

УДК 533.6.011.72

## ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ ТЕПЛОПОДВОДА В ДОННУЮ ОБЛАСТЬ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ

© 2011 г.

*И.К. Ермолаев, А.И. Зубков, Л.Д. Сухановская*

НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

ermolaev19@yandex.ru

*Поступила в редакцию 16.05.2011*

Приводятся результаты экспериментальных исследований влияния теплоподвода на повышение донного давления (снижение донного сопротивления) при сверх- и гиперзвуковых скоростях. Рассмотрены различные способы теплоподвода за счет горения безгазовых пиротехнических составов и тепловыделяющих элементов. Предложен способ охлаждения головных частей летательных аппаратов и нагрева их донной части путем использования эффекта тепловой трубки.

*Ключевые слова:* гипер- и сверхзвуковой поток, тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ), донное давление, теплоподвод, тепловая трубка.

Задача снижения аэродинамического сопротивления вряд ли когда-либо потеряет свою актуальность. В НИИМ МГУ в течение многих лет проводятся экспериментальные исследования в этом направлении, в частности по снижению донного сопротивления тел вращения, движущихся со сверх- и гиперзвуковыми скоростями. Исследованы способы воздействия на физическую картину течения в донной области за счет тепломассоподвода, представляющие фундаментальный и прикладной интерес и влияющие на величину донного давления (донного сопротивления). Анализ особенностей обтекания тел вращения с тепломассоподводом, ранее изученных в [2], показывает, что для более детального проникновения в физическую сущность этих процессов и повышения их эффективности представляет интерес оценка роли только теплоподвода.

Рассматривается возможность повышения донного давления (и снижения донного сопротивления) за счет теплоподвода в донную область тел вращения. С этой целью исследованы два типа тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), используемых в донных теплогенераторах (ДТГ), на основе безгазовых пиротехнических составов (ПС) и высокотемпературной проводящей карбид-кремниевой керамики.

Принципиальное отличие этих двух типов ТВЭЛов состоит в том, что для безгазового ПС температурный фронт горения двигается от донного торца модели вниз по потоку в область ближнего следа, в то время как ТВЭЛ из проводящей карбид-кремниевой керамики нагре-

вается по всей длине.

Экспериментальные исследования проводились на сверхзвуковой установке А-3 НИИ механики МГУ [1] при числе Маха  $M = 3$ . Рассмотрены различные способы теплоподвода за счет горения безгазового ПС (температура горения  $\sim 3150$  °С). Модель ДТГ для исследования безгазовых ПС представляла комбинацию затупленного конуса и цилиндра (рис. 1).

Кормовая часть модели имела цилиндрическую полость для размещения в ней ДТГ и специальный стыковочный узел со стержнем, который служил для крепления ТВЭЛов (безгазовые ПС). Подвод тепла на различных участках поверхности модели осуществлен за счет горения специально изготовленных образцов безгазового ПС. После завершения процесса горения образец безгазового ПС сохраняет свою форму и характерные геометрические размеры, при этом конечный вес образца составляет 97–99% от первоначального. Способ, при котором тепло подводится непосредственно в ближний след (рис. 1а), позволяет снизить донное сопротивление тела при относительно меньшем подводе тепла, чем в пограничный слой (рис. 1б). Максимальный эффект снижения донного сопротивления составляет  $\sim 18\%$ .

Дальнейшее изучение роли теплоподвода в повышении донного давления (уменьшении донного сопротивления) – выяснение влияния теплоподвода по всей длине донной области тела вращения и постоянного во времени, создаваемого ТВЭЛом на основе высокотемпературной электропроводящей карбид-кремниевой кера-

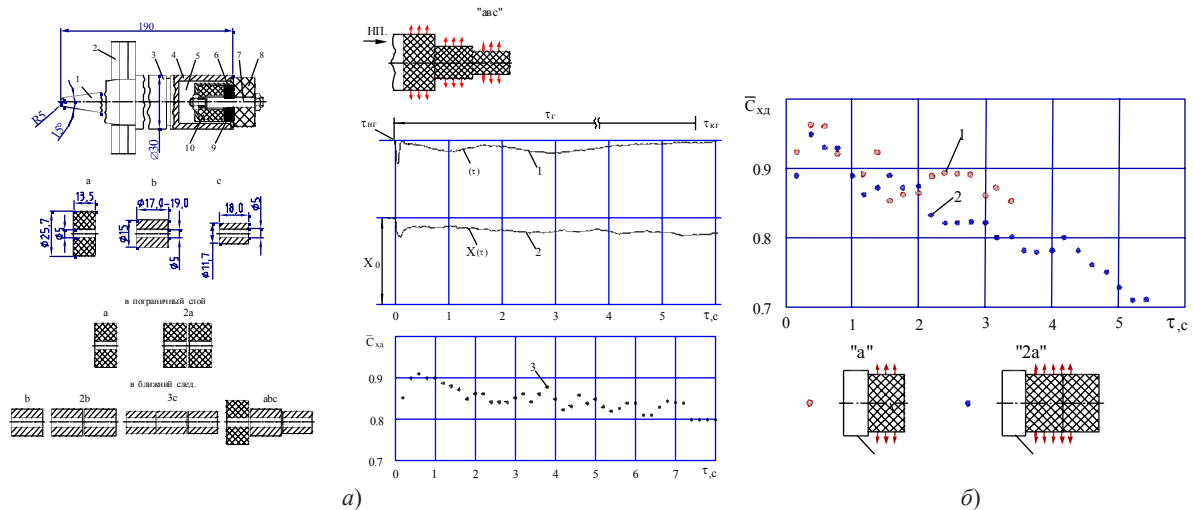


Рис. 1

мики, на его донное давление в сверхзвуковом потоке. Для этих целей создан стенд со специальным блоком электропитания для плавного регулирования температуры ТВЭЛ ( $> 2000$  °С). Исследования проведены на аэродинамической установке А-3 при числе Маха  $M = 3.0$ .

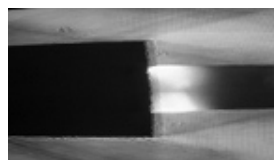
На рис. 2а показана модель с диаметром мидаля 55 мм, состоящая из головного конуса с полууглом  $25^\circ$  и цилиндрической части, общее удлинение модели  $\lambda = 5$ . На рисунке показано также: б) ТВЭЛ с вольфрамовым покрытием; в) ТВЭЛ с вольфрамовым покрытием и кормовым отражателем теплового излучения в донной области.

мовым покрытием, установленные на модель с кормовым отражателем, увеличивают донное давление до 60%. Введение в донную область раскаленных частиц вольфрама значительно увеличивает донное давление.

Проведены исследования на гиперзвуковой установке ГАУ [1] при числе Маха  $M = 6$  ДТГ с установленными на торце отражателями, имеющими форму обратного конуса с различным конструктивным оформлением (поперечные, продольные щели, без щелей) и с карбид-кремниевыми ТВЭЛами (до 2100 °С).



а)



б)



в)

Рис. 2

В торце тела вращения устанавливались ТВЭЛы. Максимально допустимая температура для этого материала – 1800 °С. При температуре нагрева ТВЭЛ на основе карбид-кремниевой керамики до 1000 °С достигнуто увеличение донного давления ~ на 16%. Сравнение ДТГ с безгазовыми ПС и с карбид-кремниевыми ТВЭЛами показало, что подвод тепла за счет карбид-кремниевых ТВЭЛов позволяет повысить донное давление за телом вращения на те же 16–18%, но при значительно меньших температурах, чем при теплоподводе за счет горения безгазового ПС. Следовательно, карбид-кремниевые ТВЭЛы более рационально используют энергетические ресурсы теплоподвода. Показано, что ТВЭЛы с вольфра-

Показано, что ДТГ с отражателями с поперечными щелями позволяют увеличивать донное давление ~ на 17%, в то время как без отражателя ~ на 4%. Установлено, что роль теплового фактора в общем уровне снижения донного сопротивления тел вращения составляет ~45% и имеет существенное значение для снижения донного сопротивления.

Исследован способ повышения донного давления (снижения донного сопротивления) с помощью эффекта герметичной теплоизолированной по длине и не теплоизолированными торцами тепловой трубки, размещенной внутри тела вращения. При этом тепло от теплонапряженной головной части передается в донную часть за счет на-

грева металлического теплоносителя (например, цинка), который испаряется в головной части и конденсируется в донной части, что приводит к нагреву донного торца и повышению донного давления, а также снижает тепловой поток к головной части тела вращения. Также установлено, что при числе Маха  $M = 3$  использование тепловой трубки за счет нагрева дна и выброса паров цинка в донную область позволяет увеличить донное давление ~ на 70% (для одной из разработанных моделей с тепловой трубкой).

Результаты исследований показали, что реализация для тел вращения различных конструктивных и газодинамических схем, а также различных типов источников теплоподвода, может обеспечить снижение донного сопротивления от 15 до 60%. Данные исследования показали также, что существуют резервы сниже-

ния донного сопротивления как за счет совершенствования газодинамических схем, так и за счет улучшения энергетических, расходных характеристик ПС и ТВЭЛов.

Результаты могут быть использованы при разработке новых образцов ракетно-космической техники, а выбор их конструктивной схемы будет зависеть от круга решаемых прикладных задач.

#### *Список литературы*

1. Аэродинамические установки Института механики МГУ: Сб. М.: МГУ, 1985.
2. Глаголев А.И., Зубков А.И., Сухановская Л.Д. Влияние расположения области теплоподвода в ближнем следе тела вращения на его донное давление и сопротивление // Физика горения взрыва. 2000. Т. 36, №4. С. 23–30.

### **GASDYNAMIC AND CONSTRUCTIVE SCHEMES OF THE HEAT TRANSFER INTO THE BOTTOM REGION OF THE BODIES OF REVOLUTION**

*I.K. Ermolaev, A.I. Zubkov, L.D. Sukhanovskaya*

The results of the experimental study of the influence of heat transfer on the increase of the bottom pressure (reduction of bottom resistance) at supersonic and hypersonic speeds are presented. Different ways of heat transfer due to combustion of gasless pyrotechnic compositions and fuel elements are considered. It is shown, that fuel elements with the tungsten coating mounted on the model with a fodder reflector, increase the bottom pressure by up to 60%. A method of cooling the head parts of aircraft and of heating their bottom part using the effect of the heat tube is proposed.

*Keywords:* hypersonic and supersonic stream, a fuel elements (HSEL), a base pressure, heat transfer, heat tube.