

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛО- И МАССОПОДВОДА НА ДОННОЕ ДАВЛЕНИЕ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ ПРИ СВЕРХЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ

УДК 536.46:533.6

А. И. Глаголев, А. И. Зубков,
А. Ф. Гаранин*, П. К. Третьяков*

Институт механики МГУ, 117234 Москва;

* Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,
630090 Новосибирск

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния подвода массы и догорания продуктов сгорания пиротехнических составов в донной области осесимметричных тел, обтекаемых сверхзвуковым потоком воздуха при числах Маха 1,2–3,0. Показано, что величина прироста донного давления возрастает монотонно до своего максимального значения при оптимальном значении расхода выдуваемой массы. Величина этого прироста падает с уменьшением числа Маха. Приведена зависимость, обобщающая экспериментальные данные.

Проблема снижения донного сопротивления тел, движущихся со сверхзвуковой скоростью, до настоящего времени остается в значительной степени актуальной. В случае осесимметричных тел достаточно большого удлинения с плоским кормовым срезом донное сопротивление при сверхзвуковых скоростях полета составляет 25–40 % полного сопротивления. Поэтому исследование способов уменьшения донного сопротивления представляет важную научную задачу.

Исследования газодинамики ближнего следа за последние десятилетия показали, что наиболее приемлемым способом уменьшения донного сопротивления является подвод тепла или массы либо того и другого одновременно в донную область летящего тела. Последний метод, как показывают имеющиеся данные, наиболее эффективен. Многие аспекты этой проблемы отражены в известных работах обзорного характера [1, 2], а некоторые конкретные результаты исследований представлены в [3]. В данной работе рассматривается влияние вдува в донную область тел вращения продуктов неполного сгорания пиротехнических составов [4] на донное давление.

Экспериментальные исследования выполнены на аэродинамических трубах Т-313 и ТС ИТПМ СО РАН и установках А-3 и А-11 Института механики МГУ [5] в диапазоне чисел Маха потока $M = 1,2-3$ и чисел Рейнольдса $Re = 2 \cdot 10^7 - 10^8$ 1/м. В качестве моделей использовались тела вращения (рис. 1), представляющие комбинацию носового конуса 1, цилиндрической части 2 и кормовой конической или цилиндрической частей 3. Со стороны торца кормовой части имеется цилиндрическая полость 4 для размещения гильзы 5 с образцами пиротехнических составов и системой воспламенения 6. Гильза крепилась шайбой 7 с внутренним отверстием диаметром d , через которое выдувались продукты сгорания ПС. У всех моделей на торце хвостовой части имелись отверстия 11 для монтажа пневматических трасс 8 приема донного давления и отверстия для размещения токопроводов 12 системы воспламенения. Модель закреплялась на пилоне 10 с тензовесами 9. Все пневма-

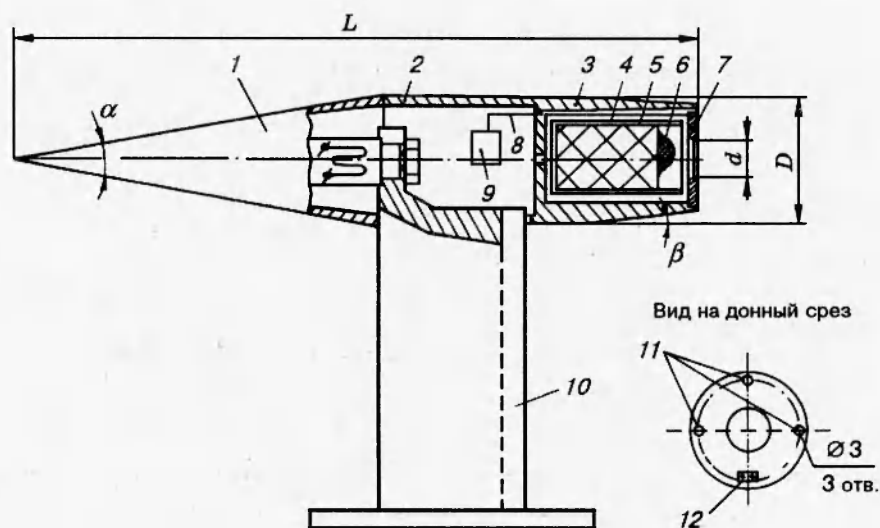


Рис. 1. Схема модели:

1 — носовой конус, 2 — цилиндрическая часть, 3 — кормовая часть, 4 — полость, 5 — гильза с образцами пиротехнических составов, 6 — воспламенитель, 7 — шайба, 8 — пневматические трассы, 9 — тензосенсоры, 10 — пилон, 11 — отверстие, 12 — токопроводы системы воспламенения

тические и электрические коммуникации с различных точек модели проходили через пилон к соответствующим первичным преобразователям информации (датчикам), сигналы с которых поступали на систему регистрации и обработки данных. Конкретные размеры моделей, как правило, определялись типом используемой аэродинамической установки, а также некоторыми специфическими требованиями, связанными с размерами, конструктивным оформлением и характеристиками образца пиротехнического состава. Отметим, что диаметр мишени модели D в различных сериях экспериментов менялся от 30 до 60 мм, угол носового конуса $\alpha = 15-25^\circ$, а угол скоса кормовой части $\beta = 0-10^\circ$.

В экспериментах измерялись аэродинамические силы, действующие на модель, статическое давление (p_1) и давление торможения потока (p_0), донное давление p_d на торце модели и средний расход вдуваемого газа. При оптической визуализации волновой структуры течения наряду с традиционной теневой фотографией использовалась кино- и видеосъемка процесса.

В качестве генератора тепла и массы (тепломассоподвода) использовались пиротехнические составы с недостатком окислителя, основным горючим которых являлся магний. Выбор указанного типа пиротехнического состава обусловлен следующими основными причинами:

- магниевые составы достаточно устойчиво горят при низких давлениях окружающей среды, что важно при исследованиях в аэродинамических трубах;
- в продуктах горения образуются легко воспламеняющиеся пары магния, что создает благоприятные условия для увеличения тепловыделения за счет дожигания паров в слоях смешения.

Для экспериментов были изготовлены специальные модельные пиротехнические составы с различным содержанием магния. Их рецептура и энергетические характеристики позволили выяснить в процессе исследований влияние на донное давление следующих

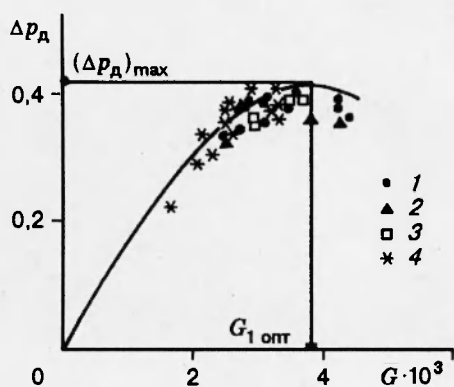


Рис. 2

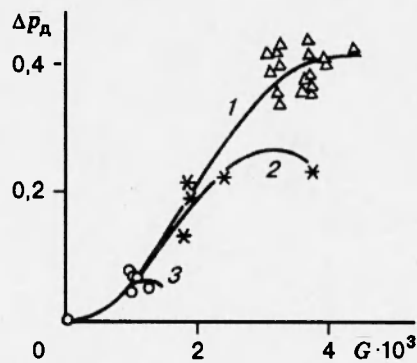


Рис. 3

Рис. 2. Зависимость донного давления от расхода (нумерация точек соответствует номеру состава)

Рис. 3. Влияние калорийности состава и расхода на увеличение донного давления:
 1 — состав 5 ($Q_T = 22,5$ МДж/кг); 2 — состав 6 ($Q_T = 18,0$ МДж/кг); 3 — состав 7 ($Q_T = 10,8$ МДж/кг)

факторов: относительный расход продуктов сгорания $G = G_1/G_B$ (G_1 — расход продуктов сгорания через отверстие вдува, G_B — расход воздуха через сечение миделя модели); относительная теплота сгорания (калорийности) $Q_T = Q_T/c_p T_0$ (Q_T — количество тепла, выделяемого пиротехническим составом за счет собственного окисления, $c_p T_0$ — энтальпия торможения основного потока); относительное содержание конденсированной фазы z ; процентное содержание и дисперсность частиц магния.

Для характеристики эффективности вдува продуктов сгорания пиротехнических составов выбрана наиболее естественная и удобная для анализа зависимость относительного донного давления \bar{p}_d (либо его увеличение $\Delta \bar{p}_d$) от относительного расхода вдуваемого газа:

$$p_d = f(\bar{G}), \quad \Delta p_d = f(\bar{G}),$$

где $\Delta \bar{p}_d = (p_d^F - p_d)/p_1$ (p_d^F, p_d — донное давление при вдуве и без него соответственно). Типичные закономерности изменения донного давления от относительного расхода продуктов сгорания отражены на рис. 2. Опытные данные получены на модели с диаметром миделя $D = 30$ мм при $M = 3$. Отношение площадей отверстия вдува и миделя модели $S = S_d/S = 0,42$. Пиротехнические составы 1 (Г-15-66), 2 (Г-15-69), 3 (Г-15-72) и 4 (Г-15-75), использованные в данных экспериментах, отличались дисперсностью частиц магния (300, 180, 189 и 75 мкм соответственно). Относительная теплота сгорания для всех составов была приблизительно одинакова ($Q_T \approx 25$). Для всех серий экспериментов уровень повышения относительного давления $\Delta \bar{p}_d$ не зависел от дисперсности частиц магния.

Прирост донного давления монотонно увеличивается до некоторого значения $(\Delta \bar{p}_d)_{\max}$, достигаемого при $\bar{G} = \bar{G}_{\text{опт}}$; затем следует незначительное снижение (см. рис. 2). Этот результат качественно согласуется с аналогичными данными, полученными при вдуве инертных газов в донную область [2, 6]. Сложный характер кривой $\Delta p_d(\bar{G})$ объясняется существенной перестройкой течения при увеличении количества газа, подводимого с торца в рециркуляционную область, а качественные изменения в уровнях $\Delta \bar{p}_d$ (по сравне-

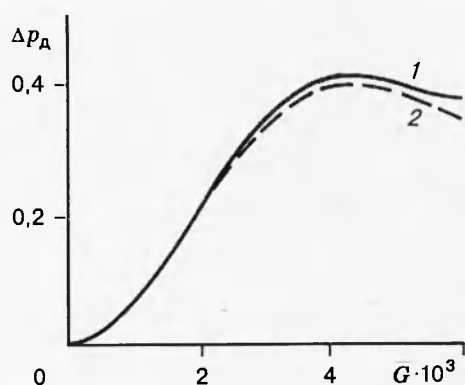


Рис. 4

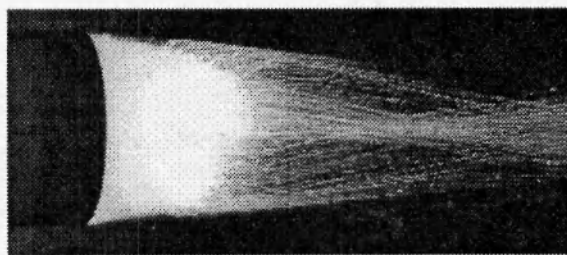


Рис. 5

Рис. 4. Зависимость донного давления от калорийности и теплотворной способности составов:

1 — состав 5 ($\bar{Q}_T \ll H_u$; $\bar{Q}_T = 22,5$ МДж/кг); 2 — составы 1-4 ($\bar{Q}_T \approx H_u$; $\bar{Q}_T = 25$ МДж/кг)

Рис. 5. Прямая фотография догорания продуктов сгорания в донном следе

нию с вдувом инертных газов) в данном случае объясняются интенсивным теплоподводом, наличием конденсированной фазы и других факторов.

В дальнейшем ограничимся анализом результатов, соответствующих изменению относительного расхода от нуля до $G_{\text{опт}}$, т. е. режиму течения с замкнутой рециркуляционной областью, когда газ вдувается с небольшой скоростью и не происходит изменения формы зоны рециркуляции. Рис. 3 иллюстрирует эффективность донного вдува составов 5 (Г-15-76), 6 (Г-15-83) и 7 (Г-15-85) с различной калорийностью. Изменение \bar{Q}_T с 22,5 до 18,0 приводит к уменьшению $(\Delta \bar{p}_d)_{\text{max}}$ приблизительно в два раза, а использование состава 7 ($\bar{Q}_T = 10,8$) дает совсем незначительный прирост p_d .

Анализ опытных данных, проведенный с применением вероятностно-статистических методов обработки и учетом физических представлений о характере течения в ближнем следе, показал, что параметром, обобщающим результаты по увеличению донного давления Δp_d , является комплекс $G\bar{Q}_T(1-z)$ [3], представляющий отношение полных энтальпий газовой фазы продуктов сгорания пиротехнических составов $G_1\bar{Q}_T(1-z)$ и набегающего потока ($G_{вср}T_0$). Заметим, что предложенный комплекс совпадает с коррелирующим параметром (0-1), полученным в работе [7], при отсутствии догорания продуктов сгорания пиротехнических составов в ближнем следе.

Факт отсутствия активного догорания продемонстрирован на рис. 4. Кривая 2 является осредненной по совокупности экспериментов с составами 1-4, имеющими приблизительно одинаковую калорийность \bar{Q}_T и достаточно высокую теплотворную способность H_u (количество тепла, которое может быть выделено при полном сгорании с использованием кислорода внешнего потока). Линия 1 соответствует опытным данным с составом 5, для которого значения \bar{Q}_T и H_u приблизительно одинаковы. Видно, что уровень повышения давления в обоих случаях практически одинаков, несмотря на то, что величина H_u для составов 1-4 значительно выше, чем для состава 5. На фотографиях структуры течения, полученных при проведении экспериментов (одна из них приведена на рис. 5), отчетливо прослеживается выброс диспергированной фазы за границы ближнего следа, что также

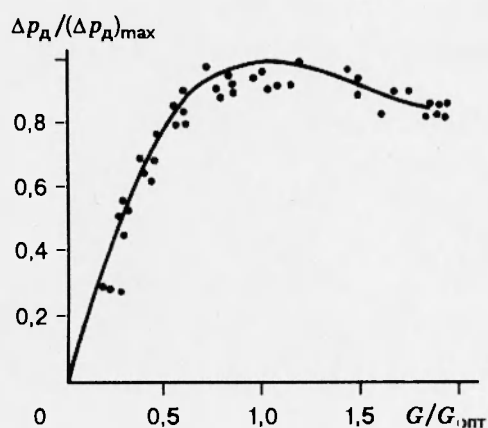


Рис. 6. Обобщение опытных данных ($M_1 = 1,15 \div 3,2$)

свидетельствует о незавершенности физико-химических процессов в ближнем следе.

Обратим внимание еще на один результат, полученный при обработке опытных данных. Как показано выше, существует некоторое оптимальное значение относительного расхода, при котором реализуется максимальный прирост донного давления. Дальнейшее увеличение G приводит к уменьшению либо сохранению достигнутого уровня. Учитывая, что качественный характер зависимости $(\Delta \bar{p}_d)_{\max} = f(G)$ для исследованной группы пиротехнических составов и для диапазона изменения чисел Маха и Рейнольдса одинаков, представляется целесообразным рассмотреть зависимость $\Delta p_d / (\Delta p_d)_{\max} = f(G/G_{\text{опт}})$.

Результаты такой обработки показаны рис. 6, откуда следует, что все экспериментальные точки, полученные в указанных выше диапазонах изменения параметров потока и параметров, характеризующих основные свойства пиротехнических составов, группируются около единой кривой.

Анализ и обобщение экспериментальных данных, отражающих влияние тепломассоподвода на изменение донного давления, позволяет сделать следующие выводы.

При увеличении относительного расхода G продуктов неполного сгорания пиротехнических составов величина $\Delta \bar{p}_d$ монотонно возрастает до некоторого уровня $(\Delta p_d)_{\max}$, который реализуется при оптимальном значении $\bar{G}_{\text{опт}}$. При этом получено, что величина $(\Delta \bar{p}_d)_{\max}$ уменьшается с уменьшением числа Маха. Так, например, если при $M = 3,0$ она составляла $0,4 \div 0,5$, то для $M = 1,6 \div 1,7$ ее значение уменьшается до $0,2 \div 0,3$. Качественно идентичный характер поведения $\Delta \bar{p}_d = f(G)$ при различных числах Маха свидетельствует о неизменном газодинамическом режиме течения в донной части. Выше он классифицируется как режим с присоединенной зоной отрыва.

Величина относительного расхода $\bar{G}_{\text{опт}}$, при которой давление максимально, для чисел Маха потока от 1,2 до 3,0 находится в пределах $4 \cdot 10^3 < \bar{G}_{\text{опт}} < 8 \cdot 10^3$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 95-03-09113а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бартльме Ф. Газодинамика горения. М.: Энергоиздат, 1981.
2. Горение в сверхзвуковом потоке / В. К. Баев, В. И. Головичев, П. К. Третьяков и др. Новосибирск: Наука, 1984.

3. **Глаголев А. И., Зубков А. И., Третьяков П. К.** Влияние тепломассопотова на донное сопротивление тел вращения при сверхзвуковом обтекании // Изв. РАН. МЖГ. 1995. № 3.
4. **Шидловский А. А.** Основы пиротехники. М.: Машиностроение, 1973.
5. **Аэродинамические установки Института механики МГУ.** М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985.
6. **Чжен П.** Отрывные течения. М.: Мир, 1973.
7. **Третьяков П. К.** Обобщение данных по эффективности воздействия вдува и горения на донное давление // Тр. Центр. Ин-та авиац. моторостроения им. П. И. Баранова. № 1140. 1985. С. 177–192.

Поступила в редакцию 30/X 1995 г.
