

DOI: 10.15593/2224-9982/2015.42.06

УДК 621.454.3.035.533.6

М.И. Соколовский^{1, 2}, Т.В. Нельзина¹

¹ ПАО «Научно-производственное объединение „Искра“», Пермь, Россия

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

ПРЕДЕЛЬНАЯ ЛИНИЯ ЭРОЗИОННОГО УНОСА КОНЦЕВОЙ ЧАСТИ СОПЛА РДТТ

Представлены результаты экспериментальных исследований выноса конденсированных частиц Al_2O_3 на концевую часть сопла крупногабаритного ракетного двигателя твердого топлива (РДТТ). Профиль сопла представляет собой укороченный контур с равномерной выходной характеристикой и угловой точкой в критическом сечении сопла. Изменение углов наклона траекторий конденсированных частиц Al_2O_3 к оси сопла запаздывает относительно изменения соответствующих углов линий тока в зоне как разгонного, так и выравнивающего участков. Следствием этого является то, что траектории частиц пересекают профиль сопла и происходит вынос частиц на концевую часть сверхзвукового раструба. Траектория частиц, пересекающих профиль сопла ближе всех к критическому сечению и отделяющая так называемую зону чистого газа, является предельной. Вынос конденсированных частиц окиси алюминия, начинающийся с точки пересечения профиля сопла предельной траекторией, приводит к эрозионному уносу концевой части сверхзвукового раструба, изготовленного из любого материала, применяемого в соплах.

Приведены результаты экспериментального определения предельной линии эрозионного уноса концевой части сопла РДТТ, т.е. такой линии, которая не будет изменяться при увеличении времени работы. Показано, что предельная линия эрозионного уноса представляет собой кривую с максимальным углом наклона к оси сопла в точке начала выноса и уменьшающимся углом к выходному сечению. Распространенное мнение, в соответствии с которым предельная линия эрозионного уноса концевой части сопла РДТТ близка к образующей усеченного конуса, не подтверждается экспериментом. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при проектировании сопел РДТТ.

Ключевые слова: ракетный двигатель твердого топлива, сопло, профиль сопла, эрозионный унос.

M.I. Sokolovskiy^{1, 2}, T.V. Nelzina¹

¹ PJSC Research and Production Association “Iskra”, Perm, Russian Federation

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

EROSIVE ABLATION MARGIN IN SOLID ROCKET MOTOR NOZZLE TIP

The article considers experimental results concerning Al_2O_3 condensed particles ablation upon large solid rocket motor (SRM) nozzle tip. Nozzle profile represents shortened contour with uniform output characteristic and angular point in nozzle throat. The change of slope angle in Al_2O_3 condensed particles path to the nozzle axis lags in change of corresponding streamline angles both in boost and balancing sections. As a result particles path crosses nozzle profile that causes their ablation upon su-

personic nozzle tip. Particle path crossing nozzle profile close to nozzle throat and separating the so-called pure gas zone is considered as marginal. Al_2O_3 condensed particles ablation starting from the cross-point of nozzle profile by marginal path leads to erosive ablation of supersonic nozzle tip produced from any material applied in nozzle manufacture.

In the article it is presented experimental determination results of erosive ablation margin in SRM nozzle tip which is invariable with operation period increase. It is shown that the erosive ablation margin is a curve with maximum slope to the nozzle axis in ablation initial point and reducing angle to the exit section. Common opinion that erosive ablation margin in SRM tip is close to truncated cone generatrix has not been approved experimentally. Obtained experimental data may be used in SRM nozzle designing.

Keywords: solid rocket motor, nozzle, nozzle profile, erosive ablation.

В ракетных двигателях на смесевом твердом топливе (РДТТ) продукты сгорания топлива содержат 0,32–0,39 мас. % конденсированных частиц окиси алюминия Al_2O_3 , имеющих диаметр в диапазоне от 1 до 10 мкм.

РДТТ имеют обычно жесткие габаритные ограничения, поэтому в большинстве двигателей сопла имеют длину сверхзвуковой части l_a , не превышающую диаметр выходного сечения d_a , т.е. относительное удлинение $l_a/d_a \approx 1$. Оптимальными для профилей таких сопел являются укороченные контуры с равномерной выходной характеристикой и угловой точкой в критическом сечении сопла.

Углы наклона траекторий конденсированных частиц окиси алюминия к оси сопла отстают от соответствующих углов линий тока в зоне как разгонного, так и выравнивающего участков. Следствием этого является то, что траектории частиц пересекают профиль сопла и происходит вынос частиц на концевую часть сверхзвукового раструба. Чем ближе к оси находится частица в критическом сечении сопла и чем больше ее диаметр и, следовательно, масса, тем дальше от критического сечения происходит вынос частиц. Общая масса выносимых частиц увеличивается от сечения начала выноса, характеризуемого относительными координатами x_s , y_s , к выходному сечению сопла. Траектория частиц, пересекающая профиль сопла ближе всех к критическому сечению и отделяющая так называемую зону чистого газа, является предельной (рис. 1).

Вынос конденсированных частиц окиси алюминия, имеющих высокие температуру и скорость, приводит к эрозионному уносу концевой части сверхзвукового раструба, изготовленного из любого материала, применяемого в соплах.

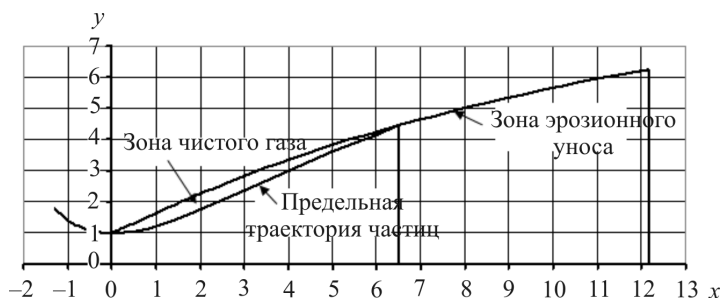


Рис. 1. Предельная траектория конденсированных частиц

Для определения величин эрозионного уноса раструба НПО «Искра» было изготовлено сопло со степенью расширения $\bar{d}_a = 7$ с большой толщиной (~ 50 мм) в выходном сечении. Испытание показало, что эрозионный унос в выходном сечении сопла составил $\delta = 25$ мм. Толщина работоспособного сопла с такой величиной уноса является недопустимо большой для реальной и баллистически эффективной конструкции двигателя.

По результатам испытания толстого экспериментального сопла линия эрозионного уноса представляла собой кривую с углом наклона к оси сопла, уменьшающимся от координат начала эрозионного уноса до выходного сечения с 21 до 18° . Было неясно, является ли эта линия предельной, т.е. такой, которая не будет изменяться при увеличении времени работы. Некоторые специалисты высказывали предположение, что линия уноса на экспериментальном сопле не является предельной из-за недостаточного для ее реализации времени работы двигателя, равного ~ 40 с. Предельная линия эрозионного уноса, по их мнению, из-за увеличивающейся к выходному сечению суммарной массы выносимых частиц должна быть с увеличивающимся к выходному сечению углом наклона к оси сопла.

При выборе толщины раструбов сопел необходима методика расчета эрозионного уноса концевой части сопла. В статье [1] предложена методика расчета предельной линии эрозионного уноса. Далее приводится сравнение результатов расчета по методике [1] с экспериментальными данными, полученными в НПО «Искра», на крупногабаритном РДТТ с временем работы, равным ~ 60 с. На рис. 2 показан опытный эрозионный унос концевой части сопла со степенью расширения $\bar{d}_a = 3,5$ и рассчитанная для него по методике [1] предельная линия эрозионного уноса.

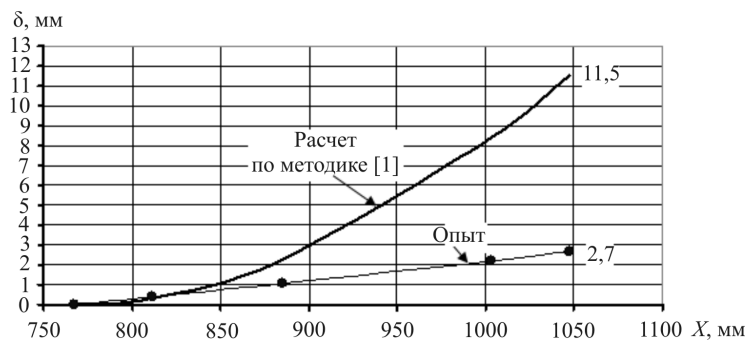


Рис. 2. Эрозионный унос в сопле с $\bar{d}_a = 3,5$

Видно, что расчетная величина предельного эрозионного уноса значительно превышает опытную. Расчетная предельная линия эрозионного уноса близка к образующей конуса. На опыте линия эрозионного уноса имеет максимальный угол наклона в точке начала выноса и уменьшающийся к выходному сечению. Такую форму линии уноса некоторые специалисты называют «сверхзвуковой ложкой» и считают, что при увеличении времени работы РДТТ эта линия преобразуется в образующую усеченного конуса.

В книге [2] при расчете эрозионного уноса материала концевой части сопла РДТТ принято допущение: «угол наклона траекторий частиц вблизи стенки сопла θ_s остается постоянным вниз по потоку, считая от точки начала заметного выпадения частиц». Авторы полагают, что «при достаточно большом времени работы концевая часть становится конической с углом $\theta = \theta_s$ ».

При исследовании влияния поворота сопла на эрозионный унос вопрос о форме предельной линии эрозионного уноса приобрел особую актуальность. Определить влияние поворота сопла на эрозионный унос можно только на испытании сверхзвукового раструба, концевая часть которого выполнена по предельной линии уноса в стационарном положении.

С целью определения формы предельной линии эрозионного уноса был проведен опыт на крупногабаритном РДТТ с соплом, имеющим степень расширения $\bar{d}_a = 5,5$ с временем работы 60 с. Полученная линия эрозионного уноса представляла собой кривую с углом наклона к оси сопла в точке начала выноса частиц $\theta_s = 20,7^\circ$ и углом в выходном сечении, равным 18° . Величина уноса в выходном сечении составила 23,5 мм. Затем было изготовлено сопло, концевая часть ко-

торого была выполнена по линии эрозионного уноса, полученной на предыдущем испытании. Таким образом, время воздействия конденсированных частиц на раструб было увеличено в два раза и составило примерно 120 с. Результатом этого эксперимента явилось то, что величина уноса раструба была сопоставима с химическим уносом. Это означает, что уже на первом опыте в течение первых 60 с была реализована предельная линия эрозионного уноса. На рис. 3 показаны опытная предельная линия эрозионного уноса и расчетная по методике [1].

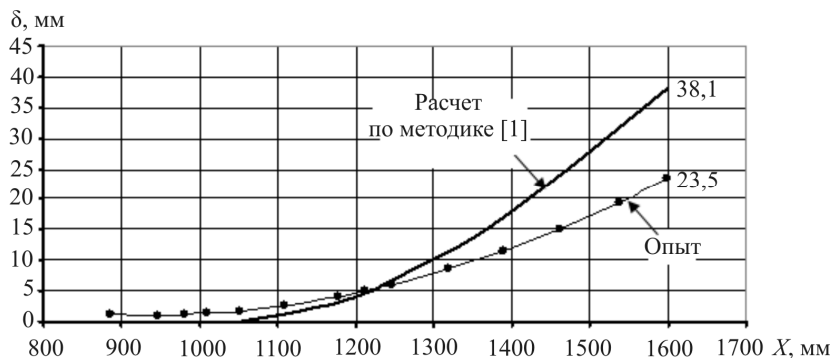


Рис. 3. Эрозионный унос в сопле с $\bar{d}_a = 5,5$

Из рис. 3 следует, что имеется значительное расхождение опытных и расчетных данных. Предельная линия эрозионного уноса концевой части сопла РДТТ не является образующей усеченного конуса, а представляет собой кривую с уменьшающимся наклоном к оси сопла в сторону выходного сечения.

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментальные исследования, проведенные в НПО «Искра», крупногабаритного РДТТ с профилем сопла, выбранным из семейства контуров с равномерной выходной характеристикой и угловой точкой в критическом сечении, показали, что предельная линия эрозионного уноса представляет собой кривую с максимальным углом наклона к оси сопла в точке начала выноса и уменьшающимся углом к выходному сечению.

2. Расчет эрозионного уноса по методике [1], в соответствии с которой предельная линия эрозионного уноса концевой части сопла РДТТ близка к образующей усеченного конуса, экспериментально не подтвердился.

Библиографический список

1. Кочетков Ю.М. Влияние величины входного угла сверхзвукового контура на разгар сопла РДТТ // Двигатель: науч.-техн. журнал. – 2003. – № 6. – С. 38–39.
2. Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива / А.М. Губертов, В.В. Миронов, Д.М. Борисов [и др.]. – М.: Машиностроение, 2004. – С. 312–317.

References

1. Kochetkov Yu.M. Vliyanie velichiny vkhodnogo ugla sverkhzvukovogo kontura na razgar sopla RDTT [Influence of entrance angle of supersonic part of solid rocket motor nozzle on erosion]. *Dvigatel*, 2003, no. 6, pp. 38-39.
2. Gubertov A.M., Mironov V.V., Borisov D.M. [et al.]. *Gazodinamicheskie i teplofizicheskie protsessy v raketnykh dvigatelyakh tverdogo topliva* [Gas-dynamic and thermalphysic processes in solid propellant rocket motors]. Moscow: Mashinostroenie, 2004, pp. 312-317.

Об авторах

Соколовский Михаил Иванович (Пермь, Россия) – член-корреспондент РАН, академик РАН, доктор технических наук, профессор, генеральный конструктор ПАО «Научно-производственное объединение „Искра“» (614038, г. Пермь, ул. Академика Веденеева, д. 28, e-mail: pioneer241@mail.ru), заведующий кафедрой «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: rkt@pstu.ru).

Нельзина Тамара Васильевна (Пермь, Россия) – ведущий конструктор ПАО «Научно-производственное объединение „Искра“» (614038, г. Пермь, ул. Академика Веденеева, д. 28, e-mail: pioneer241@mail.ru).

About the authors

Mikhail I. Sokolovskiy (Perm, Russian Federation) – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Member of the Russian Academy of Rocketry-Artillery Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, General Designer, PJSC Research and Production Association “Iskra” (28, Akademika Vedeneeva st., Perm, 614038, Russian Federation,

e-mail: pioneer241@mail.ru), Head of Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: rkt@pstu.ru).

Tamara V. Nelzina (Perm, Russian Federation) – Leading Designer of PJSC Research and Production Association “Iskra” (28, Akademika Vedeneva st., Perm, 614038, Russia, e-mail: pioneer241@mail.ru).

Получено 15.05.2015