

## Математическая модель конденсации оксида алюминия в соплах

Груздь С.А., Корепанов М.А.

УдГУ, г.Ижевск,  
УФИЦ УрО РАН, г.Ижевск

В состав многих современных ракетных топлив входит алюминиевый порошок, который при горении хорошо увеличивает удельный импульс, однако у него есть один существенный недостаток - образование оксида алюминия при сгорании. При движении потока по соплу температура движущихся газов существенно падает, что приводит к образованию конденсированной фазы оксида алюминия. Нарушение гомогенности состава продуктов сгорания приводит к скачкам таких параметров как температура и давление потока. К тому же, движущемуся со сверхзвуковой скоростью потоку труднее уносить с собой капли конденсата. Все это приводит к существенному уменьшению тяги [1].

Основной задачей этой проблемы стоит оптимальный подбор параметров топлива, а также геометрии сопла таким образом, чтобы образующиеся зародыши оксида алюминия были как можно меньшего размера и всю смесь в целом можно было бы считать гомогенной. Реальные эксперименты в этой области отличаются большими материальными затратами, в связи с чем разработка математической модели расчета параметров сверхзвукового потока с учетом зародышей капель оксида алюминия очень важна [2-3]. В работе представлена подобная модель, которая включает в себя два этапа. На первом этапе рассчитывается состав продуктов сгорания алюминия в среде аргона. Расчеты позволяют получить распределение образующихся кластеров оксида по размерам. Появление сверхкритического кластера в составе продуктов сгорания приводит к началу спонтанной конденсации, которая рассчитывается уже на втором этапе.

Разработанная модель позволяет точно уловить начало спонтанной конденсации и получить размеры сверхкритических кластеров которые приводят к "обрушению" системы.

Разработка моделей расчета конденсации оксида алюминия осложнены тем, что в газовой фазе этого оксида не существует, из-за чего все стандартные математические модели подобных задач тут не применимы, необходимо учитывать особенности появления зародышей за счет слияния других окислов алюминия [2].

Результаты, полученные на экспериментальных уменьшенных моделях не всегда согласуются с данными полученными на больших оригинальных соплах, из-за того что в малых конденсация в потоке не успевает происходить. Предложенная математическая модель, учитывающая скорость образования зародышей [4-5], показала что действительно в соплах с подобной геометрией конденсация ведет себя по разному. Параметры на выходе из сопла меняются не пропорционально увеличению размеров.

В результатах численных экспериментов получены значения парциальных давлений компонентов продуктов сгорания, в том числе и доля оксида алюминия. Имеются графики изменения температуры и суммарного давления сверхзвукового потока в соплах разной геометрии.

### Список литературы:

- [1] Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В., Логачев В. С., Коротков А. И. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972. 294 с.
- [2] Сандарам Д., Янг В., Зарко В. Е. Горение наночастиц алюминия (Обзор) // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51, № 2. С. 37-63.
- [3] Анисимов М. П. Нуклеация: теория и эксперимент // Успехи химии. 2003. Т. 72, № 7. С. 664-705.
- [4] Korepanov, M. A., & Gruzdy, S. A. (2016). Mathematical modeling of flow with homogeneous condensation. In *Applied Mathematical Models and Experimental Approaches in Chemical Science* (pp. 305–332). Apple Academic Press. <https://doi.org/10.1201/9781315366203>.
- [5] Корепанов М.А., Груздь С.А. Математическое моделирование гомогенной конденсации оксида алюминия в среде аргона // Химическая физика и мезоскопия. 2019. Т. 21. №2. С. 218-226.