

## ВЛИЯНИЕ НЕКОТОРЫХ ФАКТОРОВ РАЗЛОЖЕНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО МАТЕРИАЛА НА КОЭФФИЦИЕНТ РАСХОДА УТОПЛЕННОГО СОПЛА

Кириллова А.Н., Сабирзянов А.Н., Кузьмин В.В.  
КНИТУ – КАИ, г. Казань, ANSabirzyanov@kai.ru

*Ключевые слова:* ракетный двигатель твердого топлива, утопленное сопло, теплозащитный материал, температура разложения, тепловой поток, параметр вдува, коэффициент расхода, вычислительная гидродинамика, моделирование

Тепловая защита соплового блока ракетного двигателя твердого топлива (РДТТ) осуществляется активными теплозащитными покрытиями (ТЗП). Вопросы тепловой защиты входного участка утопленного сопла РДТТ существенно сложнее неутопленного. Обусловлено это взаимосвязью формы утопленной части сопла с проточным трактом двигателя, определяющей параметры потока на входе в сопло, наличием характерных зон воздействия высокотемпературного скоростного потока на ТЗП [1]. По тракту сопла с изменением параметров ускоряющего потока изменяются тепловой поток к поверхности ТЗП и параметры вдува продуктов разложения. Очевидно, что по длине входного участка утопленного сопла параметры вдува продуктов разложения теплозащитного материала (ТЗМ) в основной поток изменяются в большей степени, чем неутопленного.

Вдув в основной поток продуктов разложения, связующего через коксовый остаток матрицы, приводит к деформированию профилей параметров потока [2] и может оказать влияние на коэффициент расхода. Вопрос влияния параметров абляции ТЗП на коэффициент расхода мало изучен. Корректный учет изменения коэффициента расхода за счет вдува продуктов разложения осложняется множеством взаимосвязанных факторов. Целью данной работы являлось определение влияния вдува газообразных продуктов разложения на коэффициент расхода утопленного сопла, при согласованной интенсивности вдуваемых продуктов разложения с изменением теплового потока по тракту входного участка сопла, в зависимости от температуры продуктов разложения на поверхности коксового слоя.

Объектом исследования являлось утопленное сопло РДТТ с аблирующим ТЗП на входном участке радиусной формы. Исследования проведены средствами программного продукта ANSYS Fluent в идеальной газовой постановке квазистационарного осесимметричного приближения. Использовался подход, основанный на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, для замыкания которых применялась модель турбулентности SST  $k-\omega$  с типовым набором модельных констант.

Влияние вдува продуктов разложения на коэффициент расхода удобно представить в относительном виде:

$$\Delta\mu = \frac{\mu_{вд.i} - \mu}{\mu} \cdot 100\%,$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода без вдува;  $\mu_{вд.i}$  – коэффициент расхода с учетом вдува.

Изменения относительного коэффициента расхода, рассчитанного по параметрам торможения на входе сопла и в минимальном сечении, в зависимости от температуры вдуваемых газов и от параметра вдува, осредненному по поверхности входного участка, соответственно представлены на рис.1. Зависимости получены для ТЗМ П5-13 и П5-2 [3] и практически совпадают между собой, несмотря на отличия массовой доли газов пиролиза материалов связующих. Показано, что при расчете относительно параметров торможения в минимальном сечении коэффициент расхода принимает более низкие значения. Обусловлено это тем, при вдуве продуктов разложения поток не является изоэнтропическим. С увеличением температуры вдуваемых газов тепловой поток уменьшается и коэффициент расхода стремится к значению, полученному без учета вдува (рис.1, а).

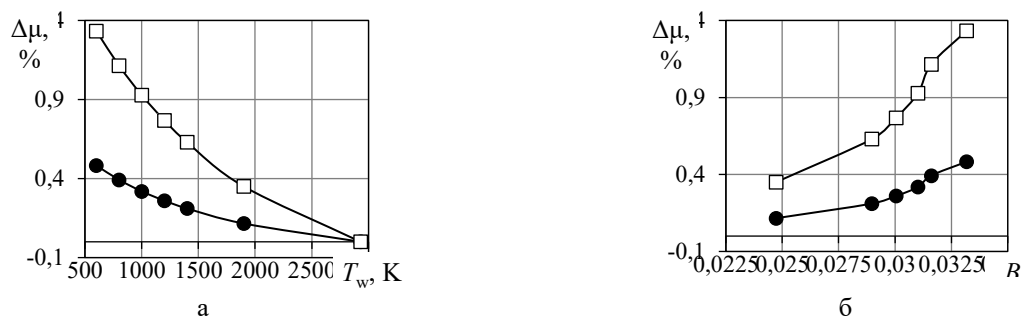


Рис.1 – Границы изменения коэффициента расхода за счет абляции ТЗМ: □ – расчет по параметрам торможения на входе в сопло; ● – расчет по параметрам торможения в минимальном сечении

Вдув продуктов разложения с поверхности входного участка сопла сопровождается падением параметров торможения потока, а действительное значение коэффициента расхода лежит в диапазоне, полученном через параметры торможения на входе в сопло и в минимальном сечении. Существенное влияние на коэффициент расхода оказывает температура продуктов абляции, зависящая от свойств ТЗМ. Показано, что при увеличении температуры продуктов разложения уменьшается параметр вдува и коэффициент расхода стремится к значению, соответствующему непроницаемому входному участку.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90277.

### Список литературы

1. Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива / А.М. Губертов, В.В. Миронов, Д.М. Борисов и др.; под ред. А.С. Коротеева. М.: Машиностроение, 2004. 512 с.
2. Термогазодинамика сложных потоков около криволинейных поверхностей / А.А. Халатов, И.В. Шевчук, А.А. Авраменко, С.Г. Кобзарь, Т.А. Железная. Институт технической теплофизики НАН Украины, 1999. 300 с.
3. Товстоног В.А. Экспериментальные исследования и анализ механизмов термического разрушения армированных пластиков при нагреве излучением // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2007. №2 С.15–34.

### Сведения об авторах

Кириллова Анна Николаевна, аспирант. Область научных интересов: газовая динамика, теплообмен, рабочие процессы в РДТТ, вычислительная гидродинамика.

Сабирзянов Андрей Наилевич, канд. техн. наук, доцент. Область научных интересов: рабочие процессы в тепловых двигателях, вычислительная гидродинамика.

Кузьмин Валентин Витальевич, студент. Область научных интересов: рабочие процессы в РДТТ, вычислительная гидродинамика.

### INFLUENCE OF SOME FACTORS OF DECOMPOSITION OF A HEAT-SHIELDING MATERIAL ON THE FLOW RATE COEFFICIENT OF THE RECESSED NOZZLE

Kirillova A. N., Sabirzyanov A. N., Kuzmin V. V.  
KNRTU-KAI, Kazan, Russia, ANSabirzyanov@kai.ru

*Keywords: solid propellant rocket motor, recessed nozzle, decomposition temperature, heat flux, injection parameter, flow rate coefficient, modeling.*

By means of computational fluid dynamics, studies have been made of the effect of the temperature of injected decomposition products on the flow rate coefficient of a recessed nozzle. The drop in the total parameters and the change of the flow rate coefficient are shown.