. темы И.М. Кирко. – Пермь: Пермский военный институт ракетных войск, 2001. – 44 с.
2. Наноразмерные порошки взрывного синтеза // Информационное сообщение научно-исследовательского физико-технического института Красноярского государственного университета. – 2001. – 2 с.

Очевиден вывод: среднеквадратичная кинетическая энергия турбулентного движения частиц $W_{\text{турб}}$ на несколько порядков выше энергии Броуновского движения. Поэтому определяющим в характере движения частиц будет соотношение между $W_{\text{турб}}$ и $W_{\text{el}}(2a)$. Из равенства

$$W_{\text{турб}} = W_{\text{el}}(2a). \quad (5)$$

будет найдена граница, определяющая переход от аэрозольного состояния частиц к состоянию, при котором частицы сталкиваются и коагулируют за счет молекулярных сил. С подстановкой (2) и (4) в (5) последнее преобразуется к (6)

$$2mV^2 = \frac{q^2}{8\pi\epsilon_0 a}. \quad (6)$$

Из (6) находим, что граничное значение заряда частицы определится как

$$q = 4V \sqrt{\pi m a \epsilon_0}. \quad (7)$$

Следовательно, условие аэрозольности частиц

$$q > 4V \sqrt{\pi m a \epsilon_0}, \quad (8)$$

а условие их коагуляции –

$$q < 4V \sqrt{\pi m a \epsilon_0}. \quad (9)$$

Электрический потенциал поверхности частицы, определяемый как

$$\varphi(a) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 a}, \quad (10)$$

при подсчетах дает значения 46-237 В.

Таким образом, оценена заряженность частиц корунда и получена возможность оценить удельный заряд корундовой пыли для определения потребности в заряде для ее коагуляции.