

**ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ РАСЧЁТА ПОТЕРЬ ИЗ-ЗА УТОПЛЕННОСТИ СОПЛА**© 2018 А.Н. Сабирзянов<sup>1</sup>, А.Н. Кириллова<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ<sup>2</sup>АО Казанское ОКБ «Союз», г. Казань**VERIFICATION OF MODEL FOR CALCULATION OF LOSSES DUE TO SUBMERGED NOZZLE**Sabirzyanov A.N.<sup>1</sup>, Kirillova A.N.<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russian Federation<sup>2</sup>Kazan Experienced Design Bureau «Soyuz», Kazan, Russian Federation

*Modern methods of numerical simulation are used to verify the model for investigating the perfection of flow in engines with submerged nozzles. Based on a comparison of the specific impulse losses associated with the submerged nozzle, satisfactory verification results were obtained. The possibility of investigating the consumption factor of a submerged nozzle as a function of the geometric characteristics on its gas-dynamic component is shown.*

Отличительной особенностью многих РДТТ является наличие утопленного сопла. Использование данной конструктивной схемы позволяет избежать потерь из-за сокращения длины сверхзвуковой части сопла, но появляются потери, связанные с утопленностью.

В данной работе был проведён анализ известных экспериментальных и расчётных данных доли потерь удельного импульса, связанных с утопленностью сопла. Уровень потерь для сопел с утопленностью от 0,03 до 0,75 (степень утопленности определялась как отношение длины утопленной части сопла к длине заряда  $\bar{L}_{\text{YT}} = L_{\text{YT}} / L_3$ ) от 0,22 % до 1,4 % при содержании алюминия в топливе 5 – 21,5 % [1, 2] (рис.1). В указанных работах отмечается, что при увеличении степени утопленности увеличиваются потери удельного импульса, а при равной степени утопленности большие потери соответствуют двигателю с наибольшим содержанием алюминия. В целом, максимальное значение потерь соответствует приведённому выше утверждению, однако, следующее по величине значение потерь соответствует двигателю с утопленностью  $\bar{L}_{\text{YT}} = 0,26$  и содержанием алюминия 16 %, что не соответствует указанной тенденции. Потери в данном двигателе из-за утопленности сопла составляют 1,3 % и это даёт основание полагать, что

влияние степени утопленности можно исследовать на гомогенной среде.

При исследовании газодинамической составляющей коэффициента расхода для классических сопел использовались современные численные методы с применением программного продукта ANSYS Fluent [3]. Целью данной работы является проверка применимости данного подхода к исследованию процессов совершенства истечения в двигателях РДТТ с утопленными соплами. Моделирование проводилось в рамках осесимметричного приближения в идеально-газовой адиабатной постановке стационарной задачи. Рассматривался двигатель с цилиндрическим зарядом и с конусным участком у заднего днища, а степень утопленности сопла варьировалась в пределах  $\bar{L}_{\text{YT}} = 0,09 - 0,34$ .

Геометрическая модель, помимо камеры сгорания и сопла, включала дополнительный объём для моделирования истечения сверхзвуковой (звуковой) струи в свободное пространство, что исключало необходимость определения граничных условий на выходе из сопла. В качестве рабочего тела рассматривался воздух, подаваемый с поверхности заряда с температурой, соответствующей рабочим условиям. Общий объём расчётных ячеек составлял порядка 180 тыс.,  $u^+$  на входе в сопло не превышал 35.

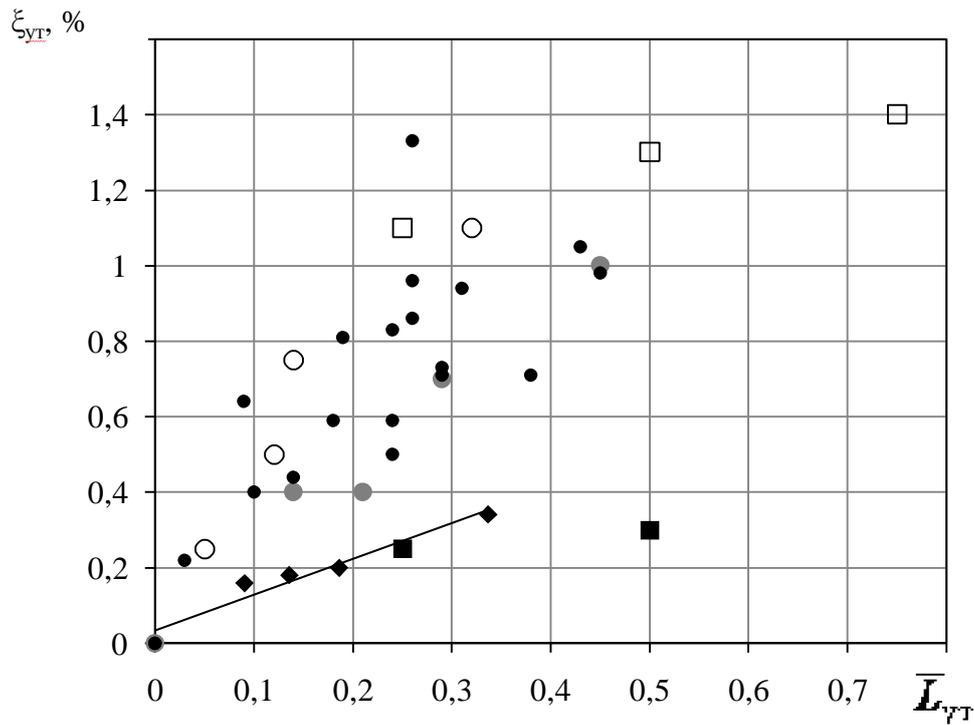


Рис.1. Влияние степени утолщенности сопла на  $\xi_{ут}$ :  
 ● – высотные РДТТ с утолщенными соплами [1];  
 ○ – отечественный экспериментальный РДТТ с содержанием Al в топливе 18 % [2];  
 ■ – зарубежный экспериментальный РДТТ с Al 5 % [2];  
 □ – зарубежный экспериментальный РДТТ с Al 21,5 % [2];  
 ● – экспериментальные данные  $\xi_{ут}$  сопел РДТТ США [2];  
 ◆ – исследуемая в данной работе расчётная модель двигателя с гомогенным рабочим телом

Граничные условия моделирования: на поверхности предполагаемого твёрдого топлива задавалось равномерное распределение расхода рабочего тела, его температура и параметры турбулентности потока; на выходе дополнительного объёма – постоянство атмосферного давления; стенки камеры сгорания и сопла гладкие с условиями прилипания и непротекания рабочего тела.

В качестве модели турбулентности рассматривалась двухпараметрическая модель RNG  $k-\epsilon$  с типовым набором модельных констант, прошедшая верификацию для данного типа задач [3].

Полученные результаты совпадают с ожидаемыми. Значения потерь, полученные для гомогенной среды, хорошо согласуются с экспериментальными данными при минимальном содержании алюминия в продуктах сгорания. Удовлетворительные результаты верификации позволяют сделать вывод, что исследовать коэффициент расхода утолщенного сопла РДТТ в зависимости от геомет-

рических характеристик допустимо по газодинамической составляющей с использованием расчётной модели, апробированной в [3].

#### Библиографический список

1. Шишков А.А., Панин С.Д., Румянцев Б.В. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива: Справочник. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
2. Энергетика ракетных двигателей на твёрдом топливе / Ю.М. Милехин, А.Н. Ключников, Г.В. Бурский, Г.С. Лавров – М.: Наука, 2013. – 207 с.
3. Сабирзянов А.Н., Кириллова А.Н. Численное моделирование влияния геометрических параметров сопла на коэффициент расхода ДЛА // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов междунар. научно-техн. конф. 22-24 июня 2016 г. – Самара: Самарский университет, 2016 – Ч.2.– С.39-40.