

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБТЕКАНИЯ МОДЕЛЕЙ В ГИПЕРЗВУКОВОЙ УДАРНОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

М.А. Котов¹, Л.Б. Рулева¹, П.В. Козлов^{1,2}, С.Т. Суржиков¹

¹ Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
Москва, 119526, проспект Вернадского 101-1

² НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
Москва, 119192, Мичуринский проспект, 1

Аннотация

Приведены результаты предварительных экспериментов по исследованию обтекания моделей летательных аппаратов газовыми потоками в гиперзвуковой ударной аэродинамической трубе. Представлены картины обтекания в зависимости от конструкций модели, мембранного блока и давлений.

EARLY EXPERIMENTAL RESULTS OF STREAMLINES FOR FLYING OBJECTS MODELS IN HYPERSONIC SHOCK AERODYNAMIC TUBE

M.A. Kotov¹, L.B. Ruleva¹, P.V. Kozlov^{1,2}, S.T. Surzhikov¹

¹ Institute for problems in mechanics RAS, Russia, Moscow, 119526

² Institute of Mechanics, Moscow State University, Russia, Moscow, 119192

Early experimental results of gas currents streamlines for flying objects models in hypersonic shock aerodynamic tube are brought. Streamlines pictures depending on models design, membrane unit and pressure are displayed.

1. ВВЕДЕНИЕ

Численное моделирование и анализ кинетики гиперзвукового обтекания моделей летательных аппаратов сложной геометрии [1, 2] позволяет рассчитать и спрогнозировать воздействие газовых потоков на реальные объекты при гиперзвуковых скоростях. Сравнение расчетных и экспериментальных данных повышает достоверность полученных результатов.

Экспериментальные исследования на гиперзвуковых ударных аэродинамических трубах (ГУАТ) проводятся в крупных мировых научных центрах [3], осуществляя связь теоретической и экспериментальной физики. Это обусловлено потребностями в изучении процессов обтекания частей летательных аппаратов, выполненных по сложной геометрии, потоками смесей газов на гиперзвуковых скоростях. Анализ конструкций ГУАТ по патентным источникам [4] показал наиболее востребованные российские и иностранные схемы, а также современные подходы к техническим решениям. Таким схемным решениям отвечает установка ГУАТ, введенная в эксплуатацию в лаборатории РадГД ИПМех РАН. Данная установка предназначена для экспериментальных исследований по обтеканию моделей летательных аппаратов газовыми потоками за фронтом сильных ударных волн

2. УСТАНОВКА ГУАТ ИПМЕХ РАН

2.1. Схема установки ИПМех РАН

В лаборатории РадГД ИПМех РАН начаты экспериментальные исследования на гиперзвуковой ударной аэродинамической трубе (ГУАТ). Гиперзвуковая ударная аэродинамическая труба (ГУАТ) ИПМех РАН рассчитана на числа Маха, равные $M = 6 \div 12$. Экспе-

риментальная установка имеет общую длину 14 м и внутренний диаметр 80 мм. Установка содержит основные блоки: камеру высокого давления (КВД), камеру низкого давления (КНД) и вакуумный блок-ресивер. Для начальных экспериментов давление в КВД регламентируется Правилами котлонадзора, однако технические возможности установки многократно выше [5]. Вакуумные насосы КНД и ресивера способны произвести откачку на вакуум до 5×10^{-7} и 10^{-10} mbar, соответственно. В ресивере имеются иллюминаторы с окнами, диаметром 200 мм, а также установлено сопло и кронштейны для крепления моделей летательных аппаратов.

Схема гиперзвуковой ударной аэродинамической трубы ИПМех РАН, на которой проводились экспериментальные исследования по обтеканию моделей летательных аппаратов газовыми потоками за фронтом ударных волн, изображена на рис. 1.

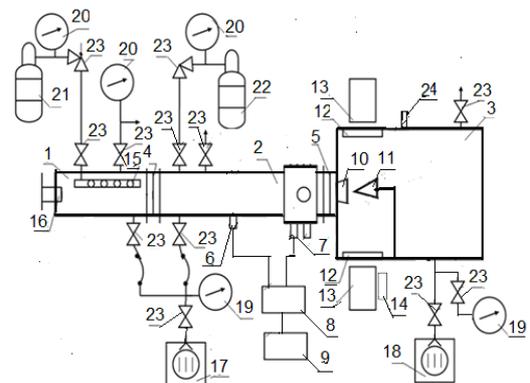


Рис.1. Схема ГУАТ

На рис.1. изображены: 1 – камера высокого давления (КВД); 2 – камера низкого давления (КНД); 3 – ресивер; 4, 5 – мембраны; 6, 7 – пьезодатчики; 8 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 9 – компьютер; 10 – сопло; 11 – модель на кронштейне; 12 – съемные окна; 13 – оптическое устройство (теплер); 14 – видеорегистратор; 15 – распределительная трубка; 16 – пробка; 17, 18 – высоковакуумные откачные посты; 19 – вакуумные датчики; 20 – манометры; 21, 22 – баллоны с толкающим и рабочим газами, соответственно; 23 – краны, редукторы, шиберы; 24 – клеммы датчиков модели.

Установка ГУАТ содержит вакуумный блок – ресивер (3), объем которого 800 л, внутренний диаметр – 500 мм. Это обстоятельство позволяет располагать внутри него модели летательных аппаратов, закрепляемые как к нижней, так и к верхней внутренней поверхности ресивера. В ресивере имеются герметичные электрические выводы (24) для датчиков моделей и устройств, применяемых при экспериментальных исследованиях. Фотография гиперзвуковой ударной аэродинамической трубы (ГУАТ) ИПМех РАН представлена на рис.2.



Рис.2. ГУАТ ИПМех РАН

Камеры высокого давления (1) и низкого давления (2) откачиваются турбомолекулярным откачным постом Ilmvac СДК-180 (17), включающим в себя форвакуумный мембранный насос и высоковакуумный турбомолекулярный насос с автоматическим переключением между ними. Производительность откачного поста Ilmvac СДК-180 составляет 50 л/с, глубина вакуума 5×10^{-7} mbar. Откачной пост показан на рис.3.

Ресивер откачивается турбомолекулярным постом Ilmvac SST551/DryII (18), производительностью 500 л/с с возможной глубиной вакуума 10^{-10} mbar. В качестве форвакуумного насоса служит спиральный вакуумный насос DryII. Откачной пост Ilmvac SST551/DryII изображен на рис.4.

Вакуумметры, Atmion, (19) установлены между камерой и входом вакуумного откачного поста и могут быть отсоединены от последнего вакуумными кранами (23). Диапазон измерения вакуумметра (19) составляет $1000 \div 5 \times 10^{-7}$ mbar. Вакуумметры (19) имеют выносные цифровые электронные дисплеи Atmigraf, как показано на рис.5, а также разъемы подключения к компьютеру.



Рис.3. Откачной пост Ilmvac СДК-180



Рис.4. Откачной пост Ilmvac SST551/DryII



Рис.5. Цифровые электронные дисплеи Atmigraf

Сигналы с пьезодатчиков (6) и (7) записываются на компьютер (9) через 14 разрядный, 10 МГц, АЦП (8).

В АЦП (8) используется специальное программное обеспечение, позволяющее в удобной форме представлять измеренные динамические процессы в требуемых размерностях, ставить метки и производить программируемый запуск средств измерения. Синхронизация записи производится по первичному пьезодатчику (6). Вид АЦП приведен на рис. 6.



Рис.6. Четырехканальный АЦП, 10 МГц

Видеорегистратором (14) процессов обтекания моделей служил фотоаппарат Casio Exilim Pro Ex-F1, имеющий функцию видеосъемки с частотой 1200 кадров/с.

Мембрана (4) изготавливалась из отожженной меди толщинами: 0.9; 0.3 и 0.2 мм, а также из многослойного лавсана. Давление разрыва мембраны (4) определялось расчетным путем.

В качестве мембраны (5) на входе сопла использовался однослойный лавсан, толщиной 0.02 мм.

Рабочий газ в камере низкого давления (2) перед экспериментом находился под вакуумом в диапазоне $1 \div 100$ Торр.

Камера высокого давления (1) заполнялась толкающим газом под давлениями от 18 до 40 атм в предварительных экспериментальных исследованиях по обтеканию моделей ударной волной.

2.2. Конструкция мембранного блока ГУАТ

Формирование ударной волны зависит от формы раскрытия мембраны (4). Идеальное раскрытие мембраны состоит в ее мгновенном исчезновении без следа [6]. В реальных экспериментах хорошим раскрытием считается разрыв мембраны по двум перпендикулярным диаметрам в виде четырех лепестков. Не всегда полностью раскрываемые медные мембраны (4) при надрезах на них не обеспечивают правильное формирование фронта ударной волны для качественного эксперимента. Это явилось причиной разработки и внедрению мембранных ножей.

Часть мембран (4) имела крестообразные сквозные надрезы для вскрытия мембраны под давлением, нагнетаемым в КВД (1).

Другие мембраны (4) изготавливались без надреза и их вскрытие осуществлялось с помощью разработанного и изготовленного комплекта ножей. Мем-

бранный нож устанавливается между медной мембраной (4) и КВД (2). Режущая кромка пары ножей, крестообразно ориентированных друг относительно друга, обращена в сторону КВД. Ножи – сменные, из закаленной инструментальной стали, а их конструкция стабильна под действием прямых и отраженных ударных волн. Обойма ножа имеет геометрию, позволяющую встроить мембранный нож без нарушения герметичности ГУАТ.

Изображение мембранного ножа приведено на рис.7.



Рис.7. Нож мембранного блока

2.3. Конструкции моделей ЛА

Одной из моделей (11) для исследования процессов обтекания является плоский клин с углом раствора 10° , длиной активной части 150 мм и закрепленный в кронштейне. Данная модель представлена на рис. 8.



Рис.8. Модель: Клин с углом 10°

Другая модель представлена двумя полуклинами с углами раствора 3° . При установке полуклинов в ресивере на расстоянии $10 \div 30$ мм, наклонные части обращены друг к другу. Такое расположение предполагает детектирование ударной волны в центральной части промежутка между полуклинами.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ГУАТ

3.1. Экспериментальные исследования на модели и картины обтеканий

Проведены испытания по воздействию ударной волны на установленную в ресивере модель – клин, описанную выше. В качестве толкающего и рабочего газов в предварительных испытаниях использовался воздух. Входной диаметр сопла составил 8 мм, выходной – 100 мм.

Эксперимент 1. В мембранный узел (4) установлена медная мембрана, толщиной 0.2 мм, на сопло (5) – алюминиевая пищевая фольга (0.05 мм). Ударная волна образовалась при давлениях: в КВД $P_1 = 10.2$ атм, в ресивере $P_3 = 10^{-2}$ mbar, КНД $P_2 = 15$ mbar.

Эксперимент 2. Мембрана (4) медная, толщиной 0.3 мм с надрезами в глубину на 20%. Давление разрыва мембраны (4) составило $P_1 = 22$ атм, давление перед экспериментом в ресивере было $P_3 = 3 \times 10^{-3}$ mbar, в КНД $P_2 = 6.6$ mbar. Время от падающей до отраженной волны, проходящей через пьезодатчик у сопла составило $t = 291$ мкс. Скорость ударной волны составила 1 км/с, а число Маха $M = 4.4$.

Визуализация ударной волны показана на рис. 9.

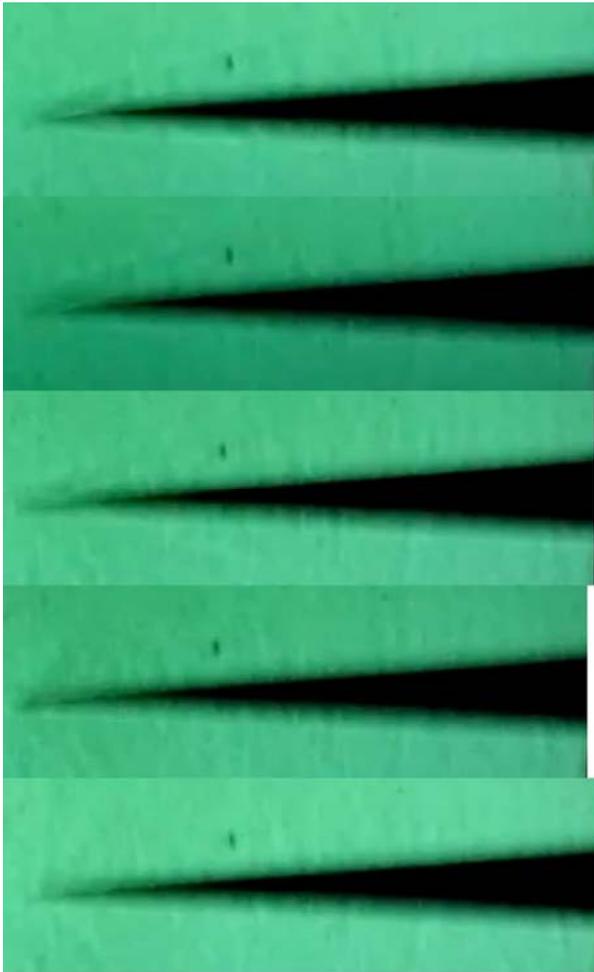


Рис. 9. Обтекание клина 10° , мембрана (4) медная – 0.3 мм с надрезами

На рис.10. приведены фото с набегающей, а на рис.11 – отраженной от клина ударной волной.

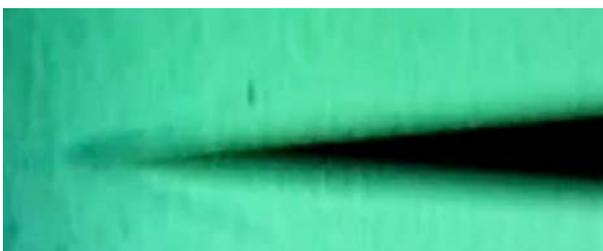


Рис.10. Клин 10° с набегающей ударной волной

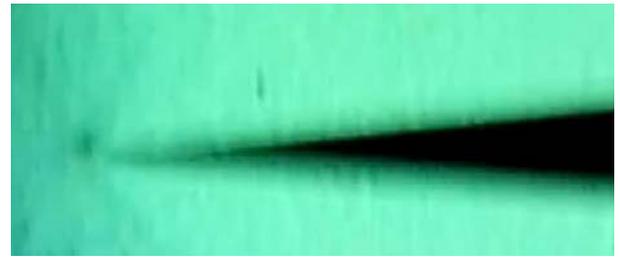


Рис. 11. Клин 10° с отраженной ударной волной

Эксперимент 3. Эксперимент был проведен с медной мембраной (4), толщиной 0.9 мм, без мембранных ножей и с однослойной лавсановой мембраной (5) на входе сопла. В медной мембране сделаны надрезы на глубину 0.5 мм. $P_3 = 2.5 \times 10^{-3}$ mbar. В эксперименте мембрана раскрылась при давлении $P_1 = 19$ атм, но не полностью. Скорость ударной волны перед соплом составило 640 м/с.

Эксперимент 4. Эксперимент был проведен с многослойной (шестнадцать слоев) лавсановой мембраной (4) без мембранных ножей и с лавсановой однослойной мембраной (5) перед входом в сопло. Заданы следующие параметры. Давления в ресивере и КНД составили $P_3 = 1.2 \times 10^{-3}$ mbar, и $P_2 = 100$ mbar, соответственно. Разрыв мембраны (4) произошел при давлении $P_1 = 19$ атм. Мембрана (4) полностью раскрылась. Скорость ударной волны составила 430 м/с. Число Маха $M = 1.96$.

Визуализация процесса представлена на рис.12.

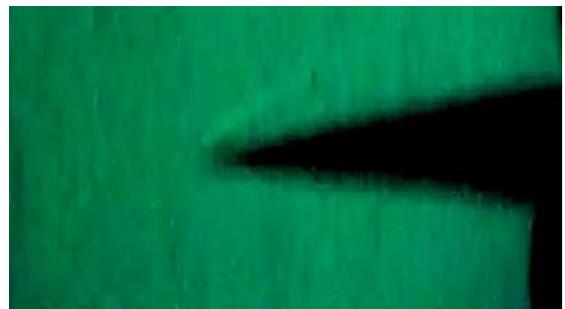


Рис.12. Ударная волна на клине 10° , при лавсановой мембране (4)

Эксперимент 5. Использован мембранный нож, изображенный на рис. 7. Медная мембрана (4) имела толщину 0.3 мм без надрезов. Давление разрыва мембраны составило $P_1 = 13.2$ атм. Давление в ресивере и КНД было равным $P_3 = P_2 = 2$ mbar. На входное отверстие сопла мембрана (5) не устанавливалась. Диаметр входного отверстия сопла составляет 12% от внутреннего диаметра камеры низкого давления. Влияние второй мембраны на формирование скоростного потока, предполагаем, незначительно. Оно будет исследовано в дальнейшем. Скорость ударной волны перед соплом составила 732 м/с. Мембрана раскрылась полностью четырьмя лепестками по диаметру 80 мм, как видно на рис. 13.

При обработке видеок кадров, контуры клина и ударной волны были выделены на компьютере (рис.14) для точного определения угла ее падения, а число Маха рассчитано в соответствии с [7] и [8].



Рис.13. Медная мембрана после раскрытия

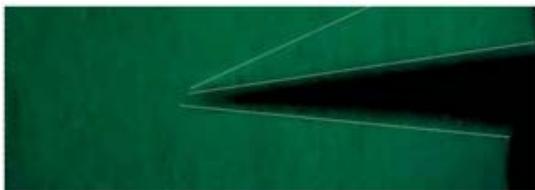


Рис.14. Прорисовка контура ударной волны и клина для расчетов

В настоящее время известны немногие фотографии вышеизложенных обтеканий моделей. Приведем некоторые из них. Например, фотография (рис.15) обтекания клина ударной волной из альбома Van Dyke [10].

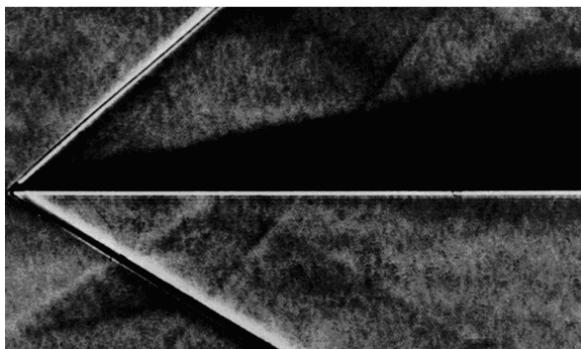


Рис.15. Ударная волна на клине (Van Dyke)

Современные экспериментальные исследования обтекания заостренных конструкций моделей при гиперзвуковых скоростях [11] представлены фотографией на рис. 16.

Рис.16. Эксперимент [11] при $M = 10$

Визуализация процессов обтекания, проведенная в настоящих экспериментах, нуждается в улучшениях для получения более четких контуров моделей, как, например, в [12–14], а также для выполнения корректного сопоставления с данными компьютерного моделирования [15,16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предварительные экспериментальные исследования по обтеканию модели летательного аппарата в гиперзвуковой ударной аэродинамической трубе показали следующее.

- Гиперзвуковая ударная аэродинамическая труба оснащена высокопроизводительными откачными постами, способными создавать различные режимы для экспериментов, включая глубокий вакуум, и регистрирующей электрические сигналы аппаратурой. Качество визуализации необходимо повышать за счет высокоскоростной съемки с хорошим разрешением и усовершенствованной методики теневого фотографирования.
- Достигнутые числа Маха от 1.7 до 4.4 приемлемы для начальных экспериментов. Предполагается дальнейшее повышение чисел Маха до 6 ÷ 12 и выход на режимы экспериментальных исследований мировых научных центров.
- Эксперименты с моделями летательных аппаратов сложной геометрии необходимо продолжать с учетом требуемых полетных условий и обтеканий газовыми смесями.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований ОЭМПУ РАН РФФИ № 10-01-05013_б, 2010.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГУАТ — гиперзвуковая ударная аэродинамическая труба;

M — число Маха;

КВД — камера высокого давления;

КНД — камера низкого давления;

P_1 — давление в камере высокого давления, атм;

P_3 — давление в ресивере, мбар;

P_2 — давление в КНД, 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. Суржиков С.Т. Анализ моделей ионизационной кинетики при гиперзвуковом обтекании цилиндра // Журнал химической физики. 2010. Т.29. №7. С.1–14.
2. Железнякова А.Л., Суржиков С.Т. Численное моделирование гиперзвукового обтекания модели летательного аппарата X-43 // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Машиностроение. 2010. №1. С.3-19.
3. Рулева Л.Б. Экспериментальные установки для исследования ударно-волновых течений в европейских научных центрах. Часть 1 // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2011. Т.11. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2011-02-01-014.pdf>
4. Рулева Л.Б. Схемы экспериментальных установок для исследования ударно-волновых течений. Обзор по патентным материалам. Часть 2. // Сборник научных трудов 4-й Всероссийской школы-семинара «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем». 2011, С.113–124.

5. Рулева Л.Б. Экспериментальная газодинамическая установка для исследования моделей летательных аппаратов. // Актуальные проблемы российской космонавтики. Труды XXXV академических чтений по космонавтике: Тез. докл. – Москва, январь 2011, С.198–199.
6. Райзер Ю.П. Введение в гидрогазодинамику и теорию ударных волн для физиков. г. Долгопрудный: Интеллект. 2011, 432 с.
7. Краснов И.Ф., Кошевой В.Н., Данилов, А.Н. и др. Прикладная аэродинамика. М.: Высшая школа, 1974. 732 с.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Теоретическая физика т. VI. М.: Наука, 1986. 736 с.
9. Аэротермодинамика летательных аппаратов в фотографиях / ЦАГИ. 2003. С.140–141.
10. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. / Баренблат Г.И., Шидловский В.П. М.: Мир, 1986. 184 с.
11. Rolim T., Toro P., Mnuool M.// J. Aerosp. Technol. Manag. Vol.3. No.2. 2011. pp. 127-136.
12. Герасимов С.И., Файков Ю.П. Теневое фотографирование в расходящемся пучке света. Саров.: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2010. 344с.
13. Герасимов С.И., Файков Ю.П., Холин С.А. Кумулятивные источники света. Саров.: ФГУП РФЯЦ- ВНИИЭФ, 2011. 327с.
14. Красильщиков А.П., Гурьяшкин Л.П. Экспериментальные исследования тел вращения в гиперзвуковых потоках. М.: Физмат, 2007. 208 с.
15. Суржиков С.Т. Перспективы многоуровневого подхода к задачам компьютерной аэрофизики // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2008. Т.7. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2008-09-01-002.pdf>
16. Суржиков С.Т. Трехмерная вычислительная модель аэротермодинамики спускаемых космических аппаратов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т.9. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-002.pdf>