

## Нестационарный теплообмен металлических частиц с газом

Авдеев К.А.<sup>1</sup>, Фролов Ф.С.<sup>2</sup>, Фролов С.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Тульский государственный университет, Тула

<sup>2</sup>Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва  
smfrol@chph.ras.ru

При моделировании зажигания и горения металлических частиц – важных составляющих современных ракетных топлив – принимают ряд упрощающих допущений, которые не всегда оправданы. Например, для расчета теплового потока  $q$ , подводимого к поверхности частицы, часто используют закон Ньютона  $q = \alpha(T_g - T_p)$ , где  $T_g$  – температура газа,  $T_p$  – средняя температура частицы, а  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи. Между тем известно, что закон Ньютона справедлив лишь для условий установившегося теплообмена. Кроме того, тепловой поток определяется не средней температурой частицы  $T_p$ , а температурой ее поверхности  $T_{pi}$ . Цель данной работы состояла в определении поправок в законе Ньютона, позволяющих учесть нестационарный характер теплообмена металлических частиц с газом и неоднородное распределение температуры внутри частиц.

Динамику прогрева сферической частицы металла в покоящемся газе рассчитывали по трем моделям: (1) полной модели, основанной на сопряженных уравнениях теплопроводности в газе и в частице, (2) стандартной приближенной модели, основанной на обыкновенном дифференциальном уравнении для средней температуры частицы  $T_p$  и законе Ньютона  $q = \alpha(T_g - T_p)$ , а также (3) новой приближенной модели, основанной на обыкновенном дифференциальном уравнении для средней температуры частицы  $T_p$  и законе Ньютона в форме  $q = \alpha_{eff}(T_g - T_{pi})$ , где  $\alpha_{eff}$  – эффективный коэффициент теплоотдачи, учитывающий нестационарный характер теплообмена. Приближенную зависимость коэффициента  $\alpha_{eff}$  от параметров задачи и времени определили из аналитического решения для частицы с постоянной температурой поверхности. Зависимость температуры поверхности от средней температуры частицы  $T_{pi} = T_{pi}(T_p)$  определили путем обобщения численных решений, полученных с использованием полной модели.

Сравнение результатов расчетов по трем указанным моделям для частиц алюминия, магния, бора и железа показало, что новая модель значительно лучше согласуется с расчетами по полной модели, чем стандартная. Максимальные отклонения расчетной средней температуры частицы  $T_p$  от численного решения сопряженной задачи при использовании новой модели не превышали 1%–2%, тогда как стандартная модель давала отклонения до 25%. Наибольшие отклонения наблюдались при высоких температурах газа. Последнее особенно важно для задачи о воспламенении частиц металлов в окислительной атмосфере. Другое важное достоинство новой модели – наличие в ней температуры поверхности частицы  $T_{pi}$ , которая существенно отличается от средней температуры  $T_p$ . При решении задачи о воспламенении частиц использование  $T_{pi}$  вместо  $T_p$  может повлиять на временные характеристики процесса ввиду сильной зависимости скорости гетерогенной реакции от температуры.

Таким образом, в работе предложена новая модель теплообмена частицы металла с газом, которая учитывает нестационарный характер процесса и неоднородное распределение температуры внутри частицы. Расчеты по новой модели хорошо согласуются с результатами численного решения полной сопряженной задачи.

Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (гранты 05-08-18200а и 05-08-50115а).