

## ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

УДК 536.46+662.61

DOI: 10.17223/00213411/68/10/16

### Расчет нестационарной скорости горения металлизированного смесевого твердого топлива при гармоническом изменении давления\*

М.С. Середа<sup>1</sup>, В.А. Порязов<sup>1</sup>, А.Ю. Крайнов<sup>1</sup><sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Проведены расчеты нестационарной скорости горения металлизированного смесевого твердого топлива при гармоническом изменении давления над поверхностью горения. Получены зависимости амплитуды колебаний скорости горения от частоты колебаний давления. Показано, что амплитуда скорости горения зависит от частоты немонотонно. С увеличением частоты амплитуда сначала растет, а затем уменьшается. Показано, что добавка мелкодисперсного порошка алюминия в состав топлива снижает зависимость мгновенной скорости горения при гармоническом изменении давления. При повышении порядка химической реакции в газе скорость горения увеличивается. Показано, что при гармоническом изменении давления средняя скорость горения больше стационарной скорости при среднем давлении.

**Ключевые слова:** смесевое топливо, алюминий, скорость горения, гармонические колебания давления.

#### Введение

Одной из актуальных задач теории горения является определение нестационарной скорости горения твердых ракетных топлив. В частности, при изменении давления в камере сгорания. Феноменологическая теория нестационарного горения [1, 2] позволяет предсказать зависимость скорости горения от изменения давления при относительно небольших скоростях изменения давления [3, 4].

В некоторых случаях в камерах сгорания ракетных двигателей на твердом топливе возникают колебания давления, обусловленные совокупностью причин, таких как размеры камеры сгорания, свойства твердого топлива, давление в камере сгорания [5, 6]. Для экспериментального изучения этого явления используется Т-камера [7, 8]. Частота изменения давления в камере сгорания может изменяться от 100 до 1000 1/c и выше. Развитие колебаний давления объясняют акустической проводимостью топлива [7–10]. Однако в этих экспериментах определяются лишь изменение давления в камере сгорания во времени и средняя скорость горения топлива в этих условиях. В [1] представлено аналитическое решение задачи о средней скорости горения твердого топлива в условиях колебаний давления в камере сгорания. Показано, что при гармоническом изменении давления средняя скорость горения меньше стационарной скорости при среднем давлении.

Цель данной работы – проведение анализа нестационарного горения металлизированного смесевого твердого топлива (МСТТ) при гармоническом изменении давления над поверхностью горения. Задача моделирования нестационарного горения твердых ракетных топлив при гармоническом изменении давления решена с использованием сопряженной модели горения твердого топлива, когда учитываются процессы переноса тепла и в твердой, и в газовой фазе [11, 12].

#### Математическая модель

Система уравнений математической модели в системе координат, связанной с поверхностью твердого вещества, запишется как в [11]. Физическая постановка задачи о горении МСТТ подробно описана в работе [12].

Для конденсированной фазы, при  $-\infty < x < x_s$ :

$$c_1 \rho_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial t} + u \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + Q_1 k_1 \rho_1 (1 - \eta) \exp \left( -\frac{E_1}{RT_1} \right), \quad (1)$$

\* Работа выполнена при финансовой поддержке госзаказа Министерства науки и высшего образования (проект № FSWM-2020-0036).