

# ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

## ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОМАССОБМЕНА СОПЕЛ РДТТ ПРИ РАБОТЕ НА ЗВЕЗДООБРАЗНЫХ ЗАРЯДАХ

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н., профессор ФГБОУ ВО "Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)" (МАИ)

*Показано, что звездообразный заряд твердого топлива обуславливает повышенный существенно неравномерный разгар в до- и сверхзвуковой частях сопла, причем искажения в сверхзвуковой части продолжают интенсивно развиваться и после выгорания лучей в заряде. Получено новое явление в РДТТ, заключающееся в том, что в сверхзвуковом сопле предварительно нанесенное на поверхность стенки возмущение подвергается воздействию со стороны потока нового механизма разрушения и уноса материала в направлении потока с нарастающей скоростью и приводящее к многократному увеличению тепломассообмена в этой области. Максимальные уносы материала на входной кромке утопленного сопла происходят в местах, расположенных напротив лучей заряда. Интенсивность развития начальных искажений профиля сверхзвуковой части сопла и форма следа за ними зависят от начальной формы искажения, его местоположения и относительной глубины.*

*It is shown that the star-shaped charge of solid fuel causes an increased significantly uneven acceleration in the pre- and supersonic parts of the nozzle, and distortions in the supersonic part continue to develop intensively even after the rays burn out in the charge. A new phenomenon is obtained in the rdt, which consists in the fact that in a supersonic nozzle, a pre-applied perturbation on the wall surface is affected by the flow of a new mechanism of destruction and entrainment of material in the direction of the flow with increasing speed and leads to a multiple increase in heat and mass transfer in this area. Maximum material entrainment at the inlet edge of the recessed nozzle occurs in places located opposite the charge beams. The intensity of development of initial distortions of the profile of the supersonic part of the nozzle and the shape of the trace behind them depend on the initial form of distortion, its location and relative depth.*

**Ключевые слова:** турбулентность, метод горячей визуализации, метод уноса массы.

**Keywords:** turbulence, hot method of visualization, method of mass entrainment.

В процессе отработки натурного двигателя со звездообразным зарядом [1, 2] было выявлено воздействие неравномерного потока на величину разгара в сверхзвуковой части сопла. После испытания двигателя обнаружился сильно неравномерный унос материала стенок в сверхзвуковой и дозвуковой части сопла. Наибольший унос материала стенок за критическим сечением сопла наблюдался в местах, расположенных между лучами, напротив торцов звездообразного заряда, причем профиль получившегося углубления имел форму, близкую к прямоугольной.

Существенное влияние трехмерности течения на развитие пограничного слоя, его отрыв в местах взаимодействия с возникающими на искажениях скачками уплотнения и отсутствие экспериментально подтвержденной физической модели механизма разрушения теплозащитных материалов в местах интенсивного осаждения конденсированной фазы не позволяют достаточно точно рассчитать ожидаемые величины локальных уносов материала стенок сопла и на этом основании сформулировать рекомендации по обеспечению работоспособности соплового блока.

### Методика экспериментальных исследований

Трудности теоретического описания подобных трехмерных течений явились причиной преимущественного развития экспериментальных работ в этой области.

В работе [3] экспериментально на газодинамических моделях выявлена существенно отличная от осесимметричной картина обтекания сопла газовым потоком и установлено влияние формы заряда и его компоновки на распределение давлений и скоростей обтекания внешней поверхности утопленной части сопла. Показано влияние соотношения канала заряда и входного участка сопла, геометрических и газодинамических параметров проточного тракта на глубину локальных искажений входной части сопла и расходные характеристики. Получены также данные по деформации профилей газодинамических параметров в сужающейся части сопла.

Перечисленные результаты получены на газодинамических моделях с имитаторами, соответствующими зарядам твердого топлива с круглым каналом в задней (околосопловой) части. Такие модели испытывались в НИИТП и в ЛМИ. При этом как в случае непроница-

емых имитаторов зарядов со струйной подачей воздуха в кольцевой и центральный каналы модели, так и в случае проницаемых имитаторов, с распределенным по длине поперечным вдувом воздуха через пористые стенки, были получены практически одинаковые результаты по газодинамике поворотного управляющего сопла.

К настоящему времени практически отсутствуют систематические экспериментальные исследования рассматриваемого явления. В отдельных натуральных и модельных испытаниях был зафиксирован неоднородный унос материала стенок сопла, но он рассматривался, как правило, лишь с точки зрения определения энергетических характеристик двигателя.

В настоящей работе определялось влияние формы заряда на процессы образования и развития искажений контура сопла модельного РДТТ с зарядом твердого топлива. Эксперименты проводились на модельном двигателе со значением  $d_{кр} = 22$  мм (рис. 1).

В работе использовались топлива с содержанием алюминия 18 и 20 %. Давление в камере сгорания составляло  $60$  кг/см<sup>2</sup>.

В основу экспериментальной методики был положен метод уноса массы [4, 5]. Время работы двигателя составляло 2 с, что существенно превышало время нестационарного прогрева фторопласта, равное примерно 0,1 с.

Профиль контура сопла был выбран из Руководства для конструкторов по профилированию сверхзвуковых сопел [6]. Звездообразная форма канала моделировалась соответствующими

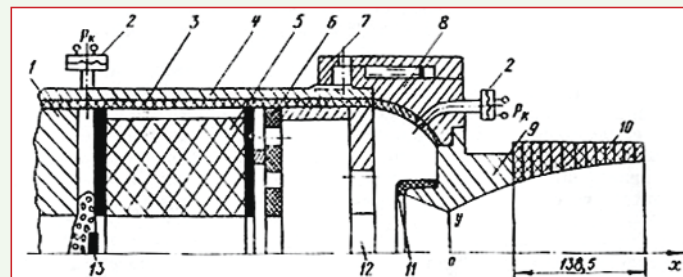


Рис. 1 Схема экспериментальной установки:

- 1 - наполнитель; 2 - штуцер измерения давления; 3 - ТЗП; 4 - корпус;
- 5 - топливный насос; 6 - диафрагма; 7 - предохранительное устройство;
- 8 - заднее днище; 9 - неуносимая часть сопла; 10 - уносимая часть сопла;
- 11 - насадок из уносимого материала; 12 - имитатор; 13 - воспламенитель

щими имитаторами и модельными зарядами, которые воспроизводили необходимые трехмерные потоки.

За величину локального линейного уноса материала стенок принималась разница между толщиной кольца, измеренной до и после испытания. Обмеры проводились в точках, равномерно расположенных по окружности с шагом  $6^\circ$ .

**Результаты исследований особенностей теплообмена в двигателях с имитаторами**

В процессе испытаний было обнаружено, что при всех используемых имитаторах звездообразного канала заряда зоны максимального уноса материала на входной кромке утолщенного сопла располагались напротив лучей заряда, что объяснялось воздействием на него мощного двухфазного потока. При этом избыточная величина уноса материала в этих местах относительно фонового составляла 6...7 мм (рис. 2, кривая "а").

Анализ полученных результатов показал, что форма имитатора заряда оказывала существенное влияние на форму и величину искажения профиля сверхзвуковой части сопла (рис. 2, кривая "б").

Однако выявить причину возникновения искажений профиля, подобных наблюдаемым при натурных испытаниях, не удалось. Поэтому была запланирована серия экспериментов на зарядах твердого топлива с каналами звездообразного сечения.

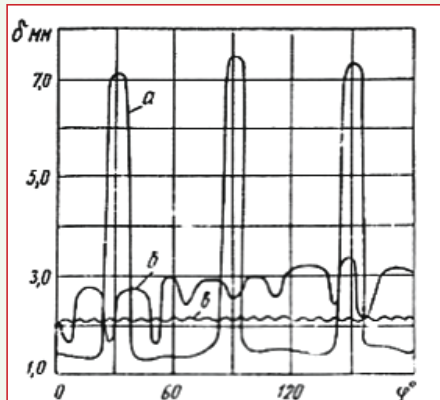


Рис. 2 Картина уноса материала стенок сопла в его поперечном сечении:  
 а - входная кромка утолщенного сопла;  
 б - сверхзвуковое сопло с имитатором звездообразного канала;  
 в - сверхзвуковое сопло без имитатора

**Исследование особенностей теплообмена в соплах модельных двигателей со звездообразными каналами в зарядах**

Экспериментальная установка для следующей серии экспериментов была доработана. Рабочая часть, составленная из фторопластовых колец, была увеличена и начиналась непосредственно от критического сечения. Имитатор в этом случае не использовался. Звездообразный заряд устанавливался напротив сопла. Эксперименты были проведены на небольших зарядах твердого топлива, представленных на рис. 3. Внутренняя часть каналов зарядов изготавливалась механическим способом. Было испытано два типа зарядов: с 4- и 6-лучевыми каналами.

Унос в лобовой части утолщенного сопла проявился достаточно четко и по форме был похож на унос, полученный при испытаниях на имитаторах. Значения линейных уносов по длине сверхзвуковой части сопла представлены на рис. 4.

Из рисунка видно, при испытаниях с зарядами без лучей кривые уносов не расслаиваются, так как по всем окружностям наблюдается только фоновый унос. На испытании с шестилучевым зарядом видны расслоения уносов напротив лучей. Особенно это хорошо видно в закритической области. На 4-лучевых зарядах различия более четкие. В этой области двухфазные потоки более локализованы. Тем не менее, следует отметить, что разница уносов по лучам относительно фонового очень небольшая. По-видимому, аналогичная картина наблюдается и в натурных экспериментах. Ведь известно из расчетов, что звезды в сечениях каналов из-за быстрого выгорания заряда в этой области существуют порядка трех-пяти секунд. Далее канал приобретает форму, близкую к цилиндрической, а значит унос материала будет стремиться к равномерному по окружности. Но на практике такого не происходит. Уносы в натурных соплах очень

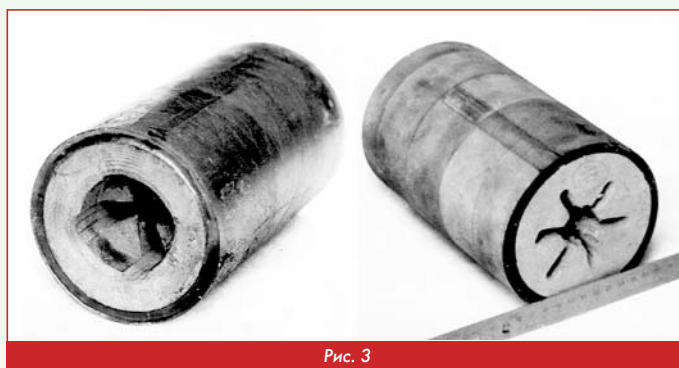
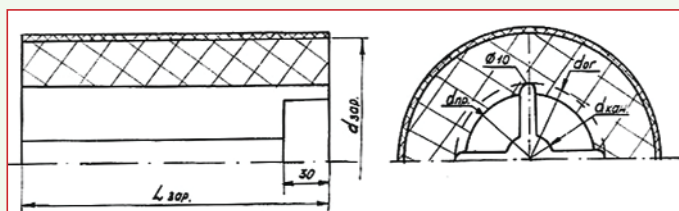


Рис. 3



№ исп.	01	02	04	05	06	07	08	09	11	12
Кол-во лучей	6	4	4	4	4	4	0	0	0	0
d кон.	30	17	30	40	40	17	30	65	30	30
d пр.	80	70	80	80	80	80	—	—	—	—
d ор.	90	80	90	90	90	90	—	—	—	—
d соп.	110	110	110	110	110	110	110	115	110	110
L соп.	200	230	200	200	232	230	190	320	190	190

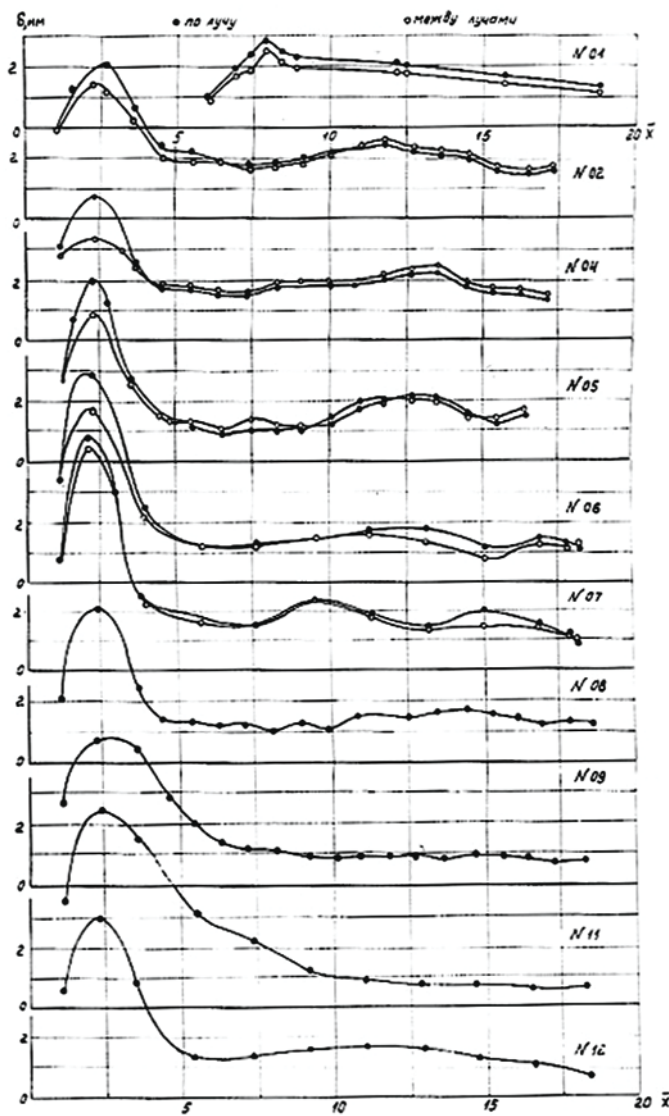


Рис. 4

глубокие и рельефные. В связи с этим появилось предположение о том, что звездообразный поток формирует только затравку для будущего уноса, оставляя первичное углубление на поверхности, а затем стенка разрушается совсем по другому механизму. Было сочтено целесообразным провести специальную серию экспериментов по разгарам стенки вблизи заранее организованных локальных небольших углублений различной формы. При этом заряд твердого топлива должен иметь цилиндрический канал.

**Исследование эффекта самокопания**

В процессе отработки натурного двигателя было обнаружено, что зоны максимального уноса материала стенок сопла увеличивают свои размеры не только в начальный период работы ДУ (во время существования развитого звездообразного канала в заряде), но и после выгорания перьев звездообразного канала. Причем последующее выгорание происходит весьма интенсивно. Серия экспериментов на модельном двигателе проводилась для исследования процесса развития заранее нанесённых искажений контура сверхзвуковой части сопла при работе ДУ. На сверхзвуковую часть модельного сопла наносились начальные искажения профиля, геометрически подобные искажениям на сопле натурного двигателя, а именно:  $h = 2$  мм (глубина),  $b = 2,8$  мм (ширина).

В натурном двигателе относительная глубина максимальных уносов материала стенок составляла  $h = h/\delta_{п.с} = 3$  ( $\delta_{п.с}$  - толщина пограничного слоя). Исследования проводились при значении  $h = 1...3,5$ . Искажения на модельном сопле располагались вдоль трех его образующих: одно из них было нанесено на всю длину уносимой части, второе - до ее середины, а третье - с середины до среза сопла. После испытаний было обнаружено, что начальные искажения контура увеличиваются значительно медленнее в окружном направлении. В направлении потока уносы возрастают кратно. На рис. 5 представлена картина уноса материала стенок сопла в продольном направлении.

Далее, как показали эксперименты, начало прогрессирующего уноса материала стенок сопла в местах нанесения предварительного искажения его контура зависит от начальной глубины самого искажения. Нанесение в разных местах уносимой части сопла царапин различной длины глубиной 0,5...0,7 мм не привело к местной интенсификации процесса разрушения фторопласта. Напротив, унос материала стенок сопла происходил равномерно по внутренней поверхности, а искажения малого размера сглаживались. Другими словами, при заданной геометрии сопла и местоположении начального искажения, имеется максимальная глубина искаже-

ния, связанная с толщиной пограничного слоя, при которой еще не наблюдается отрыв пограничного слоя и интенсификация процесса развития начального искажения контура сопла.

В целях изучения влияния начальной формы искажения профиля проводились испытания с П-, Л- и М-образными продольными сечениями искажений (рис. 6, 7). После проведения экспериментов было обнаружено, что задняя стенка искажения размыта, вблизи неё располагается зона максимальных уносов фторопласта, переходящая в ручьеобразные продольные вымыты по всей длине сопла. В случае расположения начального искажения контура в середине уносимой части сопла наблюдался более плавный переход от начального искажения к его следу. Как и в предыдущем случае, след имел ручьеобразный вид, обусловленный, по-видимому, сложными характером взаимодействия ударной волны с пограничным слоем и вихревой структурой течения. Начальное искажение профиля на срезе сопла в процессе сглаживалось.

Анализ результатов экспериментов позволяет зафиксировать следующие факты:

- а) максимальная величина уносов (тепловых потоков) в следе мало зависит от формы начального искажения профиля сопла;
- б) при П-образной форме начального искажения профиля сопла ширина следа по длине сопла увеличивается, в то время как для Л-образного искажения она уменьшается;
- в) при М-образном продольном сечении начального искажения профиля сопла картина уносов материала стенки более равномерна.

**Литература**

1. Л.П. Лавров, М.И. Соколовский, А.А. Болотов и др. Конструкции ракетных двигателей на твердом топливе. М. Машиностроение, 1993 г.
2. Ю.М. Милехин, М.И. Соколовский, Г.В. Бурский, М.Л. Филимонов. Внутренняя баллистика РДТТ. М. Машиностроение, 2007 г.
3. Ю.М. Кочетков. Турбулентность пространственных компонок. Инверсия Наумова // Двигатель № 3, 2009 г.
4. А.М. Губертов, В.В. Миронов, Ю.М. Кочетков и др. Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива. М. Машиностроение, 2004 г.
5. Ю.М. Кочетков. Турбулентность не хаос, а тонко организованная структура // Двигатель № 6, 2004 г.
6. Д.А. Мельников, У.Г. Пирумов, А.А. Сергиенко. Сопла ракетных двигателей // Аэродинамика и газодинамика. М. Наука, 1976 г.

Связь с автором: swgeorgy@gmail.com

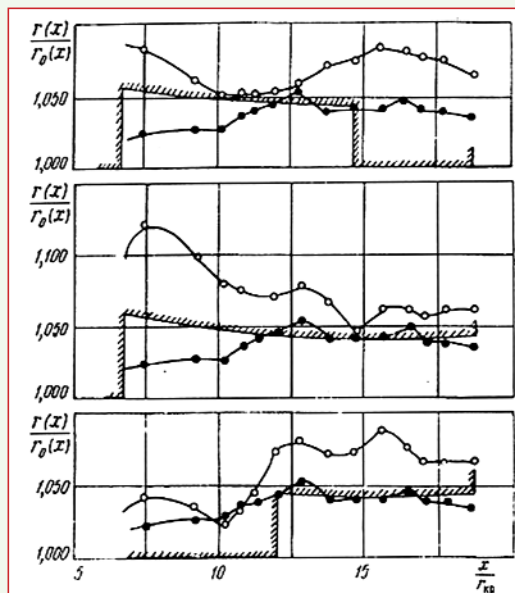


Рис. 5 Картина уносов материала стенок сопла в зависимости от геометрических размеров начального искажения профиля сверхзвуковой части

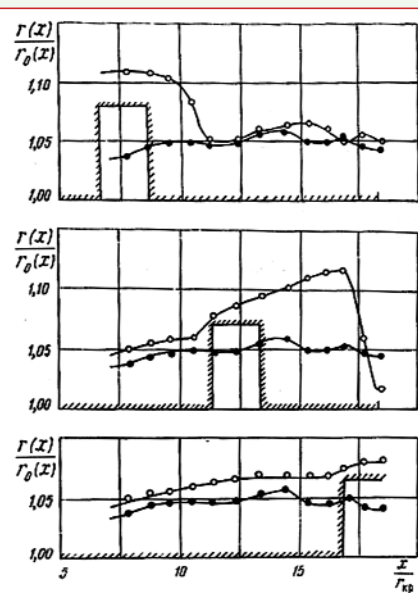


Рис. 6 Картина уносов материала стенок сопла с П-образными начальными искажениями профиля в зависимости от их расположения

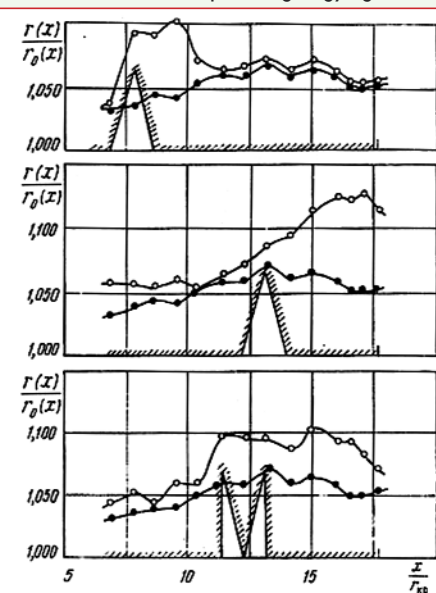


Рис. 7 Картина уносов материала стенок сопла с Л- и М-образными начальными искажениями профиля в зависимости от их расположения

● - сопло с искаженным профилем; ○ - сопло без искажения профиля