

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОБТЕКАНИЮ МОДЕЛЕЙ В ГИПЕРЗВУКОВОЙ УДАРНОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

М.А. Котов, Л.Б. Рулева, С.И. Солодовников, С.Т. Суржигов

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук,
Россия, Москва, 119526, проспект Вернадского, д.101-1*

Аннотация

Продолжены эксперименты по обтеканию моделей летательных аппаратов газовыми потоками в гиперзвуковой ударной аэродинамической трубе. Представлены картины обтекания моделей различных конструкций.

CARRYING OUT EXPERIMENTS OF MODELS STREAMLINES IN HYPERSONIC SHOCK AERODYNAMIC TUBE

M.A. Kotov, L.B. Ruleva, S.I. Solodovnikov, S.T. Surzhikov

Institute for Problems in Mechanics Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow, 119526

Experiments of gas currents streamlines for flying objects models in hypersonic shock aerodynamic tube are proceeded. Streamlines of different patterns of models are displayed.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящей статье представлены результаты экспериментальных работ по исследованию обтекания моделей летательных аппаратов (ЛА) на гиперзвуковой ударной аэродинамической трубе (ГУАТ) в лаборатории радиационной газовой динамики в Институте проблем механики РАН (фотография на рис.1.)



Рис.1. Схема ГУАТ

Эти эксперименты явились продолжением предыдущих экспериментов, описанных в [1,2].

Технические возможности современного экспериментального оборудования, приведенные ниже, позволяют расширить круг решаемых задач и улучшить качество экспериментальных данных. Это можно наблюдать по представленным фото из видеоряда, при визуализации исследуемых процессов с помощью видеокамеры Photron Fastcam 1024 PC, вместо фотоаппарата.

В настоящей статье рассмотрены технологические особенности проведения экспериментов на ГУАТ, приведены экспериментальные данные по обтеканию моделей некоторых сложных форм. Получены высокие числа Маха ($M=7$) на моделях при обтекании их воздушными и гелиевыми потоками.

2. УСТАНОВКА ГУАТ ИПМЕХ РАН

2.1. Функциональная схема установки ИПМех РАН

Гиперзвуковая ударная аэродинамическая труба (ГУАТ) ИПМех РАН, изображенная на фото (рис.1), имеет общую длину 14.5 м., внутренний диаметр КВД и КНД, равный 80 мм, диаметр ресивера – 500 мм. Подробно конструкция ГУАТ ИПМех РАН описана в [1].

Техническое оборудование ГУАТ было дополнено, описанными в [1], новыми приборами, устройствами и датчиками. Функциональная схема гиперзвуковой ударной аэродинамической трубы ИПМех РАН изображена на рис.2.

2.2. Дополнительное оборудование ГУАТ

Герметичность соединений конструкции ГУАТ контролировалась малогабаритным течеискателем нового поколения МС-3, диапазон работы которого составляет от 1 бар до 5×10^{-13} мбар. Он содержит форвакуумный и турбомолекулярный безмасляные насосы, масс-спектрограф, вакуумметр с графическим дисплеем, автоматические системы управления переключением.

чением с одного насоса на другой, клапаном стравливания турбомолекулярного насоса, пультом дистанционного управления. Течеискатель имеет дистанционный пульт, который сигнализирует о месте течи с параметрами, установленными на основном блоке. Этот факт позволяет повысить мобильность и скорость обнаружения течи.

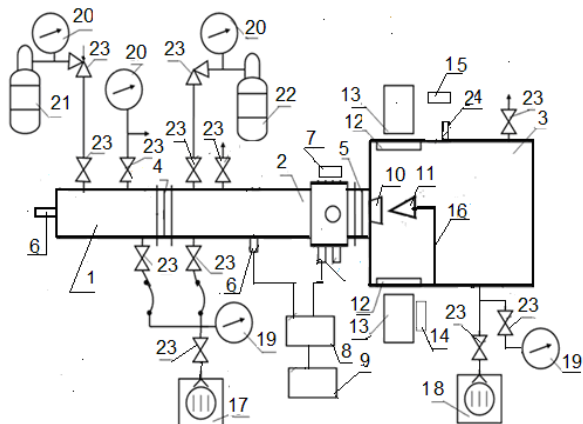


Рис.2. Функциональная схема ГУАТ: 1 – камера высокого давления (КВД); 2 – камера низкого давления (КНД); 3 – вакуумный блок (ресивер); 4,5 - мембраны; 6 – пьезодатчики; 7-спектрометр; 8 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 9 - компьютер; 10 - сопло; 11 - модель; 12 - съемные окна; 13 - оптическое устройство (теплер); 14 - видеокамера; 15 – осветитель теплера; 16 - кронштейн; 17,18 - высоковакуумные откачные посты; 19 - вакуумные датчики; 20 - манометры; 21, 22 -баллоны с толкающим и рабочим газами; 23 - краны, редукторы, шиберы; 24 - клеммы датчиков модели.

Герметичность ГУАТ обусловлена конструкцией трубы, уплотнителем (вакуумной резиной), быстродействием и глубиной откачки вакуумных насосов, а также оперативностью работы персонала по инициации ударной волны.

Крупногабаритная установка ГУАТ проверяется методом обдува (гелием). В рассматриваемой компоновке ГУАТ герметичность, выраженная в натекании, составляет 10^{-3} мбар/мин. и может быть повышена при полной замене всех уплотнителей. Фото течеискателя МС-3 приведено на рис.3.



Рис.3. Течеискатель МС-3

Видеорегистратором процессов обтекания моделей в [1] служил фотоаппарат Casio Exilim Pro Ex-F1,

имеющий функцию видеосъемки с частотой 1200 кадров/с. В настоящих экспериментах была использована видеокамера (14) Photron Fastcam 1024 PC со светосильным объективом и высокой частотой съемки (до 100000 кадров/с). При повышении частоты съемки, разрешение на кадре снижается. Регистрация процессов обтекания моделей в ГУАТ велась на частоте 2000 кадров /с, разрешение составило 1024×1024 пикселей на кадр. Камера запускалась по сигналу с пьезодатчика КНД.

Видеокамера с системой объективов, теплером ИАБ-451 и блоком осветителя составляет оптическую систему ГУАТ.

Видеокамера, установленная у приемной части теплера ИАБ 451, изображена на фото рис.4.



Рис.4. Видеокамера

Видеокамера имеет светосильный объектив и высокие требования к освещенности при данной скорости съемки. Для мощного и равномерного освещения были испробованы лампы постоянного тока типа КГМ 800 Вт и автомобильная лампа дальнего света. Последняя лампа хорошо себя проявила: не требуется охлаждение вентиляторами. Блок осветителя приведен на рис. 5.



Рис.5. Осветитель.

Для снятия спектральных характеристик в ударной части трубы подготовлен спектрометр Horiba CP-140

(рис. 6), содержащий ПЗС линейку и контроллеры, рассчитанные на измерительные диапазоны: от 240 до 1100 нм.



Рис.6. Спектрометр Horiba CP-140

Наличие теплера (13) в ГУАТ, расположенного перпендикулярно съемным окнам (12), препятствует установке спектрометра для съема спектральных характеристик смесей газов в гиперзвуковом потоке на кромке модели. Для устранения этой технологической проблемы, одну из частей теплера планируется развернуть на 90° и воспользоваться оптическими зеркалами, расщепляющими световой поток на две части, для подачи их на разные регистраторы экспериментального процесса.

Для дистанционного контроля разрыва мембраны был применен электрический манометр (рис. 7.) типа PGT23/063 с аналоговым выходом, имеющий приемлемую линейную градуировочную (нелинейность $\leq 1\%$).



Рис.7. Электрический манометр.

Электронный сенсор прибора автоматически определяет положение оси трубки Бурдона и преобразует ее перемещение от действия давления в пропорциональный выходной электрический сигнал 4...20 мА. Данный сенсор является бесконтактным, поэтому трение не влияет на погрешности измерения и сенсор не изнашивается.

Данный электрический манометр был подключен вместе с пьезодатчиками ГУАТ к АЦП. При подключении был использован калиброванный постоянный резистор 200 Ом, падение напряжение на котором подавалось в АЦП.

В конструкцию КВД ГУАТ был введен дополнительный пьезодатчик, расположенный на противо-

ложном первой мембране торце. Он также был подключен к АЦП. Предполагалось сопоставить статический сигнал с электрического манометра в момент разрыва мембраны с динамическим сигналом дополнительного пьезодатчика. Данная работа будет продолжена при дальнейших экспериментах на ГУАТ.

Для экспериментальных исследований влияния высоковольтного разряда на поверхности модели в гиперзвуковом потоке подготовлен высоковольтный электронный источник питания Spellman SA4. Данное устройство позволяет регулировать напряжение от 0 до 10 кВ и ток от 0 до 400мА и имеет высокую стабильность заданных параметров.(0,01%). Фото источника питания Spellman SA4 приведено на рис. 8.



Рис.8. Источник питания Spellman SA4

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ

3.1. Конструкция моделей

Модели ЛА для исследований были разработаны и изготовлены на экспериментальной базе ИПМех РАН в соответствии с [5]. Вместе с моделями были изготовлены кронштейны для крепления моделей внутри вакуумного блока (ресивера). Часть моделей выполнена из Al, другая - из стали 40X, все образцы шлифованы, а точность фрезеровки лобовой части составила единицы μ к.

В экспериментах на ГУАТ были задействованы следующие конструкции моделей:

1. Плоский Al клин с углом раствора 10° длиной активной части 150 мм. [1].
2. Два Al полуклина с углами раствора 3° , которые были установлены на расстоянии 20 мм друг от друга, при этом наклонные части обращены друг к другу.
3. Система: острый Al клин с углом раствора 10° и Al полуклин с углами раствора 3° . (рис. 9.)



Рис.9. Система: острый Al клин с углом раствора 10° и Al полуклин с углом раствора 3° .

4. Плоский стальной клин с углом раствора 10° длиной активной части 150 мм. (рис. 10)

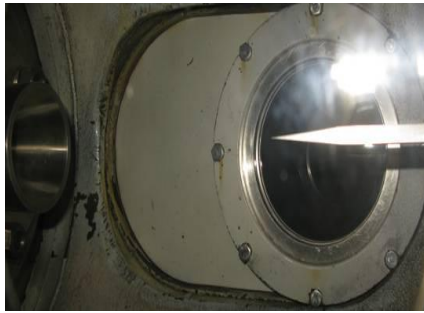


Рис. 10. Плоский стальной клин

- 5. Система: острые стальные два клина
- 6. Система: пара затупленных клиньев (рис. 11)



Рис. 11. Система: пара стальных затупленных клиньев

- 7. Два стальных затупленных клина с вырезом (рис. 12).

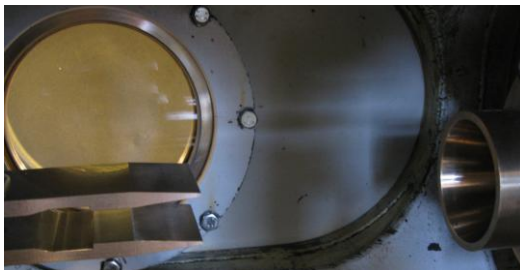


Рис. 12. Два стальных клина с вырезом

3.2. Конструкции кронштейнов для моделей ЛА

Модели (11) для исследования процессов обтекания закреплялись на разработанных кронштейнах.

Первоначальная конструкция ортогонального кронштейна, выполненная из Al, имеет возможность ориентации в месте крепления по трем взаимноперпендикулярным осям с шагом 5 мм.

При высоких числах Маха и влиянии отраженной ударной волны замечена вибрация модели в Al кронштейне. Следующая система кронштейнов была выполнена из стали. На рис.10 изображена стальная модель в стальном кронштейне.

Ориентация моделей в кронштейне должна быть юстирована так, чтобы продольная ось по центру совпадала в исходном состоянии с центром набегающего гиперзвукового потока и была перпендикулярна оптической оси окон и теплера. Эта проблема потребовала дополнительной юстировки всех частей трубы и теплера, а также разработки кронштейна для точной выставки и юстировки. Такая конструкция системы кронштейнов была выполнена с возможностью пере-

мещения модели на 0.5 мм и угол поворота от 0° до 30°.

3.3. Картины обтеканий моделей в ГУАТ

Условия проведения экспериментов на моделях в ГУАТ были следующие. В качестве толкающего и рабочего газов использовался воздух, в некоторых экспериментах применялся гелий (толкающий газ). Типы мембран и конструкция гиперзвукового сопла соответствуют аналогам, описанным в [1].

Режимы давлений P_1 в КВД при разрыве первой мембраны были от 23 до 36 ат. Камера КНД откачивалась до давлений P_2 от 1 до 100 мбар, вакуумный блок (ресивер) откачивался до давлений $P_3 = 10^{-4}$ мбар.

При обтекании системы моделей смесями газов или воздухом наблюдалась картина, запечатленная видеокамерой Photron Fastcam 1024 PC на отрезке времени 10...15 мс. Из этого видеоряда выбраны и показаны ниже фрагменты одной реализации, но в разные текущие моменты времени. Первый фрагмент показывает момент набегания гиперзвукового потока.

По углу прилегания к модели ударной волны можно высчитать число Маха на модели [4]. Следующий фрагмент показывает отраженную волну. Можно наблюдать моменты стационарности и нестационарности процессов.

Клин и полуклин, изображенные на рис.9 имеют картину обтекания, приведенную на фото рис. 13, при этом на фото (а) – показана картина набегания гиперзвуковой волны на модель, а на фото (б) – нестационарное течение при возврате отраженной от торца КВД ударной волны после истечения из сопла.

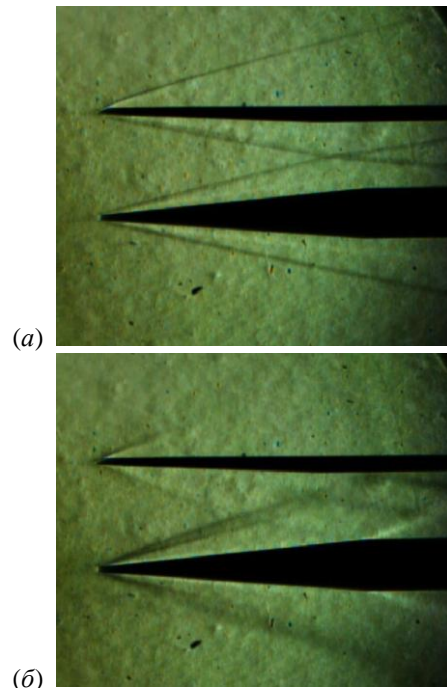


Рис. 13. Картина обтекания Al клина с полуклином: а – набегающая ударная волна, б – отраженная ударная волна

В начале процесса гиперзвукового обтекания фронты ударных волн имеют небольшой угол наклона от поверхности моделей и поток с постоянными параметрами держится несколько миллисекунд. Затем угол

увеличивается и идут ярко выраженные возмущения потока (нестационарные течения), которые потом периодически сменяются квазистационарным процессом обтекания (в экспериментах регистрировались по крайней мере 3 таких периода с продолжительностью не менее 15 мс).

Картина обтекания двух затупленных стальных клиньев приведена на рис. 14, где фото (а), (б), (в) соответствуют разным моментам времени одной реализации процесса.

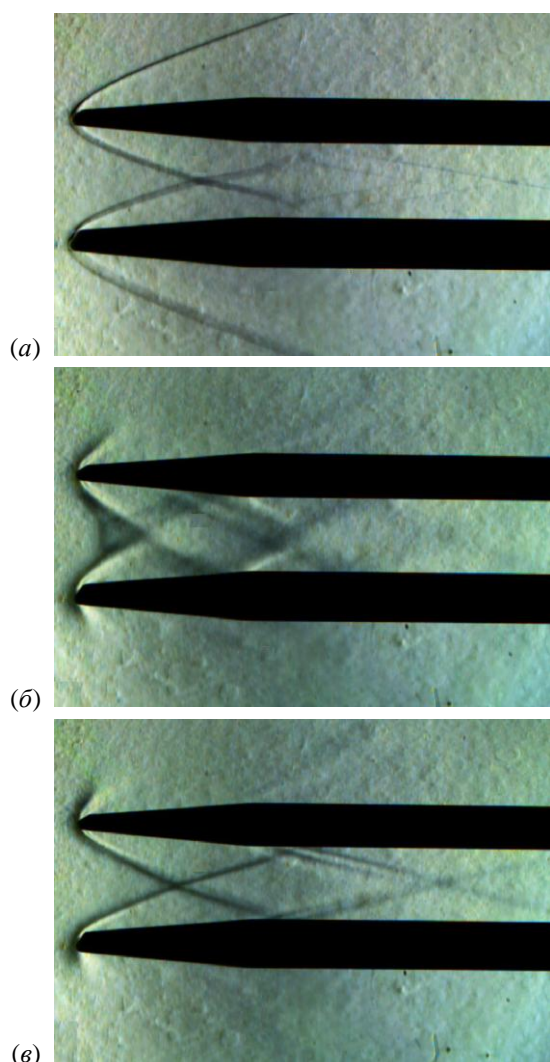


Рис. 14. Теневая видеопоследовательность обтекания двух стальных затупленных клиньев, где (а) – картина набегания гиперзвуковой волны на модель, а на фото (б) – нестационарное течение, (в) – квазистационарное течение

На рис. 15 представлены временные диаграммы давлений, которые были получены с помощью пьезоэлектрических датчиков давления. Здесь верхняя кривая от пьезодатчика, установленного в ударной части установки, средняя – от пьезодатчика, установленного в центре КНД, который является запускаящим для синхронизации работы видеокамеры и датчика у сопла.

Виден этап уплотнения перед входом в сопло, который возникает после отражения ударной волны и длится несколько миллисекунд до прихода контактной поверхности. Далее ударная волна отражается от торца камеры высокого давления, затем идет к соплу и отра-

жается от конца камеры низкого давления. Время отражения увеличивается, сила ударно-волнового взаимодействия ослабевает.

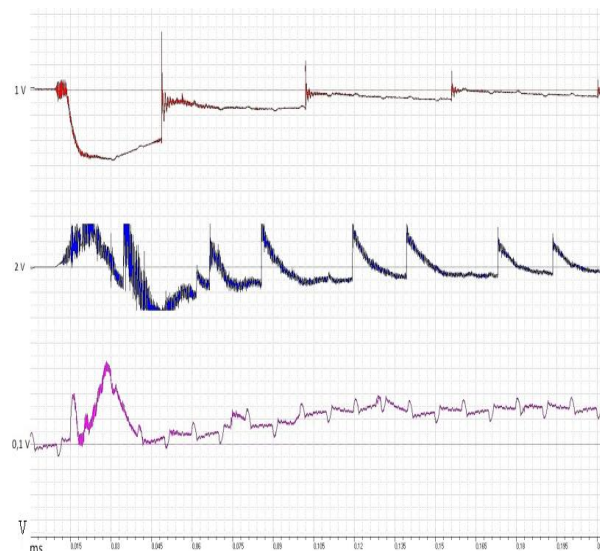


Рис. 15. Осциллограммы датчиков давления (зависимость показаний датчиков в В от времени эксперимента в мс)

Полученные в экспериментах фото обтекания моделей гиперзвуковыми газовыми потоками сравнивались с аналогами в известных изданиях по обтеканию тел [5–7] и результатами теоретических расчетов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отработана технология проведения экспериментов по визуализации обтекания моделей ЛА гиперзвуковыми потоками. Получен четкий видеоряд продолжительностью до 15 мс.

Полученные экспериментальные результаты используются для тестирования вычислительного моделирования ударно-волновых процессов и газодинамических эффектов.

Работа проводилась в рамках программ фундаментальных исследований РАН в области механики гиперзвуковых потоков.

Отработка технологических проблем работы на ГУАТ входит составной частью в учебный процесс на кафедре «Физической и химической механики» МФТИ.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГУАТ — гиперзвуковая ударная аэродинамическая труба;

М — число Маха;

КВД — камера высокого давления;

КНД — камера низкого давления.

P_1 — давление в камере высокого давления, ат;

P_2 — давление в КНД, мбар;

P_3 — давление в ресивере, мбар;

t — время от падающей до отраженной ударной волны перед входом в сопло, мкс;

V — скорость ударной волны перед соплом, м/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котов М.А., Рулева Л.Б., Козлов П.В., Суржиков С.Т. Предварительные экспериментальные исследования обтекания моделей в гиперзвуковой ударной аэродинамической трубе//Сборник трудов АФМ. 2011. С.110–115.
2. Котов М.А., Козлов П.В., Рулева Л.Б., Суржиков С.Т. Экспериментальное исследование нестационарного взаимодействия ударных волн в ударной аэродинамической трубе // Материалы IX международной конференции по неравновесным процессам в струях и соплах (NPNJ 2012), Издательство МАИ, Москва, 2012.
3. Котов М.А., Кузенов В.В., Сыздыков Е.К. Способы геометрического моделирования поверхности перспективных гиперзвуковых аппаратов //Изобретательство, июнь, 2012. С.31–46.
4. Краснов И.Ф., Кошевой В.Н., Данилов, А.Н. и др. Прикладная аэродинамика. М.: Высшая школа, 1974. 732 с.
5. Аэротермодинамика летательных аппаратов в фотографиях / Майкапф Г.И. Жуковский. ЦАГИ. 2003. С.140–141.
6. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. / Баренблат Г.И., Шидловский В.П. М.: Мир, 1986. 184 с.
7. Красильщиков А.П., Гурьяшкин Л.П. Экспериментальные исследования тел вращения в гиперзвуковых потоках. М.: Физмат, 2007. 208 с.