

ВЛИЯНИЕ ИНЖЕКЦИИ СТРУЙ БЛОЧНОЙ ТОРМОЗНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ НА ДОННОЕ ДАВЛЕНИЕ ЗА СПУСКАЕМЫМ АППАРАТОМ

А.Ю. Луценко

ФГБОУ высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия

Проведены экспериментальные и численные исследования влияния инъекции струй блочной тормозной двигательной установки на донное давление за спускаемым аппаратом (СА) при транс- и сверхзвуковых скоростях набегающего потока. По результатам численного моделирования в пакете Solid Works Flow Simulation получены эпюры донного давления за СА при отсутствии инъекции и при инъекции трех блочных струй. Построенные картины распределения давления и скорости сравнивались с тепловыми фотографиями из эксперимента. Получены качественно верные структуры обтекания СА и инжектируемой струи и удовлетворительное совпадение осредненного донного давления.

Ключевые слова: спускаемый аппарат, транс- сверхзвуковой поток, тормозная двигательная установка, блочная инъекция, донное давление, SolidWorks Flow Simulation.

Введение

Внешний поток, обтекающий тело вращения, стекая с его поверхности в кормовой части, увлекает, эжектирует воздух из донной области. В итоге за донным срезом тела вращения образуется разрежение, которое обуславливает существенную часть сопротивления тела, называемую донным сопротивлением. Донное сопротивление тела вращения может достигать 30% полного сопротивления. Поэтому оценки величины сопротивления фюзеляжа или корпуса летательного аппарата невозможны без знания величины донного давления. Таким образом, актуальной является задача увеличения донного давления с целью снижения этого сопротивления. Исследованию донного давления и способам его уменьшения за телами вращения посвящено немало работ [1-5], однако влияние струй ТДУ на изменение величины донного давления изучено недостаточно. Настоящая работа написана в продолжение исследований автора, опубликованных в [6-8].

Экспериментальные исследования

Характер обтекания сегментально-конических тел является весьма сложным, так как связан с наличием смешанных (дозвуковых и сверхзвуковых) зон течения и областей отрыва. Инжектируемые струи меняют структуру обтекания СА и способствуют перераспределению давления как на лобовой, так и на боковой поверхностях моделей.

Были проведены экспериментальные исследования инъекции струй блочной тормозной двигательной установки для различных конструкций моделей с блочным выдувом с лобовой поверхности (рисунок 1).

Испытания проводились в диапазонах чисел Маха набегающего потока $M_\infty = 0,8; 1,2; 2,02; 4,04$, углов атаки $\alpha = 0 \dots 16^\circ$, полного давления струи $p_{0j} = 0 \dots 6$ МПа. Основные геометрические параметры моделей представлены в таблице 1.

Таблица 1. Геометрические параметры экспериментальных моделей

№ модели	1	2	3	4	5	6	7	8	9
N	6	6	6	5	6	3	12	3	3
M_j	1,0	1,0	1,0	1,0	3,4	1,0	1,0	1,0	1,0
$\bar{d}_* \cdot 10^2$	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	3,59	5,13
φ_j , град	0	7	17	0	0	0	0	0	0

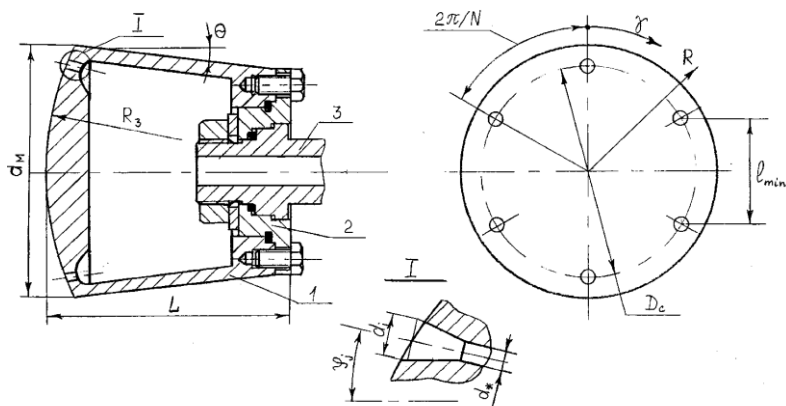


Рисунок 1. Конструкция модели с блочным вдувом с лобовой поверхности

В экспериментах варьировались следующие параметры: количество сопел $N = 3...12$, диаметр их критического сечения $\bar{d}_* = d_*/d_m = 0,0256...0,0513$, угол между направлением вдува струи и продольной осью модели $\varphi_j = 0... 17^\circ$. Число Маха на срезе сопел соответствовало $M_j = 1,0$ и $3,4$. Обратный полуугол конуса у всех моделей был неизменным и равным $\theta = 7^\circ$. Радиус затупления сферического сегмента $\bar{R}_3 = 2 R_3 / d_m \approx 2,36$, где диаметр миделевого сечения $d_m = 78 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Разнос сопел у всех моделей одинаков и равен $\bar{D}_c = D_c / d_m = 0,85$. Относительная длина модели $\bar{L} = L / d_m \approx 0,974$.

Проведенные исследования позволили выявить детальные картины течения для рассмотренных режимов взаимодействия потоков, классифицировать возможные физические структуры обтекания, получить аэродинамические коэффициенты, а также определить влияние на эти характеристики конструктивных параметров блочной тормозной двигательной установки (ТДУ), чисел Маха потока M_∞ и струи M_j , угла атаки, интенсивности вдува и относительного массового расхода струй. Результаты этих исследований приведены в работах [6-8].

На основе обработки экспериментально полученного осредненного донного давления проанализировано влияние инъекции струй блочной ТДУ на величину донного давления за СА. Были построены зависимости коэффициентов донного давления $\bar{p}_d = \frac{p_d - p_\infty}{q_\infty}$ от углов атаки, чисел Маха, интенсивности выдува струй для различных моделей, некоторые из которых представлены на рисунке 2.

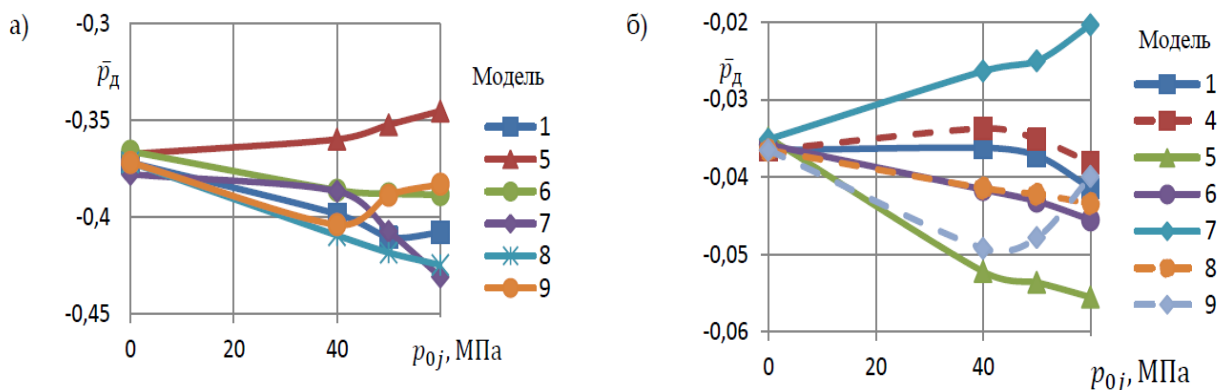


Рисунок 2. Графики зависимостей коэффициента донного давления от интенсивности выдува ($\alpha = 0$) для моделей 1 – 9: а) $M_\infty=0,8$ б) $M_\infty=4,04$

Видно, что при увеличении количества сопел меняется характер зависимостей донного давления. Характерные графики изменения донного давления при трансзвуковой скорости

набегающего потока при нулевом угле атаки представлены на рисунке 2,а. Видно, что при звуковой инжекции (модели 1, 6 – 9) происходит снижение донного давления, что связано с присоединением струй на кормовой поверхности СА вблизи точки излома образующей и с возрастанием местной скорости течения у кормового среза моделей за счет смешения газа инжектируемых струй с внешним потоком. Сверхзвуковые струи глубже проникают в набегающий поток, поэтому область возмущенного течения у поверхности СА становится больше в поперечном направлении, что приводит к уменьшению угла разворота внешнего потока в донном следе, а, следовательно, к возрастанию донного давления (модель 5).

При сверхзвуковых скоростях набегающего потока (рисунке 2, б) на режиме малоинтенсивного автономного истечения донное давление снижается за счет увеличения угла разворота внешнего потока в донной области (модели 1, 4, 6, 8). При выдуве большого количества струй, либо их большой интенсивности, и реализации режима локального взаимодействия газовое кольцо смыкается в кормовой части модели в единую газовую пелену, что меняет условия течения в донной области, она расширяется, донное давление возрастает (модели 7, 9). Инжекция сверхзвуковых струй в сверхзвуковой набегающий поток не приводит к столь существенному расширению в поперечном направлении возмущенной области течения, как на трансзвуке, поэтому донное давление с ростом интенсивности вдува падает, причем даже сильнее, чем при инжекции соответствующего количества звуковых струй (модель 5).

Численное моделирование. Произведен расчет обтекания моделей СА транс- и сверхзвуковым потоком в пакете Solid Works Flow Simulation в отсутствии и при наличии инжекции струй. Численное моделирование инжекции исследовано для выдува 3-х струй на базе модели № 6 из эксперимента. Расчетная область представляла собой параллелепипед, в центре которого расположена исследуемая модель. Расчетная сетка была адаптивная и менялась в зависимости от числа Маха и характера распространения возмущений. В окрестности сопел инжекции строилось три дополнительные локальные сетки с высоким уровнем дробления. Число ячеек составляло порядка 2 500 000.

По результатам моделирования были получены картины распределения давления и скорости. Все картины сравнивались с тепловыми фотографиями из эксперимента для оценки адекватности полученного решения.

Полученная сетка позволяет увидеть в сечении выдув струи навстречу потоку и взаимодействие с ним. Струя имеет бочкообразную форму, которая искривляется при взаимодействии со встречным набегающим потоком тем сильнее, чем больше его число Маха (рисунок 3).

Картины течения соответствуют малоинтенсивному автономному истечению [6-7]. Струи, отклоняясь во внешнюю сторону, не взаимодействуют между собой до встречи с набегающим потоком, длина бочки струи меньше величины отхода скачка уплотнения. Его отход несколько увеличивается. Лобовая поверхность СА в основном обтекается газом внешнего потока, проходящего через прямой скачок уплотнения. Вблизи сопел инжекции образуются локальные зоны отрывного течения с повышенным давлением перед струями и пониженным за ними соответственно.

За счет несимметричности обтекания (при наличии угла атаки) происходит дополнительная деформация струи, приводящая к искривлению ее оси, изменению условия присоединения и течения в циркуляционной зоне.

Правда, размеры инжектируемой струи в численном расчете оказываются больше, чем на тепловых фотографиях из эксперимента. Однако это не сказывается на интегральных аэродинамических характеристиках и на величине осредненного донного давления.

По полученным эпюрам давлений были найдены осредненные значения коэффициента донного давления \bar{p}_d и относительного донного давления $\bar{p}_d = p_d/p_\infty$, которые сравнивались с экспериментальными значениями (рисунок 4).

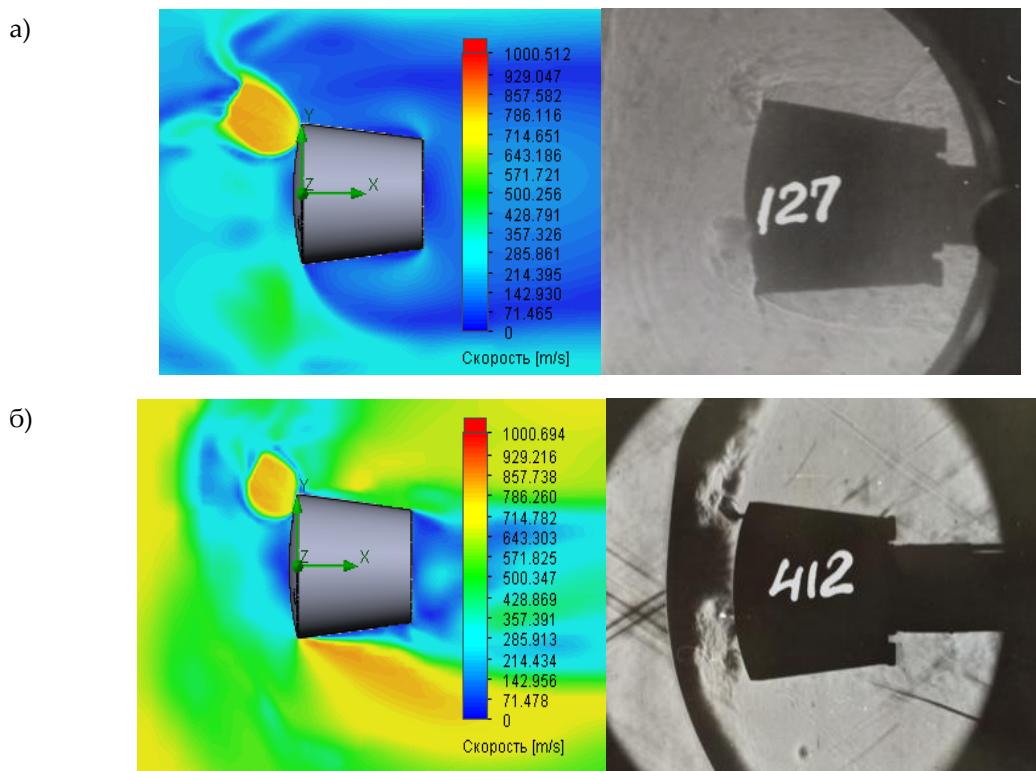


Рисунок 3. Структуры течения при численном и экспериментальном моделировании при $p_{0j} = 50$ МПа, $\alpha=0$: а) $M_\infty=1,2$; б) $M_\infty=2,02$

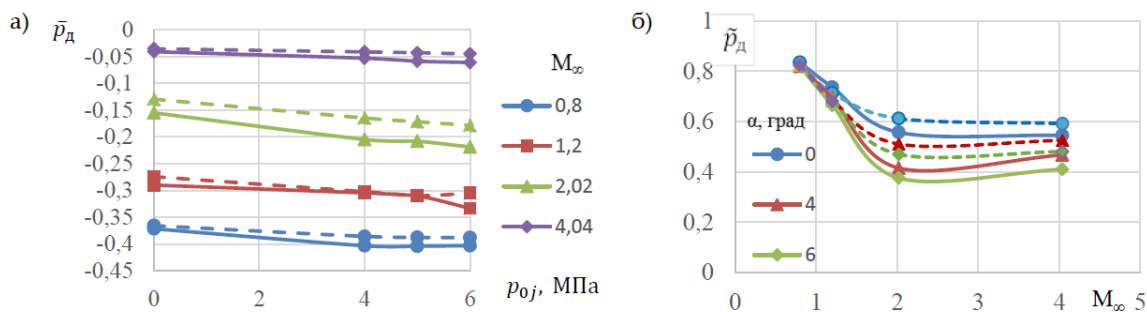


Рисунок 4. Сравнение расчетного (—) донного давления с экспериментальными данными (---): а) зависимость \bar{p}_d от интенсивности инъекции, $\alpha = 0$; в) зависимость \tilde{p}_d от числа Маха, $p_{0j} = 0$

С ростом интенсивности инжектируемых струй для рассматриваемой компоновки с тремя звуковыми соплами донное давление во всем диапазоне исследованных скоростей незначительно уменьшается (рисунок 4, а).

Зависимость относительного донного давления \tilde{p}_d от числа Маха для различных интенсивностей инъекции представлена на рисунок 4, б. Как уже было замечено ранее, донное давление с ростом числа Маха и интенсивности инъекции уменьшается.

Из графиков рисунка 4, б также видно, что угол атаки незначительно влияет на величину коэффициента \tilde{p}_d при трансзвуковых скоростях и приводит к росту уменьшению \tilde{p}_d при сверхзвуковой скорости.

Результаты численных расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментальными (10 – 15 %). Расхождение результатов является следствием влияния на течение в донной области поддерживающих устройств [3].

Выводы

Таким образом, проведен комплекс экспериментальных и численных исследований влияния инъекции струй блочной ТДУ, истекающих с лобовой поверхности СА во встречный транс- и сверхзвуковой поток. Определены закономерности изменения донного давления за СА при различных конструктивных параметрах СА, ТДУ и режимах истечения струй.

Полученные результаты показали, что малоинтенсивная инъекция струй, как правило, приводит к уменьшению донного давления. При инъекции большого количества высоконапорных струй возможно незначительное повышение донного давления.

Расчеты, проведенные в пакете Solid Works Flow Simulation, показали хорошее совпадение измеренных и посчитанных осредненных значений донного давления и качественное совпадение структуры истекающих встречных струй.

Список литературы

1. 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.
2. Запрягаев В. И., Локотко А. В., Особенности донных течений на многоструйной компоновке. Вестник ПНИПУ «Аэрокосмическая техника», 2016, №45, С. 193-206.
3. Сидняев Н. И., Исследование влияния поддерживающих устройств на донное давление моделей сверхзвуковых летательных аппаратов. МГТУ им. Н. Э. Баумана, письма в ЖТФ, 2013, т. 39, вып. 8, С. 17-23.
4. Гордеева Н.М. О задаче течения в донной области сверхзвуковых тел. Инженерный журнал: наука и инновации, 2015, вып. 2. URL: <http://engjournal.ru/catalog/arise/ahttp/1363.html>
5. Засухин О.Н., Булат П.В., Продан Н.В, История экспериментальных исследований донного давления. «Фундаментальные исследования», 2011, т.12, С. 670-674.
6. Калугин В.Т., Луценко А.Ю. Экспериментальные исследования обтекания спускаемых аппаратов при струйном управлении аэродинамическими характеристиками // Изв. РАН. Сер. МЖТ. – 1996. – № 3. С. 71-87
7. Луценко А.Ю., Назарова Д.К. Экспериментальное и численное моделирование обтекания спускаемого аппарата в трансзвуковом потоке при отсутствии и наличии блочного струйного торможения. Электронный научно-технический журнал «Инженерный вестник», 2014. № 12, С. 168-177. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/750279.html>
8. Луценко А.Ю., Назарова Д.К. Аэродинамические характеристики возвращаемого аппарата с работающей тормозной двигательной установкой при транс- и сверхзвуковом обтекании. Электронный научно-технический журнал «Инженерный журнал: наука и инновации». 2015. № 5 (41) URL: <http://engjournal.ru/catalog/arise/ahttp/1397.html>.

ЗАЩИЩАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ КЕРАМИЧЕСКОГО СЛОЯ ЛЕГКОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ БРОНИ ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОД УГЛОМ

И.Ф. Кобылкин, А.А. Горбатенко

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Введение

Комбинированная броня, состоящая из лицевого керамического и тыльного энергоемкого металлического или композитного органопластикового слоев, является весьма эффективной защитой от действия бронебойных пуль, обладающих высокой проникающей способностью.