

ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОБЛАСТИ ТЕПЛОМАССОПОДВОДА В БЛИЖНЕМ СЛЕДЕ ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ НА ЕГО ДОННОЕ ДАВЛЕНИЕ И СОПРОТИВЛЕНИЕ

А. И. Глаголев, А. И. Зубков, Л. Д. Сухановская

Институт механики МГУ, 117234 Москва

Экспериментально показано, что в ближнем следе тела вращения, обтекаемого сверхзвуковым потоком ($1,15 < M < 3,1$), существует по крайней мере две области, где тепломассоподвод более эффективен, чем при использовании традиционных схем снижения донного сопротивления. Первая из них расположена на некотором расстоянии от донного среза, вторая — вверх по потоку от области присоединения оторвавшегося пограничного слоя. Воздействие тепломассоподвода на эти области приблизительно одинаково и приводит к повышению донного давления практически до статического давления в набегающем потоке.

Исследованиями влияния тепломассоподвода в различных участках поверхности летательного аппарата на его сопротивление установлено [1–3], что вдув высокоэнергетических струй в донную область тела вращения приводит (по сравнению с вдувом инертных газов) к увеличению донного давления и, как следствие, к снижению общего коэффициента сопротивления за счет уменьшения составляющей донного сопротивления. На основе результатов проведенных экспериментальных исследований при числах Маха $M = 1,15 \div 3,1$ определен диапазон изменения расходных, энергетических и других параметров пиротехнических составов (ПС), обеспечивающих наибольшее снижение донного сопротивления [2, 3].

Для решения практических задач важное значение имеет вопрос о влиянии конструктивных особенностей узла вдува продуктов неполного сгорания ПС на донное сопротивление тела вращения. В литературе эта проблема исследована поверхностно и только для наиболее простого случая — вдува инертных газов в донную часть движущегося тела [4, 5]. Некоторые сведения о влиянии комбинированного вдува на донное сопротивление приведены в [6]. Данная работа в определенной степени восполняет пробел в предшествующих исследованиях.

Основная цель работы — исследование возможностей целенаправленного регулирования донного давления и сопротивления тела вращения за счет изменения положения области тепломассоподвода в ближнем следе.

Эксперименты проводились на установках Института механики МГУ [7] в диапазоне чисел

Маха $M = 1,15 \div 3,1$ и чисел Рейнольдса $Re = (2 \cdot 10^7) \div 10^8$ 1/м.

Для исследования влияния способов вдува продуктов неполного сгорания ПС в донную область на давление и сопротивление тела вращения испытаны модели и донные насадки, представленные на рис. 1.

На рис. 2 приведена схема модели для измерения силы, действующей на ее дно. Кормовая часть модели соединена с основной частью корпуса через однокомпонентные тензометрические весы. Зазор между элементами 2 и 4 допускает деформацию силового элемента в продольном направлении. Выбранная схема позволяет измерить силу, действующую только на донную часть как при горении, так и без него. В модели использовались насадки для вдува перпендикулярно потоку (см. рис. 1), в пограничный слой перед донным срезом (MD-5) и по ступенчатому закону (MD-6). Вдув в пограничный слой проводился через шесть пазов размером 10×10 мм, расположенных на цилиндрической поверхности насадка диаметром 30 мм. Ступенчатый вдув осуществлялся через девять отверстий диаметром 2 мм на торцевой поверхности модели, а также через шесть отверстий диаметром 2 мм на цилиндрическом выступе с внешним диаметром 14 мм и через отверстие диаметром 4 мм в цилиндрическом стержне. На этой модели проведена также серия экспериментов с плоскими шайбами D-1, D-2, D-3, D-4 и D-5 (размеры указаны в таблице на рис. 2), имеющими по 18 отверстий диаметром 2 мм с центрами, расположенными на окружностях разного диаметра.

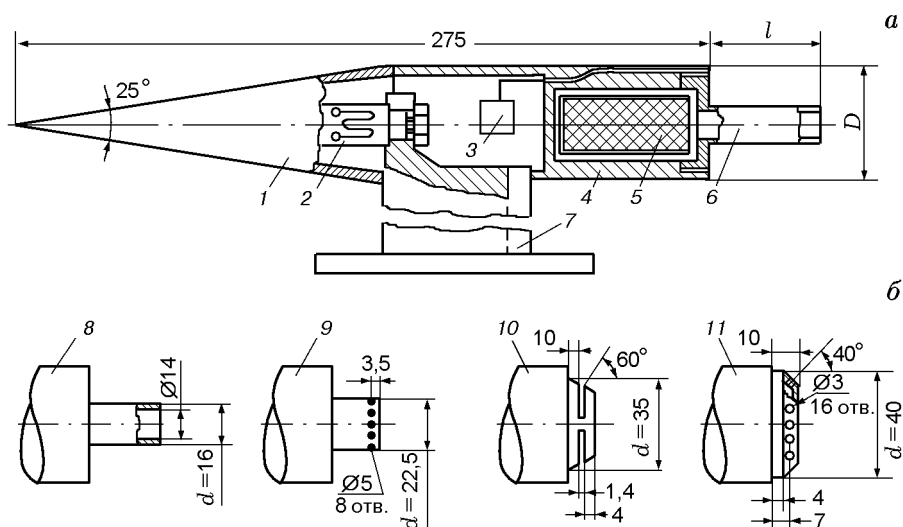


Рис. 1. Схемы модели диаметром $D = 45$ мм (а) и донных насадков (б):

1 — носовой конус; 2 — тензочувствительные датчики; 3 — датчики давления; 4 — корпус цилиндрической части; 5 — пиротехнический состав; 6 — донный насадок; 7 — пилон; 8 — донный насадок MD-1 для вдува параллельно потоку; 9 — донный насадок MD-2 для вдува перпендикулярно потоку; 10, 11 — донные насадки MD-3 и MD-4 для вдува под углом к потоку

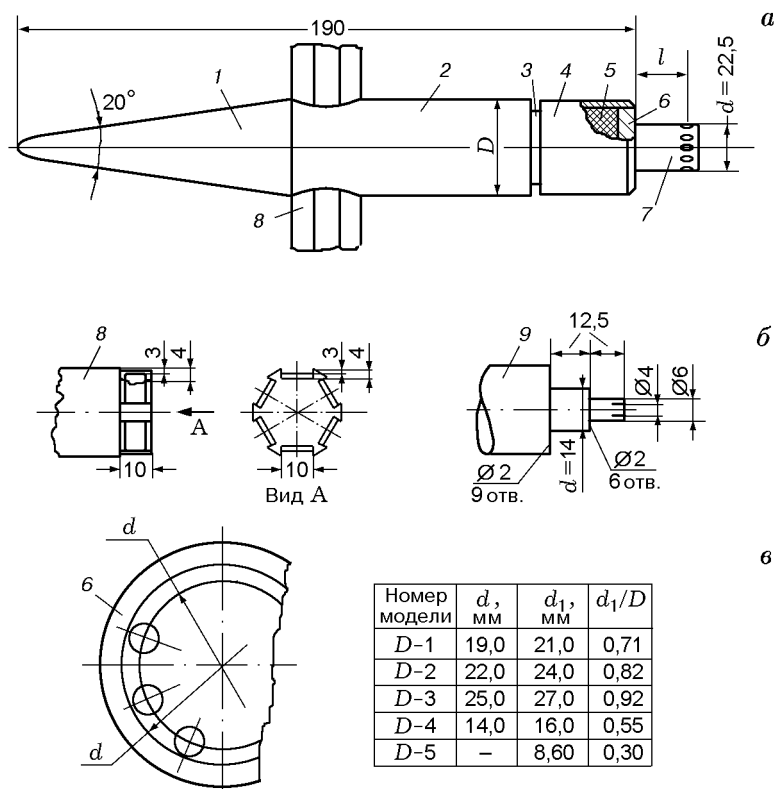


Рис. 2. Схемы модели диаметром $D = 30$ мм (а), донных насадков (б) и донных шайб (в):

1 — носовой конус; 2 — корпус; 3 — тензочувствительные датчики; 4 — корпус газогенератора; 5 — пиротехнический состав; 6 — донная шайба; 7 — донный насадок; 8 — донный насадок MD-5 для вдува в пограничный слой; 9 — донный насадок MD-6 для ступенчатого вдува

В качестве генератора тепла и массы использованы ПС с отрицательным кислородным балансом и, как правило, на основе металлического горючего (магния). Выбор данного типа ПС обусловлен следующими соображениями:

— магниевые составы достаточно устойчиво горят при низком давлении окружающей среды, что является существенным фактором при исследованиях донных течений, где разрежение достаточно высокое;

— в продуктах горения образуются легко воспламеняющиеся пары магния, что создает благоприятные условия для увеличения тепловыделения за счет их дожигания в слое смешения.

В проведенных экспериментальных исследованиях использовано 24 марки ПС различных рецептур, которые для решения поставленных задач были объединены в группы по параметрам, определяющим эффективность воздействия вдува продуктов сгорания ПС: относительный расход \bar{G} продуктов сгорания ПС и относительная калорийность $\bar{Q}_T = Q_T/c_p T_0$, где c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении, T_0 — температура торможения.

Перед экспериментом образец ПС крепился внутри корпуса донного газогенератора (ДГГ) в кормовой части модели. После запуска и выхода на рабочий режим аэродинамической установки поджиг образца проводился специально разработанной системой воспламенения. В процессе эксперимента измеряли продольную силу, действующую на модель без горения ПС и с горением ПС, донное давление в трех точках на торце модели, а также статическое давление невозмущенного потока (в пяти точках) и полного потока (в трех). Структура потока визуализировалась прибором Теплера. Проводилась кино- и видеосъемка процесса обтекания модели набегающим потоком.

Рассмотрим результаты исследования влияния рассосредоточенного по площади донного торца тепломассоподвода на величину донного давления (сопротивления). Более конкретно суть вопроса состоит в следующем: зависит ли донное давление от расположения на донном торце модели отверстий для вдува продуктов сгорания ПС. В качестве конструктивного параметра, определяющего размещение отверстий для вдува на донном торце, взята величина d_1 (см. рис. 2). Введение параметра d_1 обосновано по крайней мере двумя причинами. Во-первых, при обработке

результатов экспериментов можно проследить влияние отношения d_1/D вплоть до значения, равного единице, что невозможно при использовании относительного диаметра d/D (d — диаметр цилиндрической насадки, D — донного среза модели). Во-вторых, возможно сравнение полученных данных с результатами вдува через центральное отверстие с диаметром, практически совпадающим с диаметром донного торца. В данной серии экспериментов использованы ПС с незначительными (до 10 %) различиями энергетических характеристик (например, параметра \bar{Q}_T) и содержания конденсированной фазы, что позволило сократить число определяющих параметров, обоснованных в работах [1, 2]. В рассматриваемой задаче основными параметрами выбраны относительный расход $\bar{G} = G/G_B$ и конструктивный параметр d_1/D , характеризующий положение места вдува на донном торце модели. Эффект воздействия тепломассоподвода на течение в донной области определялся принятыми в работе [1, 2] величинами

$$\Delta \bar{p}_d = f(\bar{G}, d_1/D), \quad \bar{p}_d = f(\bar{G}, d_1/D),$$

$$C_{x,d}^g/C_{x,d} = f(\bar{G}, d_1/D).$$

Здесь $\Delta \bar{p}_d = (p_d - p_0)/p_1$, где p_d, p_0 — донное давление при вдуве и без него соответственно, p_1 — статическое давление потока; $C_{x,d}$ и $C_{x,d}^g$ — коэффициенты донного сопротивления соответственно без тепломассоподвода и с ним; G — расход продуктов сгорания ПС; G_B — расход воздуха через сечение миделя.

1. Влияние конструктивного параметра d_1/D на донное давление показано на рис. 3, а в виде зависимости $\Delta \bar{p}_d = f(d_1/D, \bar{G})$. Для всех использованных значений \bar{G} максимум достигается при $d_1/D = 0,6 \div 0,8$. Вертикальной штриховой линией обозначены значения $\Delta \bar{p}_d$ при вдуве через центральное круглое отверстие. Расходные характеристики в обоих случаях одинаковы. Видно, что для каждого значения \bar{G} вдув через серию отверстий более эффективен, чем через круглое отверстие. Увеличение параметра d_1/D приводит к росту $\Delta \bar{p}_d$. Эти изменения донного давления объясняются воздействием вдуваемой массы на вязкий слой смешения и величиной продольного градиента давления в районе «горла» ближнего следа [2, 8]. Повышение донного давления при вдуве через серию отверстий в торце донного среза

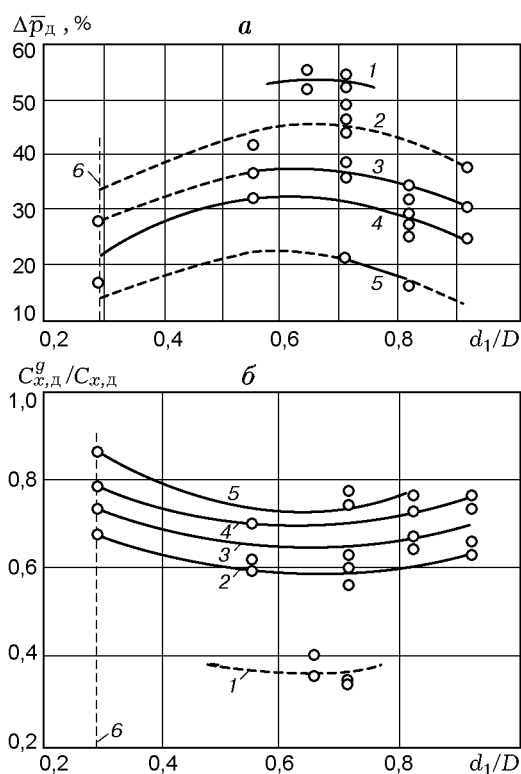


Рис. 3. Зависимость относительного прироста донного давления (а) и донного сопротивления (б) от конструктивного параметра d_1/D при различных значениях расхода \bar{G} для $M = 3$:

1 — $\bar{G} = 0,75 \div 0,98$ %; 2 — $\bar{G} = 0,42 \div 0,5$ %; 3 — $\bar{G} = 0,26 \div 0,33$ %; 4 — $\bar{G} = 0,19 \div 0,23$ %; 5 — $\bar{G} = 0,14 \div 0,16$ %; 6 — круглое отверстие

по сравнению с вдувом через круглое отверстие (при условии сохранения $\bar{G} = \text{const}$) можно объяснить более интенсивным смешением газа, поступающего из области «горла» в зону рециркуляции, с продуктами неполного сгорания. Интенсификация процесса смешения обеспечивается за счет увеличения поверхности контакта струй продуктов сгорания с циркулирующей массой газа в области отрыва. Геометрические параметры ближнего следа при этом изменяются: эжекция вязким слоем дополнительной (за счет вдува) нагретой массы газа приводит к дополнительному тепловыделению и увеличению массы газа, возвращаемой в отрывную область из зоны присоединения, что вызывает уменьшение степени расширения внешнего потока и, как следствие, предельного угла отклонения внешнего потока, а также увеличение диаметра горла следа \bar{d}_r . Донное давление при этом повышается. Отметим, что максимальное увеличение донного давления $\Delta \bar{p}_d$ наблюдает-

ся при значении параметра d_1/D , близком к диаметру «горла», который может быть определен по формуле, предложенной в работе [8]: $\bar{d}_r = 0,8(1 - \varphi/33,2)$, где φ — угол поворота внешнего потока у кромки донного среза, град.

Действительно, при $\bar{G} \approx 0,5$ % значение φ , измеренное по фотографиям, составляет $3 \div 4^\circ$ и, следовательно, $\bar{d}_r = 0,7 \div 0,72$, что близко к значению параметра $d_1/D = 0,6 \div 0,8$, при котором достигается максимальный рост донного давления (см. рис. 3). При дальнейшем увеличении параметра d_1/D значение \bar{p}_d уменьшается, что связано с ухудшением условий смешения вдуваемой и циркулирующей в зоне отрыва массы газа. Влияние расположения системы отверстий на снижение донного сопротивления модели иллюстрирует рис. 3,б. Представленные здесь данные согласуются с результатами измерения донного давления (см. рис. 3,а). Максимальное снижение донного сопротивления реализуется при $\bar{G} > 0,5$ % и составляет $65 \div 70$ % донного сопротивления при отсутствии вдува.

2. Исследовано также влияние вдува продуктов сгорания ПС через щелевые (модели MD-3 и MD-5) и дискретные отверстия (MD-4) в цилиндрической и конических поверхностях донных насадков, закрепленных на донном торце модели.

Влияние конструктивных элементов (донных державок, стержней, конусов и др.), находящихся в донной части тел вращения и обдуваемых потоком воздуха, достаточно подробно исследовано в [8–10]. В частности, в этих работах показано, что присутствие цилиндрического стержня или каких-либо других конструктивных элементов в донной части изменяет условия течения как в ближнем следе, так и вне его, а следовательно, и донное давление. Учитывая это, в настоящей работе исследовано влияние вдува продуктов сгорания ПС из насадков, расположенных за донным срезом тела вращения, для случаев, когда их влияние на структуру течения в ближнем следе либо мало, либо отсутствует.

Донный насадок MD-5 (см. рис. 2) использован для проверки эффективности тепло-массопровода с целью снижения донного сопротивления за счет воздействия его на пограничный слой перед донным торцом. Вдув проводился по нормали к цилиндрической поверхности элемента и частично непосредственно в ближний след вблизи кромки донного среза (за счет сме-

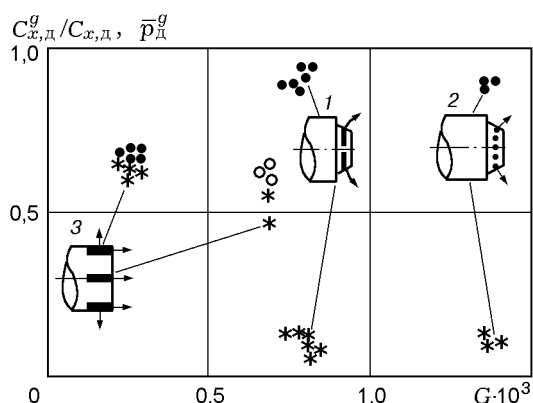


Рис. 4. Зависимость относительного донного давления и донного сопротивления от расхода \bar{G} для различных конструктивных схем вдува при $M = 3$:

1 — MD-3, 2 — MD-4, 3 — MD-5; ● — \bar{p}_d^g ; * — $C_{x,d}^g/C_{x,d}$; ○ — $C_{x,d}^g/C_{x,d}$ (круглое отверстие)

щения задней кромки отверстий к центру донного среза модель MD-5). В качестве источника рабочего тела в ДГГ использованы составы с калорийностью $Q_T = 24,0$ и $26,6$ МДж/кг. Получено, что при относительном расходе продуктов сгорания $\bar{G} \approx 0,27$ % уменьшение донного сопротивления составляет ≈ 35 %.

Применение конструктивных элементов, реализующих вдув продуктов сгорания под углом к невозмущенному потоку (модель MD-3, MD-4), обеспечило более активное воздействие тепломассоподвода на слой смешения в ближнем следе. В этой серии экспериментов использованы составы с $Q_T = 16,2$ и $21,0$ МДж/кг. Из трех рассмотренных конструктивных схем вдува наиболее предпочтительными являются модели MD-3 и MD-4 (рис. 4), где вдув осуществляется под углом к набегающему потоку. Достигнутый уровень снижения донного сопротивления для этих моделей приблизительно одинаков и составляет ≈ 90 % от исходного. Вдув ПС в пограничный слой перед донным срезом с помощью конструктивного элемента MD-5 оказался менее эффективным: снижение донного сопротивления составляет $50 \div 55$ % от исходного при $\bar{G} > 0,6$ %. Это меньше, чем по схемам MD-3 и MD-4, но на $20 \div 25$ % выше по сравнению с вдувом через круглое отверстие (при тех же условиях). Отметим, что эффективность вдува по схеме MD-5 приблизительно такая же, как и при вдуве через серию отверстий, расположенных на расстоянии $d_1/D > 0,8$.

3. Воздействие вдува продуктов сгорания

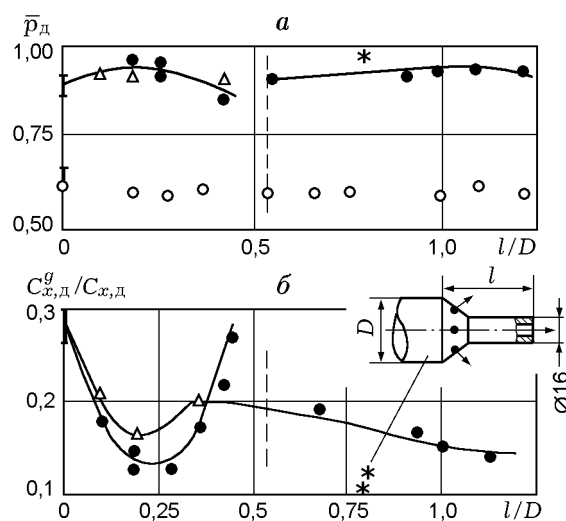


Рис. 5. Влияние расположения источника тепломассоподвода в ближнем следе на донное давление (а) и относительное уменьшение донного сопротивления (б) при $M = 1,64 \div 1,7$:

○ — без горения; с горением, $\bar{G} = 0,8 \div 1,2$ %:
● — $d/D = 0,37$, Δ — $d/D = 0,5$, * — комбинированный вдув при $l/D = 0,8$

ПС на различные области ближнего следа исследовалось с использованием моделей MD-1, MD-2. В экспериментах варьировались параметры d/D и l/D (l — длина цилиндрического насадка). Вдув продуктов сгорания проводился либо через торец выступающей части, либо через серию отверстий на цилиндрической поверхности донного насадка.

Эта серия экспериментов проведена при числе Маха $M = 1,64 \div 1,7$ на модели диаметром $D = 45$ мм (см. рис. 1), в донной части которой располагались цилиндрические стержни диаметром 16 и 22,5 мм ($d/D = 0,37$ и $0,5$ соответственно). При этом относительная длина l/D стержней менялась от 0,56 до 1,22 при $d/D = 0,37$ и от 0,19 до 0,44 при $d/D = 0,5$. Вдув продуктов сгорания в донную область осуществлялся за счет горения ПС с калорийностью $Q_T = 21,0 \div 25,0$ МДж/кг. Результаты экспериментов приведены на рис. 5. Видно, что относительные размеры насадков в исследованном диапазоне их изменения не оказывают заметного влияния на донное давление на торце тела вращения, что подтверждается также оценками геометрических характеристик ближнего следа, рассчитанными в соответствии с [7]. С другой стороны, вдув продуктов сгорания в различные области ближнего следа существен-

но воздействует на донное давление и донное сопротивление. Обе зависимости имеют немонотонный характер. Отмечаются два максимума давления: при $l/D \approx 0,2$ и $l/D \approx 1,1$. Значение относительного давления в обоих случаях одинаково и составляет $\bar{p}_d \approx 0,95$. Закономерности изменения донного сопротивления полностью соответствует изменению донного давления. Значения $\bar{C}_{x,d}$ для указанных значений l/D приблизительно в $1,5 \div 1,7$ раза ниже исходного. Отметим, что при $d/D = 0,5$ и $l/D = 0 \div 0,4$ снижение донного сопротивления и повышение давления практически не зависят от способа вдува (перпендикулярно или по направлению набегающего потока).

4. Проведена серия экспериментов с использованием комбинированного способа вдува продуктов неполного сгорания ПС в донную область. Техническая реализация такого способа вдува осуществлена за счет постановки на модель конструктивного элемента (см. рис. 5, б), представляющего комбинацию усеченного конуса и цилиндрического наконечника. Вдув продуктов сгорания в донную область проводился через восемь отверстий диаметром 5 мм, расположенных на конической поверхности, и через отверстие диаметром 13 мм в торце цилиндрического стержня. Результаты измерений показали, что в этом случае донное давление увеличивается до значения $\bar{p}_d = 0,98$ ($C_{x,d}^g/C_{x,d} = 0,12$), что выше, чем при использовании только цилиндрических стержней (см. рис. 5). Для объяснения полученных результатов был выполнен анализ волновой структуры потока в области ближнего следа при различных режимах обтекания, основанный на компьютерной обработке данных видеосъемки. Обнаружено, что с уменьшением значения l/D уменьшается характерный поперечный размер ближнего следа, а следовательно, и уровень донного давления. Аналогичные изменения волновой структуры (в данном случае — видимых границ ближнего следа) отмечены и при вдуве продуктов горения ПС через отверстие в торце цилиндрического стержня с $d/D = 0,37$. Как указывалось выше, при $l/D = 1,1$ наблюдается максимум донного давления ($\bar{p}_d = 0,95$). Это может быть объяснено непосредственным воздействием струи продуктов горения ПС на область сжатия («горло») оторвавшегося от кромки донного среза набегающего потока. Действительно, используя соответствующие соотношения из [8, 11] для дли-

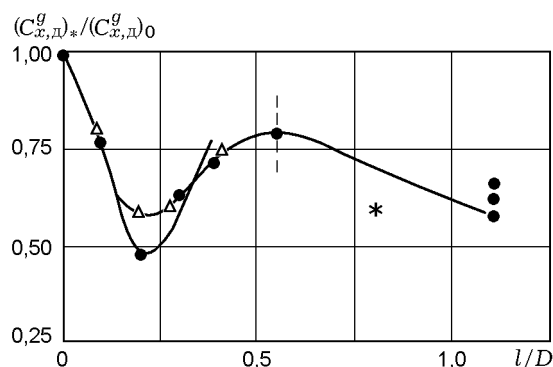


Рис. 6. Сравнительная оценка эффективности различных способов вдува:

● — $d/D = 0,37$, Δ — $d/D = 0,5$, * — комбинированный вдув при $l/D = 0,8$

ны ближнего следа l_0 и расстояния X_s от торца цилиндрического стержня (через который проводится вдув) до скачка, замыкающего первую «бочку» истекающей нерасчетной струи, получим $\bar{l}_0 = 1,7$ (расчет проведен по формуле $\bar{l}_0 = 0,035M_1^2 - 0,415M_1 + 2,3$); $\bar{X}_s|_{n=4} = 0,4$ (рассчитано как

$$\bar{X}_s = 5,55 \left(\sqrt{r_a \sqrt{n(1 + \chi_a M_a^2)} - 1} - 1 \right),$$

где r_a — радиус отверстия вдува; χ_a — отношение удельных теплоемкостей продуктов сгорания; M_a — число Маха вдуваемой струи; n — нерасчетность струи). Учитывая, что при $\bar{l} \approx 1,1$ достигается максимум давления, получено, что относительное расстояние от торца донного среза до диска Маха, замыкающего первую «бочку» вдуваемой струи, составляет $\bar{l} + \bar{X}_s \approx 1,1 + 0,4 \approx 1,5$. Как следует из проведенных ранее оценок, это значение близко к относительной длине ближнего следа ($\bar{l}_0 = 1,7$). С физической точки зрения этот результат достаточно очевиден: выделение тепла и подвод массы продуктов горения ПС происходят в некоторой окрестности диска Маха вблизи «горла» ближнего следа, что приводит к увеличению диаметра «горла» и, следовательно, к повышению донного давления.

Представляет интерес провести сравнительные оценки эффективности различных способов вдува, рассмотренных выше, с традиционным — вдувом через серию отверстий в донном срезе при их оптимальном расположении. Эти результаты представлены на рис. 6 зависимостью

$$(\bar{C}_{x,d}^g)_*/(\bar{C}_{x,d}^g)_0 = f(l/D, d/D),$$

где $(\bar{C}_{x,d}^g)_0$ — изменение донного сопротивления при оптимальном вдуве через систему отверстий в донном срезе; $(\bar{C}_{x,d}^g)_*$ — изменение донного сопротивления при различных способах вдува.

Характер зависимости здесь полностью соответствует приведенным выше результатам (см. рис. 5) и показывает, что при определенных условиях вдув продуктов неполного сгорания ПС в области, расположенные на некотором расстоянии от донного среза, в $1,6 \div 2$ раза эффективнее, чем вдув через серию отверстий в донном торце (относительные расходы в обоих случаях одинаковы). Таким образом, основной вывод проведенных исследований состоит в том, что в ближнем следе существует по крайней мере две области тепломассоподвода, в которых его эффективность значительно выше, чем при использовании традиционной схемы — тепломассоподвод с торца донной части тела вращения. Первая из них расположена вблизи донного среза, вторая — вблизи «горла» ближнего следа.

5. В заключительном цикле исследований получены экспериментальные данные с использованием нетрадиционных схем вдува продуктов горения ПС в донную область при $M = 3$. Этот цикл работ состоит из двух частей.

В первой части экспериментально изучено обтекание модели с цилиндрическим стержнем ($d/D = 0,75, l/D = 0,13 \div 0,53$). Схема вдува показана на рис. 1, модель MD-2. В качестве источника продуктов сгорания использован ПС с $Q_T = 25,0$ МДж/кг. Эффективность вдува определялась величиной $\Delta\bar{p}_* = \Delta\bar{p}/\Delta\bar{p}_0$, т. е. отношением прироста донного давления за счет использования вдува через радиальные отверстия к приросту донного давления, получаемого при вдуве через систему отверстий в плоскости донного среза. Состав продуктов горения и относительный расход в обоих случаях одинаков. Результаты сравнения эффективности этих способов вдува представлены на рис. 7.

Получено, что в диапазоне $l/D = 0,15 \div 0,3$ эффективность вдува через серию отверстий приблизительно на 30 % выше, чем в случае вдува через торец модели. При увеличении l/D эффект снижается и для $l/D > 0,4$ становится меньше, чем при вдуве по «классической» схе-

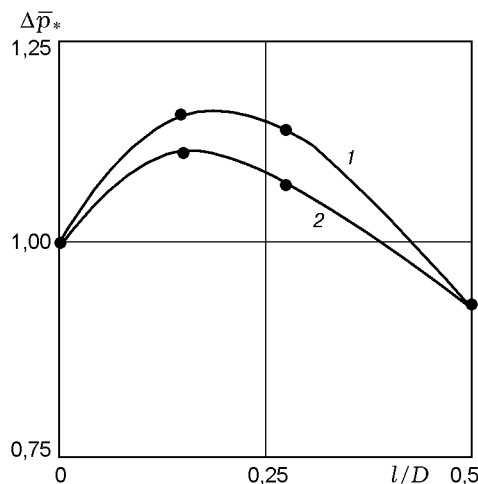


Рис. 7. Сравнительная оценка эффективности вдува по схеме MD-2 ($d/D = 0,75$) и через серию отверстий при их оптимальном расположении для $M = 3$: $\bar{G} = 0,4$ (1), 0,56 % (2)

ме. Во второй части исследований экспериментально обоснована эффективность комбинированного способа тепломассоподвода в ближнем следе. Конструктивная реализация способа показана на рис. 2, модель MD-6. Вдув продуктов горения проводился по длине ближнего следа через торцы «ступенчатой» конструкции, представляющей собой набор цилиндров различных диаметров, пристыкованных торцами друг к другу. Анализ возможных эффектов, получаемых при вдуве продуктов горения по такой схеме, показывает, что их воздействие распространяется не только на слой смешения оторвавшегося пограничного слоя, но и на область сжатия вблизи «горла» ближнего следа. Экспериментально подтверждено, что применение указанной схемы тепломассоподвода приводит к полному исчезновению донного сопротивления.

Таким образом, проведенные исследования показали, что существуют резервы (как в схемно-конструктивных решениях, так и в энергетических ресурсах применяемых топлив), значительно повышающие эффективность традиционных способов снижения донного сопротивления.

Получено также, что:

1) вдув продуктов сгорания вблизи донного торца тела вращения под углом к набегающему потоку более эффективен, чем при использовании традиционных схем снижения донного сопротивления, таких как вдув через

единичное круглое отверстие либо через серию отверстий, расположенных на донном срезе модели;

2) вдув продуктов сгорания в различные области ближнего следа приводит к более значительному снижению донного сопротивления по сравнению с традиционными способами. При этом наибольший эффект достигается за счет тепломассоподвода вблизи области присоединения оторвавшегося пограничного слоя — «горла» ближнего следа. Воздействия тепломассоподвода в этих случаях приблизительно одинаковы и приводят к повышению донного давления практически до статического давления в потоке;

3) максимальное снижение донного сопротивления достигнуто при использовании комбинированного («ступенчатого») вдува по длине ближнего следа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глаголев А. И., Зубков А. И., Третьяков П. К. Влияние тепломассоподвода на донное сопротивление тел вращения при сверхзвуковом обтекании // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 1995. № 3. С. 183.
2. Глаголев А. И., Гаранин А. Ф., Зубков А. И., Третьяков П. К. Влияние тепло- и массоподвода на донное давление тел вращения при сверхзвуковых скоростях // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 3. С. 107–112.
3. Glagolev A. I., Garanin A. F., Krainev V. L., Tretyakov P. K. Control by the base drag with the method using the change of the burning zone position to the body base // Proc. of the Intern. Conference of the Methods of Aerophysical Reserch. Novosibirsk, September 2–6, 1996. Pt 2. P. 76–79.
4. Бартльме Ф. Газодинамика горения. М.: Энергоиздат, 1981.
5. Горение в сверхзвуковом потоке / В. К. Баев, В. И. Головичев, П. К. Третьяков и др. Новосибирск: Наука, 1984.
6. Шадов К. К., Чиз Д. Дж. Экспериментальное исследование уменьшения донного сопротивления при комбинированном поперечном и осевом вдуве // Ракет. техника и космонавтика. 1978. Т. 16, № 10.
7. Аэродинамические установки Института механики МГУ. М.: Изд-во МГУ, 1985. С. 3–12.
8. Бондаренко Р. М. Исследование донного давления за осесимметричными телами при сверхзвуковых и гиперзвуковых скоростях // Труды ЦАГИ. 1986. Вып. 2295.
9. Исследование течений за донным срезом тел, обтекаемых потоком газа (По материалам иностранной печати за 1967–1972 гг.) // Обзор ОНТИ ЦАГИ. 1974. № 452. С. 125–128.
10. Глотов Г. Ф., Лаврухин Г. Н. Исследование срывного течения за осесимметричным уступом с центральным стержнем // Учен. записки ЦАГИ. 1974. Т. 5, № 2. С. 143–150.
11. Шелухин Н. Н. Исследование характеристик недорасширенной струи // Учен. записки ЦАГИ. 1995. Т. 26, № 1–2. С. 79–87.

Поступила в редакцию 26/V 1999 г.