

## Процессы образования циркуляционных зон при нестационарном взаимодействии вязкого сверхзвукового потока со струйной преградой

Бондарев А.Е.

Институт прикладной математики им.М.В.Келдыша РАН, Россия, Москва

e-mail: [bond@keldysh.ru](mailto:bond@keldysh.ru)

Рассматриваются нестационарные процессы образования циркуляционных зон в вязком сверхзвуковом потоке перед струйной преградой. Изучение подобных существенно нестационарных процессов предполагает тщательное прослеживание возникновения нестационарной структуры (нескольких нестационарных взаимодействующих отрывных зон) в поле газодинамического течения, ее развития, взаимодействия с другими структурами, и возможного распада. Необходима тщательная оценка характерного времени существования нестационарной структуры, изучение зависимостей характерного времени от основных параметров задачи.

Проводится численное исследование течения на внешней боковой поверхности обтекаемого сверхзвуковым вязким потоком сопла, из которого истекает спутная сверхзвуковая вязкая недорасширенная струя большой степени нерасчетности. При расширении данная струя затекает на внешнюю боковую поверхность сопла, образуя для внешнего потока струйную преграду. Наличие струйной преграды вносит возмущение во внешний поток, что приводит к отрыву пограничного слоя на внешней поверхности сопла и возникновению во внешнем потоке перед преградой области циркуляционного течения. Рассматривается задача с нестационарным граничным условием на срезе сопла, где степень нерасчетности недорасширенной струи изменяется со временем по заданной линейной зависимости. В качестве математической модели используется полная система нестационарных двумерных уравнений Навье-Стокса для вязкого сжимаемого теплопроводного газа. Проведены исследования для различных темпов изменения степени нерасчетности. Исследованы качественные и количественные характеристики течения, реализующиеся в нестационарном процессе.

В результате расчетов получено, что при увеличении скорости возрастания степени нерасчетности струи, возникает вторичная циркуляционная зона. Для контроля процессов зарождения и развития циркуляционных зон в расчетной области применяется модифицированный подход [1], предполагающий трассировку центров циркуляционных зон. С целью определения скорости изменения степени нерасчетности, при которой возникает вторичная циркуляционная зона, проводится решение обратной задачи. Определяется характерное время образования новой нестационарной структуры с вторичной циркуляционной зоной.

Данная задача рассматривается в некотором диапазоне изменения характерных чисел Маха и Рейнольдса. Для каждого набора диапазона ( $M$ ,  $Re$ ) проводится решение обратной задачи, определяется скорость изменения степени нерасчетности, необходимая для возникновения вторичной циркуляционной зоны. Также для каждого набора ( $M$ ,  $Re$ ) характерных чисел Маха и Рейнольдса задачи определяется характерное время возникновения вторичной циркуляционной зоны. В процессе расчетов по полученным данным в режиме online строится визуальная поверхность, представляющая зависимость характерного времени образования вторичной циркуляционной зоны от определяющих параметров задачи.

1. D.Kenwright, R. Haimes « Automatic Vortex Core Detection», IEEE Computer Graphics and Applications, v.18, N 4, 1997, p.70 - 74.