

03;07

Результаты интерферометрии модели удлиненного элемента при осесимметричном обтекании и двух значениях числа Маха $M = 3$ и $M = 4$

© А.Н. Михалев, А.Б. Подласкин, В.А. Ширяев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 26 сентября 2000 г.

Кратко описаны результаты изучения полей плотности обтекания удлиненных моделей формируемых взрывом снарядов (ФВС) интерференционным методом. Обсуждены характер полученных профилей плотности и влияние на них увеличения числа Маха от $M = 3$ до $M = 4$. Выявлены особенности формирования стабилизирующего скачка уплотнения. Подтверждена допустимость предложенной формы модели с точки зрения умеренного аэродинамического сопротивления и хорошей устойчивости.

На баллистической трассе ФТИ были проведены интерферометрические исследования сверхзвукового обтекания модели ФВС среднего удлинения (при $M = 4$). Исследовались профили плотности в сечениях над боковой образующей, над юбкой-стабилизатором и за донным срезом моделей. Рассмотрение около 7 сечений моделей в указанных зонах обтекания давало ясную картину изменения плотности как по радиусу, так и по оси. Отмечен значительный скачок плотности (давления) в стабилизирующей ударной волне. Прослежено резкое падение плотности (давления) в веере разрежения за срезом юбки в донной области. Отмечено низкое значение донной плотности (постоянной по радиусу и по оси на некотором протяжении) при исследованном числе Маха. Незначительные углы атаки не препятствовали применению расшифровки по осесимметричной методике, так как отклонения были на уровне погрешностей изменений [1].

В настоящей статье рассмотрена модель ФВС удлинения $L/d = 4.4$, где d — диаметр головной части. Получены снимки приемлемой осесимметричности при $M = 3$ и $M = 4$. Для обмера и обработки выбраны сечения, расположенные с шагом в $0.2D$ диаметра юбки как

в сторону головной части ($0.2D$, $0.4D$, $0.6D$, $0.8D$, $1.D$), так и вниз по потоку в донную область $-0.2D$, $-0.4D$, $-0.6D$. При настройке интерферометра (полосы перпендикулярны оси потока) на ~ 70 полос сечение разбивалось на 30–40 зон. Гипотетическая дисперсия разности хода принималась 0.07 ширины полосы.

Рассмотрим поведение плотности в поперечных сечениях (радиальные профили) удлиненной модели ФВС вначале при числах Маха $M = 3$. Донная область у наших моделей за юбкой с большим углом полураствора $\sim 34^\circ$ короткая, и об этом свидетельствует рост приосевых значений донной плотности уже в сечении $-0.6D$ за дном, что говорит о близком расположении горла следа. Другая особенность обнаруживается как более раннее в осевом направлении возникновение скачка стабилизации, также обусловленного большим углом раствора юбки (рис. 1).

Количественное рассмотрение сетки радиальных профилей (а также изолиний) плотности показывало сложную структуру потока. Радиальные профили плотности в сечениях модели ФВС отражали поведение плотности, соответствующее ударно-волновой структуре обтекания. В сечениях на расстоянии $1.D$ и $0.8D$ от донного среза к головной части мы наблюдали плавное падение плотности по радиусу после скачка (достигавшего $\sim 1.45\rho_\infty$) в головной волне. Это падение прерывалось достаточно резким подъемом в зоне за умеренной силы скачком отрыва (по сути слабым возмущением), распространяющимся от излома сразу за головным утолщением. Это умеренное увеличение плотности (~ 0.3) сменялось настоящим скачковым возрастанием плотности в сечениях $0.4D$, $0.2D$ и $0.D$, пересекающих формирование скачка стабилизации. Это неудивительно, так как расчетные сечения проходят через формирующийся ($0.4D$) и сформированный ($0.2D$, $0.D$) скачок стабилизации. Величина этого скачка от $\rho/\rho_\infty = 0.8$ до $\rho/\rho_\infty = 1.70$ показывает, что его интенсивность выше, чем у головной волны в этом сечении. Координаты расположения у модели и интенсивность стабилизирующего скачка определяли аэродинамическое поведение рассматриваемых моделей удлиненных ФВС (рис. 1).

Сечения за донным срезом удлиненных ФВС не обнаруживали принципиальных отличий от ранее исследованных на моделях среднего удлинения ($L/d = 3$). Однако на одну особенность обратим внимание. Вслед за падением плотности в протяженной зоне между головным скачком и скачком стабилизации (от юбки) плотность скачком возрастала в этом скачке. Затем происходило резкое падение плотности

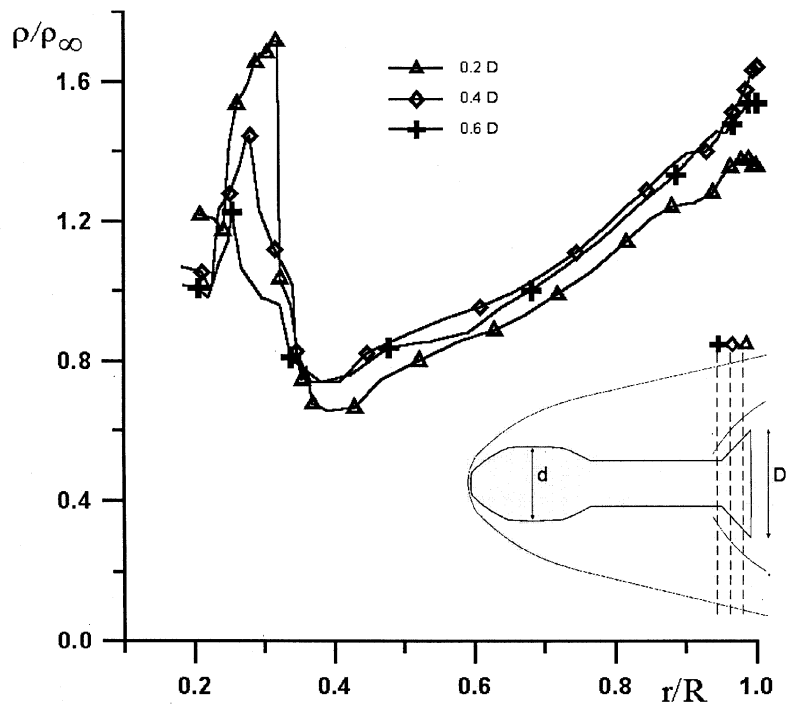


Рис. 1. Радиальные профили плотности ρ/ρ_∞ в поперечных сечениях поля обтекания модели вблизи юбки-стабилизатора при $M=3$.

в веере разрежения до достижения донной плотности — практически постоянной до оси. Однако, как отмечалось в предварительном анализе, эта величина донной плотности ρ/ρ_∞ заметно росла вниз по потоку: от $\rho/\rho_\infty = 0.1$ в сечении $-0.2D$ до $\rho/\rho_\infty = 0.3$ в сечении $-0.6D$. Достаточно ясным объяснением служит образование короткой по протяженности застойной зоны за юбкой с полууглом 34° . Вслед за застойной зоной идет область формирования хвостового скачка, сопровождаемая поджатием потока в горле следа: это начало горлового поджатия мы и наблюдали в поведении донной плотности уже в сечении $-0.6D$.

Интерференционные измерения на моделях удлиненного ФВС были проведены при двух числах Маха. Обработка интерферограммы при

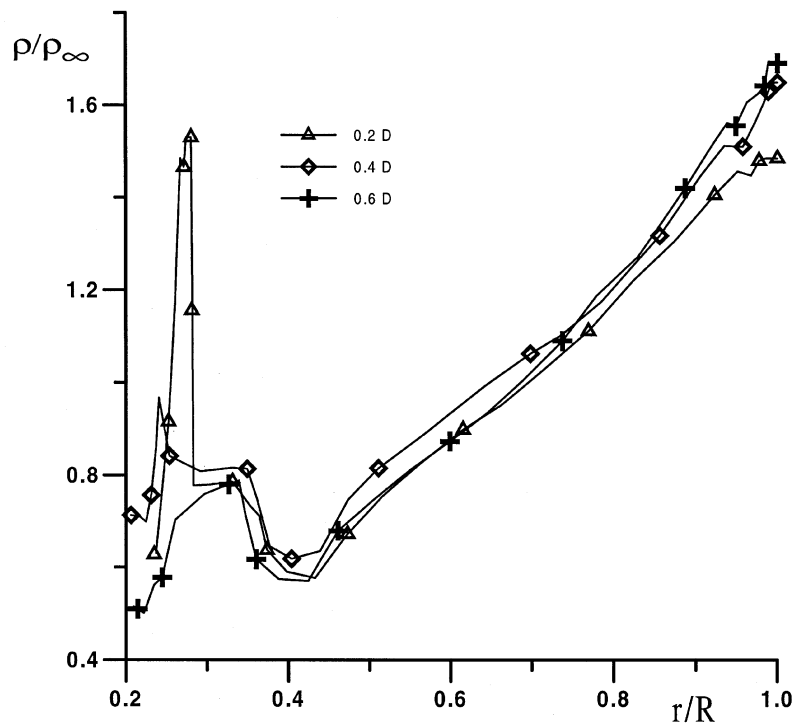


Рис. 2. Радиальные профили плотности ρ/ρ_∞ в поперечных сечениях поля обтекания модели вблизи юбки-стабилизатора при $M=4$.

$M=4$ не выявила принципиальных качественных различий в рассматривавшихся профилях. Скачок стабилизации от юбки более сильный; вблизи донного среза он располагался на относительном радиусе $r/R = 0.35$. В тех же сечениях ($0.4D$, $0.2D$ к головной части) при $M=3$ скачок располагался на $r/R = 0.25-0.30$. Учитывая выпуклую форму этого скачка, надо отметить, что при $M=4$ он отнесен юбкой-стабилизатором на несколько больший относительный радиус r/R . Его интенсивность не увеличилась с ростом числа Маха, в то время как головная волна при $M=3$ существенно слабее. В сечениях вблизи донного среза при $M=3$ $\rho/\rho_\infty = 1.30$ и при $M=4$ $\rho/\rho_\infty = 1.55$ на головном скачке (рис. 2).

При числе Маха $M=4$ поджатый перед юбкой-стабилизатором газ отодвигал начало стабилизирующего скачка по оси к середине модели. Тем самым стабилизирующее действие юбки ослабевало вследствие уменьшения плеча возвращающей силы. Для стабилизации было бы выгоднее расположение скачка непосредственно на юбке.

Донные параметры при числе $M=4$ незначительно разнятся от полученных на модели ФВС при $M=3$. Вдоль по оси при $M=3$ плотность возрастала от 0.15 до $0.23\rho_\infty$ при $-0.6D$. Это по характеру соответствовало данным при $M=3$; относительно меньший осевой рост говорил о больших размерах донной области.

С целью сравнения и исключения случайных ошибок была выполнена обработка интерферограмм обтекания модели под небольшим углом атаки. При максимальном имевшемся в опытах угле атаки $\sim 5^\circ$ с наветренной и подветренной стороны наблюдались небольшие отличия в геометрическом положении скачка стабилизации и весьма малые отличия в его интенсивности. Вблизи донного среза эти различия сглаживались. В данной работе при осреднении профилей, полученных расчетом с наветренной и подветренной сторон модели, значения плотности совпадали со значениями параметра, рассчитанного по осесимметричной картине.

Рассмотренные профили плотности над боковой поверхностью и за донным срезом удлиненных моделей формируемых взрывом снарядов количественно объясняют особенности аэродинамики этих форм [2]. Распределение величин плотности при формировании, достижении максимальной интенсивности скачка, а также геометрическое расположение скачка стабилизации подтверждают обоснованность выбранной аэродинамической формы элемента.

Наличие короткой застойной зоны с очень низким уровнем плотности (давления) заставляет задуматься о повышении донного давления. Это позволит снизить полное сопротивление и может быть достигнуто созданием прорезей в юбке-стабилизаторе.

Оцененное путем сравнения наборов радиальных профилей влияние повышения числа Маха до $M=4$ принципиально не изменило структуру потока. Однако оттеснение скачка стабилизации и начало его формирования вблизи центра масс модели не способствовало повышению стабилизации. Тем не менее при рассмотренных числах Маха модель сохраняла свойства по стабилизации и сопротивлению. Благодаря малой по диаметру слабо притупленной головной части сопротивление

этой модели умеренное. Это подтверждает и относительно невысокая интенсивность головной ударной волны ($\rho/\rho_\infty = 1.60$).

Полученные данные по плотности базовой формы ФВС могут служить для сравнения с результатами численных расчетов обтекания тел рассмотренного класса, в первую очередь на основе системы невязких уравнений Эйлера. Подобное относится и к упрощенным методикам расчета типа подхода Ньютона и метода потенциального потока.

Список литературы

- [1] Ковалев П.И., Михалев А.Н., Подласкин А.Б. и др. // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 12. С. 6–11.
- [2] Петров К.П. Аэродинамика ракет. М.: Машиностроение, 1977.