

ВЛИЯНИЕ ПОДВОДА ИНЕРТНОГО И РЕАГИРУЮЩЕГО ГАЗА НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРЕНИЯ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ

УДК 533.601.15:536.46

А. Ф. Гаранин, П. К. Третьяков

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,
630090 Новосибирск

В данной работе представлены результаты прямого измерения сил трения в сверхзвуковом потоке при числе Маха $M = 2,0$ на элементах тела вращения с местной шероховатостью в виде поясков и выемки. Показано, что подвод инертного газа (воздуха и водорода) и реагирующего газа вдоль поверхности значительно снижает сопротивление трения. При подводе газа с меньшей плотностью происходит большее снижение сопротивления. Подвод водорода в количестве $G = 0,4 \div 0,6 \%$ снижает сопротивление трения на $12 \div 18 \%$, а воздуха в количестве $G = 1,4 \div 2,4 \%$ — на $6 \div 10 \%$. При обтекании элементов вращения продуктами неполного сгорания твердого топлива в количестве $\tilde{G} = 1,7 \%$ сопротивление трения снижается на 38% .

Для измерения сил трения на элементах тела вращения разработана конструкция аэродинамических встроенных весов с полупроводниковыми чувствительными элементами.

Подвод газа или жидкости в пограничный слой различных летательных аппаратов представляет интерес в целях тепловой защиты и снижения аэродинамического сопротивления трения [1–4]. При обтекании тел вращения (типа снарядов) сверхзвуковым потоком сопротивление трения составляет примерно 20% от головного аэродинамического сопротивления [3]. Для успешного создания различных летательных аппаратов необходимо предсказание их аэродинамического сопротивления. Расчетное определение трения значительно усложняется при обтекании тел многокомпонентной или химически неравновесной средой.

В проведенном исследовании ставилась задача — определить, как изменяется сопротивление трения при подводе инертных и реагирующих газов вдоль боковой поверхности тела вращения. При обтекании тел потоком с химически реагирующей средой прямые измерения сопротивления предпочтительнее по сравнению с косвенными методами [2].

В данной работе представлены некоторые результаты прямого измерения сопротивления трения элемента тела вращения, обтекаемого сверхзвуковым потоком, при подводе вдоль боковой поверхности тела вращения инертного газа (воздуха и водорода), а также продуктов неполного сгорания твердого топлива в количестве $G = G \cdot 100 / (\rho_\infty U_\infty F_m) \leq 2,6 \%$ (ρ_∞ , U_∞ — плотность и скорость набегающего потока воздуха, F_m — площадь поперечного сечения модели, G — расход подводимого газа).

Схема проведения эксперимента приведена на рис. 1. Модель представляла собой тело вращения диаметром 40 мм с конической носовой частью, имеющей полуугол при вершине $\beta = 15^\circ$. Измерение сопротивления трения производилось на элементах вращения l длиной $L = D$ (D — диаметр модели), закрепляемых на встроенных однокомпонентных весах 2 с полупроводниковыми чувствительными элементами, рассчитанными на нагрузку $X = 4$ кН. Показания весов регистрировались автоматическим потенциометром типа КСП-4 и непрерывной записью показаний до и в процессе проведения эксперимента. Отсчет нулевых показаний весов фиксировался до и после эксперимента, причем отсчет нулевых показаний перед экспериментом производился на модели предварительным пуском трубы.

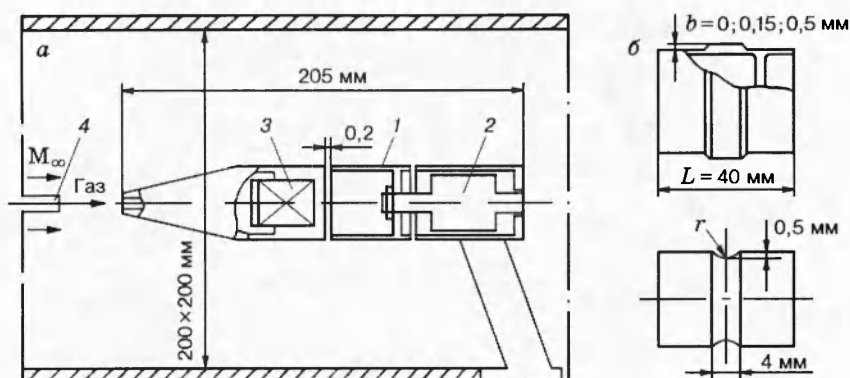


Рис. 1

Между головной частью и взвешиваемым элементом был зазор $a = 0,2 \div 0,3$ мм. Головная часть с весами соединения не имела и устанавливалась соосно с измерительным элементом.

Элемент вращения сменный и имел местную шероховатость в виде кольцевого уступа высотой $b = 0; 0,15; 0,5$ мм или кольцевой впадины (рис. 1, б). Подвод инертного газа производился из трубки 4 диаметром 4 мм, расположенной соосно перед носком модели. При обтекании боковой поверхности элемента вращения продуктами сгорания применялся внутримодельный газогенератор 3. В качестве топлива при этом использовался пиротехнический состав с теплотворной способностью $H_u = 15,8$ МДж/кг. Исследование проводилось в аэродинамической трубе (размер рабочей части 200×200 мм) при скорости потока, соответствующей $M = 2,0$, статическом давлении $P_\infty = 24 \div 36$ кПа, температуре торможения $T = 280 \div 290$ К, числе Рейнольдса $Re_L = (2,6 \div 4,7) \cdot 10^6$, где $L = 0,12$ м — расстояние от носка модели до оси элемента вращения. Продукты неполного сгорания выдувались из головной части модели навстречу набегающему потоку воздуха и догорали во внешнем потоке вокруг модели.

Теплеровские фотографии, иллюстрирующие изменение структуры обтекания модели за счет подвода инертных газов и продуктов неполного сгорания, приведены на рис. 2. Анализ фотографий показал, что при подводе инертного (рис. 2, б, $\bar{G} = 1\%$) или реагирующего газа (рис. 2, в, $\bar{G} = 0,6\%$) вокруг модели происходит образование пограничного слоя значительно большей толщины по сравнению с обтеканием без подвода газа (рис. 2, а). При выдуве продуктов неполного сгорания топлива из носка модели навстречу набегающему потоку воздуха головной скачок, возникающий перед телом, отодвигается от носка модели навстречу набегающему потоку воздуха.

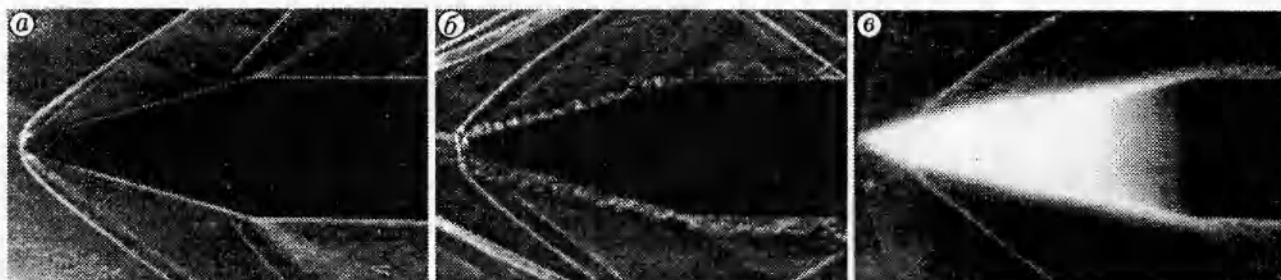


Рис. 2

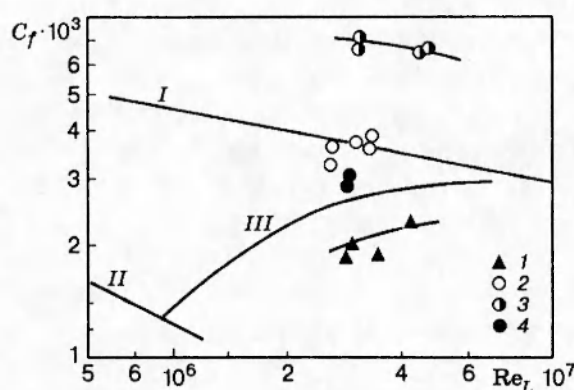


Рис. 3

Теплеровские фотографии, иллюстрирующие обтекание модели продуктами неполного сгорания, получены при одновременном использовании искрового источника длительностью светового импульса $t = 0,5 \cdot 10^{-6}$ с и прямого фотографирования пламени длительностью $t = 5 \cdot 10^{-3}$ с. Несовпадение положения головного скачка с передним фронтом пламени свидетельствует о некотором непостоянстве расхода топлива в процессе горения.

Тарировка весов показала линейную зависимость выходного сигнала от продольного усилия. Значение осредненного коэффициента трения рассчитывалось по соотношению $C_f = X/qF_6$ (F_6 — площадь боковой поверхности элемента вращения, q — скоростной напор набегающего потока воздуха).

Полученные значения коэффициента трения для исследованных элементов вращения приведены на рис. 3. Для элемента вращения с гладкой поверхностью $C_f = 0,0020 \div 0,0025$ в зависимости от числа Рейнольдса. При увеличении высоты уступа от 0,15 до 0,5 мм значение C_f возрастало соответственно от $0,0035 \div 0,0037$ до $0,0063 \div 0,0065$.

Оценка толщины пограничного слоя в выходном сечении элемента вращения из соотношения $\delta = (0,37L/D)Re^{-0,2}$ [5] (L — расстояние от носка модели до конца элемента вращения) показала, что без подвода инертного газа толщина пограничного слоя $\delta = 1,2$ мм. При подводе водорода в количестве $\bar{G} = 0,6$ % толщина пограничного слоя, определенная по теплеровским фотографиям, увеличивалась до 4,2 мм.

Для сравнения полученных значений C_f на рис. 3 приведены значения C_f для плоской поверхности в зависимости от числа Рейнольдса и состояния пограничного слоя [6] (I — кривая для турбулентного пограничного слоя, определяемая из формулы $C_f = 0,074/Re^{0,2}$ [6], II — для ламинарного пограничного слоя, III — область смешанного пограничного

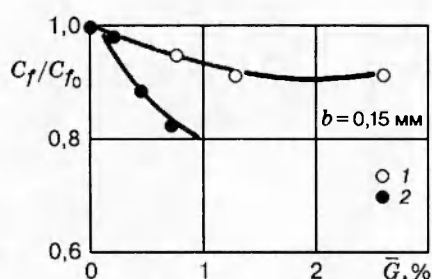


Рис. 4

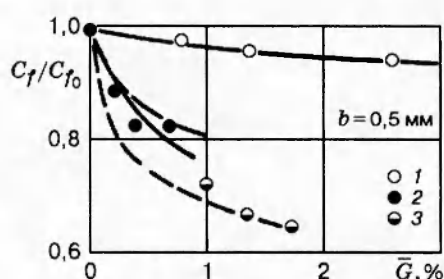


Рис. 5

слоя, точки 1–3 отвечают $b = 0; 0,15; 0,5$ мм, 4 — элемент с выемкой). Найденные значения C_f для гладкой поверхности тела располагаются в области смешанного пограничного слоя. Подвод инертного газа вдоль гладкой поверхности в количестве $\bar{G} = 2,6$ % практически не изменял значения C_f . При подводе инертного газа вдоль поверхности, имеющей выступы, происходило устойчивое снижение сопротивления трения. Подвод водорода в количестве $\bar{G} = 0,4 \div 0,6$ % вдоль поверхности с выступом $b = 0,15$ и $0,5$ мм приводил к снижению C_f на $12 \div 18$ %, а подвод воздуха в количестве $\bar{G} = 1,4 \div 2,4$ % — на $6 \div 10$ % (рис. 4 и 5). Обтекание элемента вращения, имеющего выступ $b = 0,5$ мм, продуктами сгорания твердого топлива приводит к большему снижению сопротивления трения по сравнению с обтеканием водородом, причем с ростом расхода топлива происходит большее снижение сопротивления трения. На рис. 4 точки 1 — подвод воздуха, 2 — водорода.

Обтекание элементов вращения продуктами сгорания в количестве $\bar{G} = 1,7$ % снижает сопротивление трения на 38 % (рис. 5, где точки 1 — подвод воздуха, 2 — водорода, 3 — продуктов неполного сгорания твердого топлива).

Измерение полного давления в пограничном слое за измерительным элементом показало, что подвод инертного газа и продуктов неполного сгорания уменьшает скоростной напор и увеличивает толщину дозвукового пограничного слоя. Это вызывает уменьшение силы, действующей на выступающие элементы шероховатости.

Таким образом, из проведенного исследования видно, что при подводе инертного или реагирующего газа вдоль шероховатой поверхности в сверхзвуковом потоке происходит снижение сопротивления трения. Подвод газа с более низкой плотностью (меньшим молекулярным весом) приводит к большему снижению трения. Снижение трения происходит вследствие уменьшения скоростного напора, действующего на элементы шероховатости.

Разработанная конструкция весов позволяет проводить измерение сопротивления трения на элементах вращения в сверхзвуковом потоке при различных воздействиях на состояние пограничного слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колесников О. М. Влияние горения водорода в сверхзвуковом пограничном слое на коэффициент трения // Уч. зап. ЦАГИ. 1988. Т. 19, № 3. С. 104–109.
2. De Turris D. J., Schetz I. A. Direct Measurements of Skin Friction in a Scramjet Combustor. N. Y., 1990 (Paper / AIAA; N 90-2342).
3. Краснов Н. Ф. Аэродинамика тел вращения. М.: Оборонгиз, 1958.
4. Doss E. D., Srinivasan M. G. Modeling of wall friction for multispecies solid-gas flows // J. Fluids Engineering. 1986. N 4. P. 486–491.
5. Швец А. И. Течение в донной области при вдуве // Изв. АН СССР. МЖГ. 1974. № 5. С. 34–42.
6. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1970.

Поступила в редакцию 3/І 1996 г.,
в окончательном варианте — 18/І 1996 г.