

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПЕРЕРАСШИРЕННОЙ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ

Пономарев А. А.

ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», г. Москва, Россия

Жидкостные ракетные двигатели (ЖРД) верхних ступеней ракет-носителей работают в штатном режиме в определенном диапазоне высот, при этом давление окружающего воздуха там существенно ниже атмосферного давления у поверхности Земли. Все разрабатываемые или модернизируемые ЖРД, включая ЖРД верхних ступеней, должны быть утвержденным образом испытаны. Естественно, испытания проходят в наземных условиях, т.е. с относительно высоким для высотных сопел внешним противодавлением.

В такой ситуации сопло работает в режиме сильного перерасширения, что приводит к отрыву потока продуктов сгорания от стенок сопла. В литературе выделяют два вида отрывных течений: типичный (англ. free shock separation) и нетипичный (англ. restricted shock separation) отрыв потока. Данные виды течений в сопле существенно отличаются своей структурой. При типичном отрыве поток продуктов сгорания в некотором сечении сопла отрывается от стенок сопла и далее движется вблизи оси симметрии сопла. При этом в пристеночную отрывную зону проникает воздух из окружающей атмосферы. Характерной особенностью нетипичного отрыва является то, что поток продуктов сгорания, оторвавшись от стенки сопла, затем вновь присоединяется к ней и в дальнейшем продолжает двигаться вдоль стенки сопла с небольшой сверхзвуковой скоростью. В то же время вблизи оси симметрии сопла образуется зона медленных (дозвуковых) обратных токов.

Нетипичный отрыв потока является малоизученным. Выводы о структуре отрывного течения делаются, в основном, по распределениям давлений вдоль стенок сопел. В связи с этим в настоящей работе основные усилия были направлены на то, чтобы визуализировать течение и непосредственно запечатлеть его ударно-волновую структуру.

Теневые картины структуры струи, истекающей из сопла, были получены с помощью прибора Теплера. Для определения направления вектора скорости в струе использовалось устройство визуализации, которое представляет из себя натянутую перпендикулярно оси симметрии проволоку с размещенными на ней металлическими «флажками». «Флажки» могут вращаться вокруг проволоки почти без трения и указывают направление вектора скорости в потоке. В экспериментах исследовалось течение воздуха в двух соплах при различных значениях степени нерасчетности.

В результате получено, что в сопле № 1 при любых значениях степени нерасчетности образуется типичный отрыв потока с хорошо известной картиной течения. Для сопла № 2 существует диапазон величин степени нерасчетности, в котором реализуется нетипичный отрыв. В экспериментах непосредственно показано, что в таком режиме существует область возвратных дозвуковых токов вблизи оси симметрии сопла. При этом основной расход воздуха движется вдоль границы струи с небольшой сверхзвуковой скоростью. При уменьшении степени нерасчетности в течение короткого времени (почти мгновенно) осуществляется переход от нетипичного отрыва к типичному.

Реализация нетипичного отрыва потока при наземных испытаниях ЖРД с соплом большой степени расширения приводит к резкому повышению теплового потока в стенку сопла и амплитуды боковой силы, действующей на сопло, что может негативно

сказаться на его работоспособности. В связи с этим, изучение свойств и условий возникновения нетипичного отрыва потока с целью его предотвращения в наземных испытаниях ЖРД является крайне важной задачей.