

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ВОСПЛАМЕНЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ  
ПРИ ИХ ДИСПЕРГАЦИИ ЗА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ**

Кулешов П.С., Центральный институт авиационного моторостроения  
имени П.И. Баранова, г. Москва, Московский физико-технический  
институт (ГУ), г. Долгопрудный  
Савельев А.М., Центральный институт авиационного моторостроения  
имени П.И. Баранова, г. Москва

*Ключевые слова: диспергация, кластер, наночастица, ансамбль, дисперсия*

В работе проведено тестирование разработанного ранее механизма диспергации оксидированных наночастиц алюминия (nAl) [1] на экспериментальных данных по горению nAl с медианным диаметром  $D_p=18$  нм и толщиной оксидного слоя  $h=2.5$  нм в смеси  $O_2/N_2=1/4$  за ударной волной (УВ) [2]. Оценки показали, что, при параметрах за УВ  $T_5=1500$  К и  $P_5=20$  атм, скорость нагрева наночастиц составляет  $\sim 10^9$  К/с, что, согласно [1], приводит к их диспергации. Распределение по диаметру  $D$  первичных nAl с суммарным количеством  $N_0$  предполагалось максвелловским.

$$dN/dD = (4N_0/\sqrt{\pi}D_p) \cdot (D/D_p)^2 \cdot \exp(-D^2/D_p^2) \quad (1)$$

При диспергации одиночной наночастицы с диаметром  $D$  образуется фракция кластеров  $Al_n$  с медианным диаметром  $d_p$ , указанным в [1].

$$d_p = (D/c)^{2/3} \cdot (2\sigma/\rho)^{1/3} \quad (2)$$

Здесь  $\sigma$ ,  $\rho$  и  $c$  – коэффициент поверхностного натяжения, плотность и скорость звука в жидком ядре частицы. В зависимости от преобладающего фактора диспергации [1] фракция кластеров характеризуется разными видами дисперсий по размерам  $\mu_{1,2,3}$ :

$$\mu_1 = (\pi/2c)^2 2\sigma d_p / \rho$$

(поверхностная диспергация, ядро со свободной поверхностью) (3),

$$\mu_2 = \frac{4\sqrt{2}hd_p^{1/2}\sigma^{1/2}}{c\rho^{1/2}}$$

(поверхностная диспергация, часть ядра примыкает к оболочке) (4),

$$\mu_3 = \frac{2\sqrt{2}}{3c^3} \frac{\gamma\sigma_m h\sigma^{1/2}}{\rho^{3/2}} d_p^{1/2}$$

(объемная диспергация) (5),

где  $\gamma$  – коэф. Пуассона для Al,  $\sigma_m$  – напряжение разрушения в оболочке  $Al_2O_3$ .

На рисунке ( $t=0$ ) показан результат диспергации с поверхности жидкого ядра после полного отсоединения оболочки, согласно (1)-(3) – ансамбль кластеров  $Al_n$  (сумма их фракций с дисперсией  $\square_1$ ).

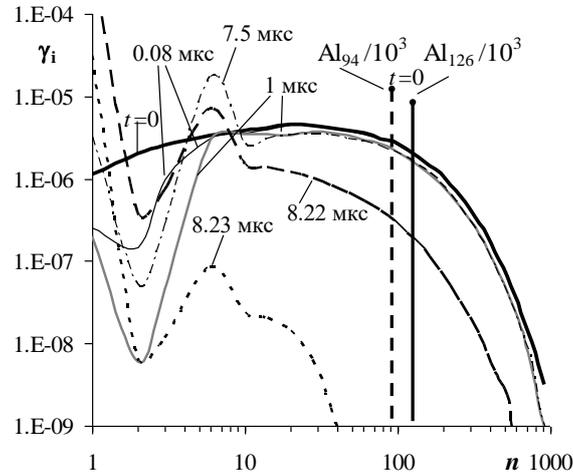


Рис.1 – Эволюция ансамбля кластеров  $Al_n$  ( $Al/Al_2O_3=1/0.45$ ) в смеси  $O_2/N_2=1/4$  за УВ при  $\phi=0.28$ ,  $T_5=1500$  К,  $P_5=20$  атм, а также мольные доли монодисперсных фракций  $Al_{94}$  и  $Al_{126}$ , заменяющих начальное распределение с  $\square_1$ .

Время воспламенения  $\tau_{in}$  смеси  $nAl-O_2-N_2$  рассчитывалось с использованием кинетического механизма [3], дополненного для описания испарения крупных кластеров реакциями  $Al_n \leftrightarrow Al + Al_{n-1}$  с  $n=250-1000$ . Коэффициент избытка топлива  $\phi=0.28$  оценен по максимальной температуре смеси  $3300 \pm 250$  К, измеренной в эксперименте. Из рисунка видно, что при эволюции ансамбля кластеров  $Al_n$  с течением времени увеличивается мольная доля  $\square_i$  мелких и уменьшается доля крупных кластеров. Рассчитанное значение  $\tau_{in}=8$  мкс хорошо согласуется с экспериментальным  $\tau_{in}^{exp}=8-13$  мкс, определенным по кривой светимости из [2] как время от начала излучения до достижения его максимума. Замена начального ансамбля кластеров монодисперсной фракцией  $Al_{94}$  ( $d_p=1.5$  нм – наиболее вероятный диаметр) приводит к уменьшению  $\tau_{in}$  на 20% ( $\tau_{in}^p \sim 6.5$  мкс), а фракцией  $Al_{126}$  ( $d_m=1.55$  нм – среднемассовый диаметр) – к увеличению  $\tau_{in}$  на 4% ( $\tau_{in}^m \sim 8.3$  мкс). Для кластеров с дисперсией  $\mu_2$  отличия более существенны:  $\tau_{in}=18.6$  мкс,  $\tau_{in}^p=5.6$  мкс ( $Al_{77}$ ),  $\tau_{in}^m=17.8$  мкс ( $Al_{368}$ ). Для кластеров с дисперсией  $\mu_3$ :  $\tau_{in}=9.4$  мкс,  $\tau_{in}^p=6.5$  мкс ( $Al_{94}$ ),  $\tau_{in}^m=9.5$  мкс ( $Al_{149}$ ).

Расчеты с дисперсиями  $\mu_{1,3}$  показали хорошее согласие с экспериментом, с дисперсией  $\mu_2$  – несколько хуже. При этом оказалось, что независимо от вида дисперсии, истинное распределение кластеров более корректно заменять

монодисперсной фракцией кластеров среднемассовых размеров, нежели фракцией кластеров наиболее вероятных размеров.

Работа выполнена при поддержке РФФИ: гранты №18-08-00476\_a, 17-01-00810\_a, 16-29-01098-офи\_m.

### Список литературы

1. Кулешов П.С. О диспергировании наночастиц алюминия // Горение и взрыв 2019 (принято в печать).
2. Allen D. et al. Heat transfer effects in nano-aluminum combustion at high temperature // Combustion and Flame 161 (2014) 295-302.
3. Kuleshov P.S., Saveliev A.M., Titova N.S., Starik A.M. Modeling study of Al nanoparticle oxidation in CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O environment // 9<sup>th</sup> International seminar on flame structure 9 ISFS Book of Abstracts. 2017. С. 63.

УДК 621.45

## ВЛИЯНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В ДВС

Шайкин А.П., Галиев И.Р.

Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти,  
sbs777@yandex.ru

*Ключевые слова: камера сгорания, скорость распространения пламени, двигатель, турбулентность.*

Процесс сгорания комpositного углеводородного топлива в поршневых двигателях представляет собой сложный физико-химический процесс, протекающий при изменении: давления, температуры топливовоздушной смеси (ТВС), объема камеры сгорания (КС), скорости перемещения ТВС, масштаба и интенсивности турбулентности, ширины зоны химических реакций (ЗХР), турбулентной и нормальной скоростей распространения пламени. Скорость распространения пламени характеризует воздействие турбулентности и физико-химических свойств ТВС на развитие начального очага горения при зажигании, длительность процесса сгорания в цикле и процесс догорания ТВС у стенок цилиндра. Несмотря на большое количество исследований в данной области, в настоящее время остается малоизученным влияние турбулентности на скорость распространения метановодородовоздушного пламени в ДВС.

Исследования проводились на одноцилиндровой моторной установке [1]. В качестве топлива использовался природный газ, в который добавлялся водород.