

УДК 532.58:533.604.50

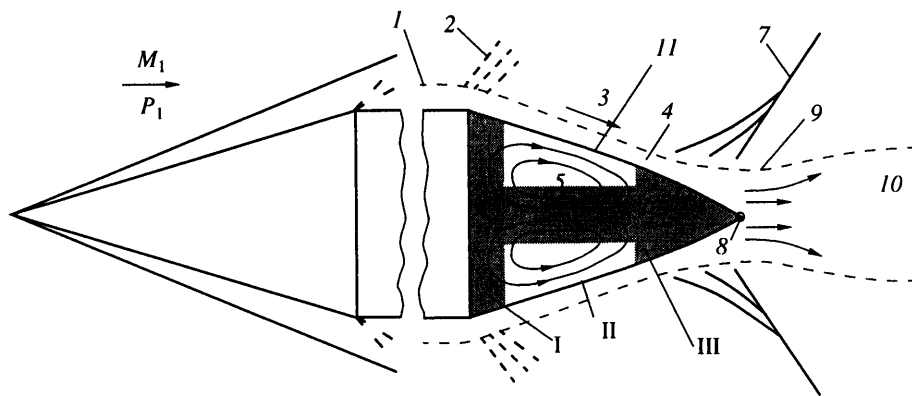
© 2002 г. А.Ф. ГАРАНИН, А.И. ГЛАГОЛЕВ, А.И. ЗУБКОВ,
Л.Д. СУХАНОВСКАЯ

СОПРОТИВЛЕНИЕ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ С ТЕПЛОМАССОПОДВОДОМ В БЛИЖНЕМ СЛЕДЕ ПРИ СВЕРХЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ

Экспериментально показано, что при определенных способах вдува водорода и продуктов неполного сгорания пиротехнических составов в ближний след тел вращения при числах Маха потока от 1.15 до 3.0 их донное сопротивление может быть полностью устранено. Проведено обобщение экспериментальных данных.

Проблема снижения донного сопротивления движущихся тел актуальна в связи с тем, что его величина для большого класса летательных аппаратов составляет 25–30% общего сопротивления. В последние десятилетия ведется активный поиск способов его уменьшения как за счет совершенствования формы летательных аппаратов, так и за счет организации на различных участках его поверхности процессов, приводящих к изменению условий обтекания и, следовательно, аэродинамических характеристик. Одним из перспективных способов снижения донного сопротивления летательных аппаратов является тепломассопровод вблизи донного среза [1, 2]. В [3–5] изучено влияние тепломассоподвода на донное давление осесимметричных тел за счет вдува продуктов сгорания пиротехнических составов в ближний след. При вдуве продуктов сгорания пиротехнических составов через круглое отверстие в донном торце величина прироста донного давления возрастает с увеличением расхода вдуваемого газа до некоторого максимального значения и падает с уменьшением числа Маха. Экспериментально доказано, что в ближнем следе тела вращения, обтекаемого сверхзвуковым потоком ($1.15 < M_1 < 3.0$), существуют две области (I и III) (фиг. 1), вдув продуктов сгорания пиротехнических составов в которые более эффективен, чем при использовании традиционных схем снижения донного сопротивления, например вдуве инертных газов или реагирующих продуктов сгорания через отверстия в донном торце. Область I расположена вблизи донного среза, область II (фиг. 1) – вверх по потоку от области присоединения оторвавшегося пограничного слоя. Воздействие тепломассоподвода на эти области приблизительно одинаково и приводит к повышению донного давления до значения, близкого к статическому давлению в набегающем потоке. Результаты более ранних исследований по данной проблеме отражены в [6, 7], а также в работах обзорного характера [8, 9].

Все накопленные к настоящему времени результаты по влиянию вдува рабочих тел различной природы на донное давление выполнены с использованием теорий, изложенных в работах Корста, Чепмена и их последователей [8], и относятся к случаю тепломассоподвода через торец донной части тела. В этих работах реализована концепция "открытого" следа или присоединенной зоны отрыва – режима течения, при котором сохраняются все основные особенности, показанные на фиг. 1. В связи с этим представляется целесообразным изучить другие способы тепломассоподвода, существенно отличающиеся от приведенных выше.



Фиг. 1. Схема течения в донной области: 1 – пограничный слой вблизи задней кромки модели; 2 – течение расширения; 3 – невязкий поток после расширения; 4 – слой смешения (свободный пограничный слой); 5 – тороидальное течение; 6 – возвратная струя; 7 – хвостовой скачок; 8 – точка торможения; 9 – "горло" ближнего следа; 10 – вязкий след; 11 – разделяющая линия тока, I, II, III – области исследования воздействия тепломассопровода

1. Исследована эффективность двух способов тепломассоподвода в ближний след на донное сопротивление тел вращения.

В первом способе тепломассоподвод осуществлен за счет распределенного вдува и горения водорода по всей области ближнего следа от донного среза до критической точки 8 (фиг. 1). Во втором – путем вдува по определенному закону продуктов неполного сгорания пиротехнических составов. При этом область воздействия та же, что и в первом случае.

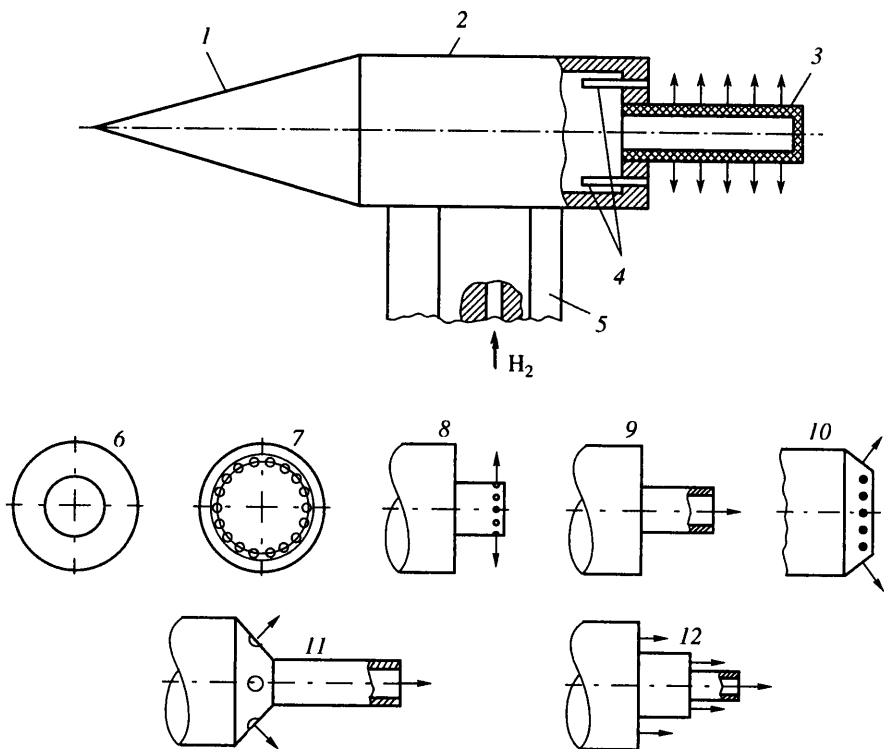
Эффект воздействия тепломассоподвода на течение в донной области во всех случаях определялся величинами [3, 4]

$$P_c = f(G_c), \quad P_{0c} = f(G_{0c}), \quad X_{bc} = f(G_{0c})$$

$$P_c = \frac{P_{bc} - P_b}{P_1}, \quad P_{0c} = \frac{P_{bc}}{P_b}, \quad X_{bc} = \frac{C_{bc}}{C_b}, \quad G_c = \frac{G}{G_w}, \quad G_{0c} = \frac{G}{G_0}$$

Здесь P_{bc} , C_{bc} , P_b , C_b – донное давление и коэффициент донного сопротивления с вдувом и без него соответственно; G – секундный расход вдуваемого вещества; G_w – секундный расход воздуха через сечение мидаля модели; G_0 – секундный расход вдуваемого вещества, при котором достигается максимальное увеличение донного давления; P_1 – статическое давление в набегающем потоке.

Рассмотрим результаты исследования влияния рассредоточенного равномерного вдува и горения водорода по длине ближнего следа на картину течения и донное сопротивление. Эксперименты проведены при числе Маха потока $M_1 = 2.5$, давлении торможения потока $P_0 = 0.4$ МПа и температуре торможения $T_0 = 270\text{--}280$ К. Схема модели и ее размещение приведены на фиг. 2. Диаметр мидаля модели $D = 40$ мм. Вдув водорода в донную область производился либо через отверстие диаметром $d = 0.3D$, либо через боковую поверхность цилиндрической пористой трубки, прикрепленной к донному срезу. Основные размеры пористой трубки: длина $l = 1.5D$, внешний диаметр 14 мм. В экспериментах проводились фото- и киносъемка процесса обтекания прибором Теплера, измерение донного давления в двух точках на торце модели, полного и статического давлений в потоке, силы сопротивления при помощи тензометрических внутримодельных весов, точность которых составляет $3 \div 4\%$.

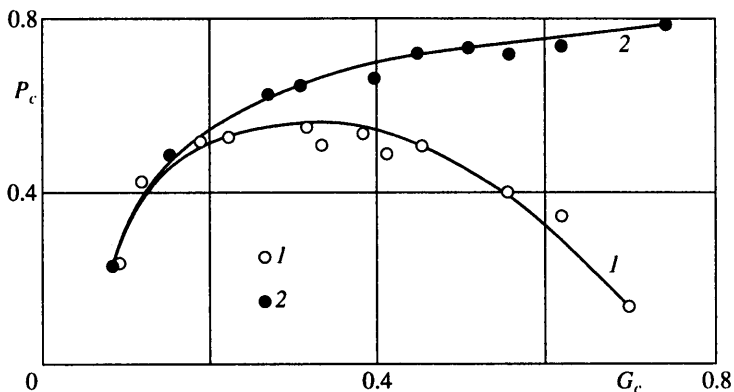


Фиг. 2. Схема модели: 1 – носовой конус; 2 – цилиндрическая часть модели; 3 – пористая трубка; 4 – трубка для измерения давления; 5 – пилон; 6, 12 – донные насадки; "→" – направление вдува

Результаты измерений донных давлений представлены на фиг. 3 в виде зависимости $P_c = f(G_c)$. Из анализа графиков следует.

Горение водорода при вдуве через центральное отверстие (кривая 1) сохраняет традиционную закономерность поведения зависимости $P_c = f(G_c)$: с увеличением относительного расхода G_c от 0.06% до величины (0.2 ÷ 0.35)%, что соответствует $G_c = G_{0c}$, происходит увеличение относительного прироста P_c от 0 до 0.55 ($P_b = 0.95P_1$). Дальнейшее увеличение относительного расхода водорода G_c до 0.70% приводит к снижению прироста донного давления до величины $P_c = 0.15$. В данном случае снижение донного давления является результатом эжектирующего эффекта струи водорода и как следствие смещения вниз по потоку от донного среза зоны максимального тепловыделения, что качественно соответствует результатам работ [3, 4], полученным при вдуве продуктов сгорания пиротехнических составов в донную область, и согласуется с имеющимися данными, характерными для режима течения с присоединенной зоной отрыва в ближнем следе [1–3].

Вдув водорода через боковую поверхность пористой трубки приводит к существенной перестройке течения в донной области и сопровождается рядом положительных факторов, улучшающих процесс горения. В частности, ликвидируется эжектирующий эффект струи, имевший место при вдуве водорода через центральное отверстие, а также обеспечивается более интенсивное смещение в ближнем следе. Отмеченные особенности проявляются в изменении прироста донного давления (фиг. 3, кривая 2). До значений относительного расхода $G_c \leq 0.2\%$ закономерности изменения P_c для обоих способов вдува практически совпадают. Для $G_c > 0.2\%$ при первом способе



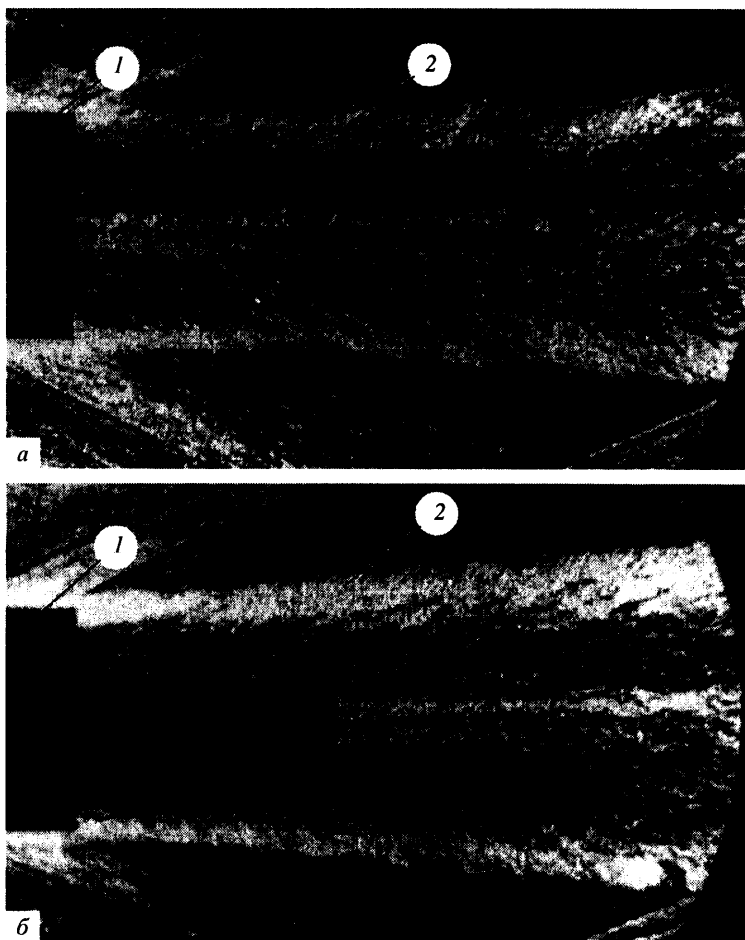
Фиг. 3. Изменение прироста донного давления в зависимости от относительного расхода, $M_1 = 2.5$: 1 – горение водорода, вдув через круглое отверстие; 2 – горение водорода, вдув через пористую трубку; G_c – расход в %

вдува P_c начинает уменьшаться, а при втором – продолжает расти. Горение водорода во втором случае в диапазоне изменения G_c от 0.5 до 0.9% повышает величину P_c до значения, равного 0.6, что на 30% больше значения P_c , достигнутого при вдуве через центральное отверстие.

Результаты оптической визуализации течения для отмеченных выше двух способов вдува и горения представлены на фиг. 4 в виде тепловых фотографий, иллюстрирующих изменение структуры течения в донной области. Фиг. 4, а относится к случаю горения водорода при вдуве через центральное отверстие с относительным расходом $G_c = 0.25\%$ – величине соответствующей максимальному приросту донного давления P_c (фиг. 3, кривая 1). Границы 2-й зоны горения в этом случае практически параллельны, а ее поперечный размер равен диаметру модели. Горение водорода при вдуве через поверхность пористой трубки с относительным расходом $G_c = 0.7\%$ (фиг. 4, б) приводит к расширению 2-й зоны горения и превышению давления в зоне горения над статическим давлением в набегающем потоке. Совместный анализ полученной картины обтекания и закономерности изменения приращения донного давления (фиг. 3, кривая 2) показал, что в данном случае имеет место режим течения с отсутствием зоны отрыва в ближнем следе.

На фиг. 5 и 6 приведены результаты исследований изменения донного давления P_{0c} и коэффициента донного сопротивления X_{bc} от относительного расхода G/G_0 . Эти графики позволяют провести оценку эффективности воздействия тепломассоподвода и горения в ближнем следе для различных способов его организации. Горение водорода при вдуве через центральное отверстие ($G_{0c} = 1$) повышает в 2 раза донное давление по сравнению с донным давлением при отсутствии вдува и горения (фиг. 5, кривая 1). При этом $P_b = 0.95P_1$, а соответствующая этому величина $X_{bc} = 0.1$ (фиг. 6, кривая 1), т.е. происходит 90%-ное снижение донного сопротивления. Дальнейшее увеличение G_{0c} приводит к уменьшению P_{0c} . Горение водорода с применением пористой трубки повышает величину P_{0c} (фиг. 5, кривая 2) до значения 2.3 с последующей тенденцией повышения этого уровня. Так, в диапазоне изменения G_{0c} от 1.0 до 2.0 (соответственно G_c от 0.5 до 0.9%) отмечено повышение донного давления P_b до уровня, превышающего на 2–3% статическое давление в набегающем потоке, а при $G_{0c} > 1.5$ ($G_c > 0.6\%$) – донной тяги (фиг. 6, кривая 2).

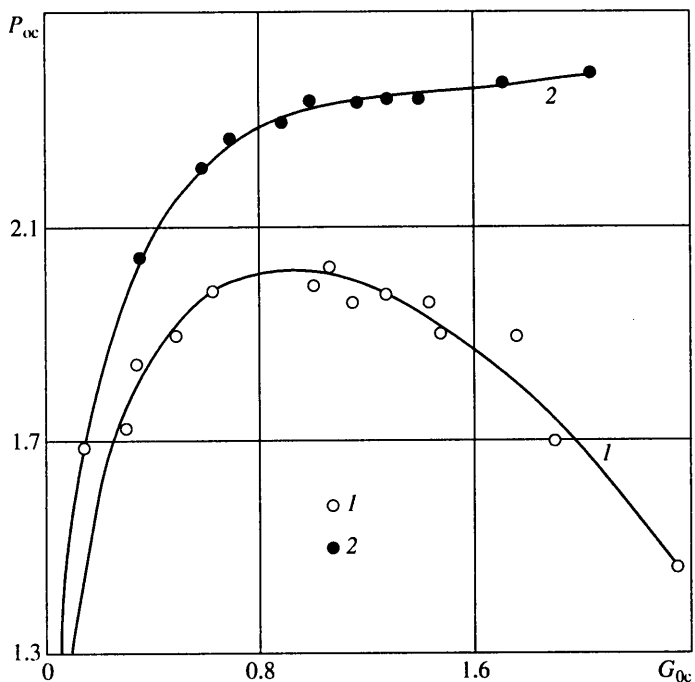
Проведем сравнение приведенных выше данных с соответствующими результатами, полученными при вдуве продуктов сгорания пиротехнических составов в донную область. Вдув продуктов сгорания пиротехнических составов производился через



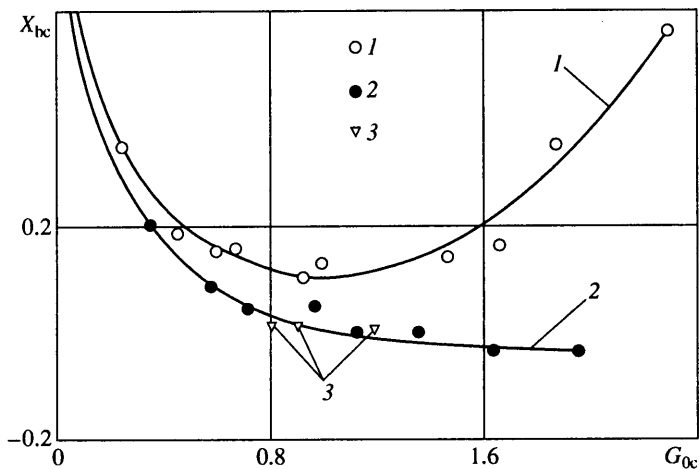
Фиг. 4. Тепловские фотографии процесса горения: *a* – горение водорода, вдув через круглое отверстие, $G = 0.25\%$; *б* – горение водорода, вдув через пористую трубку, $G = 0.7\%$; 1 – модель, 2 – граница зоны горения

донный насадок ступенчатой формы (фиг. 2; насадок 12), позволивший реализовать дискретный закон вдува по длине ближнего следа, пропорциональный изменению площадей при переходе от одной ступени к другой. Эксперименты проведены на модели диаметром $D = 30$ мм, удлинением $\lambda = 6$ при числе Маха $M_1 = 3$, давлении торможения $P_0 = 0.4\text{--}1.2$ МПа и температуре торможения $T_0 = 270\text{--}280$ К [4]. Источником тепломассоподвода являлись продукты сгорания пиротехнических составов с относительной теплотой сгорания $Q_t = Q/c_p T_0$ (Q – количество тепла, выделяемого пиротехническим составом за счет собственного окисления; $c_p T_0$ – энтальпия торможения основного потока). Результаты экспериментов приведены на фиг. 6. Вдув продуктов сгорания пиротехнических составов по указанному закону полностью устраняет донное сопротивление ($X_{bc} = 0$). Приведенные данные совпадают с аналогичными результатами, полученными при горении водорода.

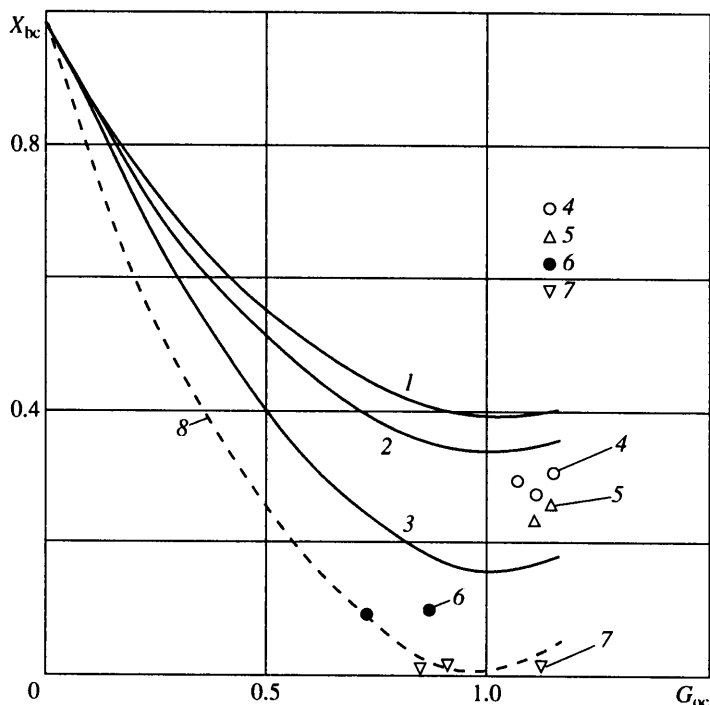
2. Анализ многочисленных экспериментальных данных по определению силы донного сопротивления показывает, что зависимость коэффициента сопротивления от относительного расхода G_{0c} продуктов сгорания при вдуве их через отверстие в донном торце является параболической (фиг. 7). Из графика видно, что донное



Фиг. 5. Изменение относительного донного давления в зависимости от относительного расхода, $M_1 = 2.5$: 1 – горение водорода, вдув через круглое отверстие; 2 – горение водорода, вдув через пористую трубку



Фиг. 6. Изменение относительного коэффициента донного сопротивления в зависимости от относительного расхода: 1 – $M_1 = 2.5$, горение водорода, вдув через круглое отверстие; 2 – $M_1 = 2.5$, горение водорода, вдув через пористую трубку; 3 – $M_1 = 3.0$, вдув продуктов сгорания пиротехнических составов, насадок 12



Фиг. 7. Влияние различных способов вдува на снижение донного сопротивления: 1 – $M_1 = 3.0-3.2$; 2 – $M_1 = 1.66-1.7$; 3 – $M_1 = 1.15-1.3$ – вдув через круглое отверстие в донном торце, насадок 6 для 1–3; 4 – $M_1 = 3.1$, насадок 9; 5 – $M_1 = 1.66-1.7$, насадок 10; 6 – $M_1 = 3.0$, насадок 11; 7 – $M_1 = 3.0$, насадок 12; 8 – граница предельного уменьшения донного сопротивления

сопротивление при $G_{0c} = 1$ имеет минимум, при этом минимальное значение падает с уменьшением числа Маха. Так, для $M_1 = 1.15-1.3$ эта величина составляет 15%, а для $M_1 = 3.0-3.2$ – 38%. Таким образом, с уменьшением числа Маха возможности снижения донного сопротивления за счет вдува продуктов сгорания пиротехнических составов через центральное отверстие уменьшаются.

Представляет интерес определение граничной кривой, отражающей предельные возможности уменьшения донного сопротивления тел вращения без существенной перестройки течения в ближнем следе. Эта граница в первом приближении может быть указана исходя из следующих предположений.

Форма границы имеет параболический характер, что следует из параболического вида кривых $X_{bc} = f(G_{0c}, M_1)$ (фиг. 7).

Линия предполагаемой границы должна проходить через точки с координатами: $G_{0c} = 0, X_{bc} = 1$ и $G_{0c} = 1, X_{bc} = 0$.

Форма границы не зависит от числа Маха потока. В этих предположениях наиболее простой искомой границей является парабола, описываемая уравнением $X_{bc} = (G_{0c} - 1)^2$, имеющая минимум при $G_{0c} = 1$ (фиг. 7, кривая 8).

Из анализа графической информации, представленной на фиг. 7, следует, что все опытные данные, полученные в исследованиях традиционного способа снижения донного сопротивления (вдува продуктов сгорания пиротехнических составов через расположенные на донном торце единичное или несколько отверстий, насадки 6 и 7, фиг. 2), и проведенные по ним осредненные кривые 1–3 лежат выше границы 8 (фиг. 7). При этом ни в одном из случаев не было обнаружено полной ликвидации

донного сопротивления. На том же графике представлены в виде отдельных точек величины эффективности различных способов вдува, реализованных за счет применения донных насадок 8–12, позволяющих осуществить дискретный вдув в различные области ближнего следа. Получено, что во всех случаях происходит значительное уменьшение донного сопротивления по сравнению с вдувом через насадки 6, 7, однако ни в одном из них не удалось достичь предельной границы снижения донного сопротивления, что свидетельствует о наличии в ближнем следе присоединенной зоны отрыва.

Заключение. Проведенными исследованиями влияния тепломассоподвода и горения на донное давление и донное сопротивление тел вращения установлено, что эффективность процесса тепломассоподвода значительно возрастает за счет его распределения по длине ближнего следа. Предложены и реализованы нетрадиционные способы тепломассоподвода путем применения пористой трубки и ступенчатого донного элемента, позволивших обеспечить распределенный (водород) и дискретный (продукты сгорания пиротехнических составов) законы вдува в ближайшем следе. Получено, что в этих случаях за донным срезом исчезает зона отрыва, а донное сопротивление устраняется полностью. На основе экспериментальных данных по вдуву в донную область продуктов сгорания пиротехнических составов предложена зависимость для описания предельной границы снижения донного сопротивления тел вращения при различных способах вдува продуктов сгорания.

Работа выполнена при поддержке ФЦП "Интеграция" и РФФИ (№ 99-01-01214).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Strahle W.C., Hubbart J.E., Walterick R.* Base burning performance at Mach 3 // *AJAA Journal*. 1982. V. 20. № 7. P. 986–991.
2. *Баев В.К., Головичев В.И., Третьяков П.К. и др.* Горение в сверхзвуковом потоке. Новосибирск: Наука, 1984. 304 с.
3. *Глаголев А.И., Зубков А.И., Гаранин А.Ф. и др.* Влияние тепло- и массоподвода на донное давление тел вращения при сверхзвуковых скоростях // *Физика горения и взрыва*. 1996. Т. 32. № 3. С. 107–112.
4. *Глаголев А.И., Зубков А.И., Сухановская Л.Д.* Влияние расположения области тепломассоподвода в ближнем следе тела вращения на его донное давление и сопротивление // *Физика горения и взрыва*. 2000. Т. 36. № 4. С. 23–30.
5. *Шидловский А.А.* Основы пиротехники. М.: Машиностроение, 1973. 320 с.
6. *Schadow K.C., Chieze D.J.* Experimental study on base drag reduction with combined lateral and axial injection // *AIAA Journal*. 1978. V. 16. № 10. P. 1084–1089.
7. *Neale D.H., Hubbart J.E., Struhle W.C.* Effects of axial and radial air injection on the near wake with and without external compression // *AIAA Journal*. 1979. V. 17. № 3. P. 301–303.
8. *Чжен П.К.* Отрывные течения. Ч. 3. М.: Мир, 1973, 333 с.
9. Исследование течений с подводом тепла вблизи внешней поверхности летательного аппарата // *ЦАГИ. Обзоры*. 1982. № 617. 290 с.

Москва

Поступила в редакцию
16.V.2001