

УДК 621.454.3+536.8+519.6

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ РАСЧЁТА ПОТЕРЬ ИЗ-ЗА УТОПЛЕННОСТИ СОПЛА© 2018 А.Н. Сабирзянов¹, А.Н. Кириллова^{1,2}¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ²АО Казанское ОКБ «Союз», г. Казань**VERIFICATION OF MODEL FOR CALCULATION OF LOSSES DUE TO SUBMERGED NOZZLE**Sabirzyanov A.N.¹, Kirillova A.N.^{1,2}¹Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russian Federation²Kazan 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.

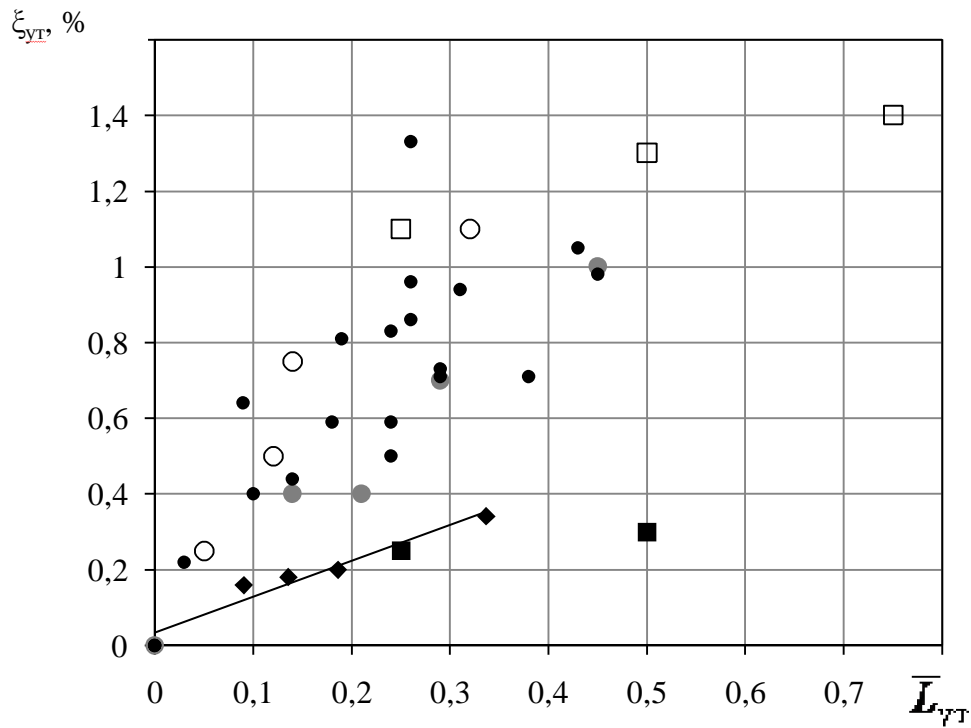


Рис.1. Влияние степени утолщенности сопла на $\xi_{ут}$:
 ● – высотные РДТТ с утолщенными соплами [1];
 ○ – отечественный экспериментальный РДТТ с содержанием Al в топливе 18 % [2];
 ■ – зарубежный экспериментальный РДТТ с Al 5 % [2];
 □ – зарубежный экспериментальный РДТТ с Al 21,5 % [2];
 ● – экспериментальные 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.