

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ТЕЧЕНИЙ В ЕВРОПЕЙСКИХ НАУЧНЫХ ЦЕНТРАХ. ЧАСТЬ 1

Л.Б. Рулева

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

## Аннотация

Дан краткий обзор характеристик ударных труб, используемых для проведения аэродинамических исследований.

## EXPERIMENTAL EQUIPMENT FOR SHOCK WAVE RESEARCHES IN EUROPEAN SCIENTIFIC CENTRES. PART 1

The short review of aerodynamic shock tubes characteristics used for aerodynamic researches is presented.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Ударные трубы используются в аэрокосмических исследованиях более 50-ти лет. В ударных трубах проводятся экспериментальные исследования физической и химической кинетики газовых смесей за фронтом сильных ударных волн, образующихся при гиперзвуковых скоростях движения объектов. В ударных аэродинамических трубах экспериментально исследуются вопросы обтекания моделей летательных аппаратов газовыми потоками при сверхзвуковых и гиперзвуковых скоростях.

В работе представлен обзор экспериментальных установок типа ударных труб, для которых имеется информация в обзорных работах последних лет [1–5].

### 2. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МИРОВЫХ НАУЧНЫХ ЦЕНТРОВ

С целью изучения реально существующих процессов в газовой среде при высоких скоростях и низких давлениях в ряде исследовательских центров созданы и эксплуатируются ударные и аэродинамические трубы. Общее представление о типичных параметрах ударно-волновых аэрофизических экспериментов, проводимых в настоящее время в некоторых лабораториях, дает рис.1. Диапазон создаваемых давлений составляет от 0.01 Тор до 10 Тор. Скорости газового потока сравнимы с первой и второй космическими скоростями. Наибольшие скорости в экспериментах получены австралийским научным центром, в котором имеют свое присутствие американские, европейские и азиатские научные центры. На европейской части мира фундаментальными теоретическими и экспериментальными исследованиями на ударных и аэродинамических трубах знаменит Институт гидродинамики фон Кармана.

Европейский научный центр исследования динамики течения жидкости и газа, Институт гидродинамики фон Кармана, создан в 1956 году Департаментом аэрокосмических исследований. Институт представляет собой некоммерческую организацию, финансируемую из интернациональных бюджетов стран: Бельгии, Франции, Германии, Италии, Норвегии, Испании, Турции, Португалии, Исландии, Люксембурга, Венгрии и частных спонсоров. Исследования обеспечива-

ются мощным компьютерным центром и хорошо оборудованными лабораториями.

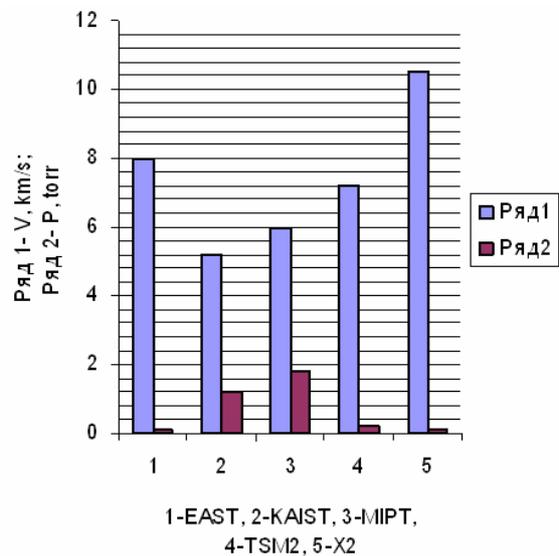


Рис.1.

Направления аэрокосмических исследований включают в себя изучение аэротермодинамики полета при сверхзвуковой, трансзвуковой и суперзвуковой скоростях.

Информация по аэродинамическим и ударным трубам Института гидродинамики фон Кармана представлены в Табл. 1.

Таблица 1. Аэродинамические трубы института гидродинамики фон Кармана

Наименование, размеры рабочей части трубы	Описание установки
Сверхзвуковая/ Трансзвуковая аэродинамическая труба S-1, 0.4×0.36 м каждой тестовой камеры; $M = 2$ ; $Re = 4 \times 10^6 / m$	Закрытый контур, управляется осевым проточным компрессором 615 кВт. Три тестовые камеры. Труба снабжена теневым прибором, трехосным откатным столом, сканирующей системой и системой стабилизации аэрокосмической скорости, полуавтоматической системой контроля.

Сверхзвуковая аэродинамическая труба S-4, 0.08×0.1 м, M = 3.5; Re = 5×10 <sup>7</sup> /м	Аэродинамическая продувная труба. Подача воздуха осуществляется со стационарным давлением от 3 до 18 бар. Имеются сверхзвуковой инжектор для снижения выхлопа падающего потока и диффузор переменной геометрии, с перемещением ±10 <sup>0</sup>
Гиперзвуковая аэродинамическая труба Н-3, d=0.12 м; M=6; Re = 3×10 <sup>6</sup> ÷3×10 <sup>7</sup> /м	Нагретый поток воздуха, с температурой T = 550 К. Имеется три степени свободы перемещения модели. Снабжена инфракрасной камерой и интерферометром для тонких измерений
Гиперзвуковая аэродинамическая труба с подвижным поршнем, генерирующая пробку сжатого газа большой протяженности, M = 14÷20; Re = 5×10 <sup>6</sup> /м, (рис.2)	Гиперзвуковая поршневая труба работает на азоте и диоксиде углерода. Объем тестовой камеры 4 м <sup>3</sup> . Имеются балансиры силы/момента, акселерометры, тонкопленочные и коаксиальные термосоединения для измерения тепловых потоков, пьезорезистивные датчики давления. Используется набор сопел, диаметрами 0.43÷0.6 м. Данные 64 каналов регистрации поступают в ПК



Рис.2.

В институте гидродинамики фон Кармана установлена гиперзвуковая ударная труба Shock Tube Facility, которая является собственностью фирмы SHESMA.

Она состоит из шести труб с внутренним диаметром 0.1 м, и трех измерительных секций. Длина ударной трубы 8 м. Конструкция трубы – с двумя мембранами. В ударной трубе имеется возможность подавать пошаговое давление в 2 бара при времени шага 16 мс, которое соответствует нижней границе частоты в 60 Гц. Для записи данных применяется высокоскоростная регистрирующая система.

Научные центры России имеют комплексы аэродинамических и ударных труб для экспериментальных исследований. Далее перечислим некоторые из них.

Комплекс аэродинамических труб ЦАГИ [1] обеспечивают натурное моделирование условий полета в широком диапазоне скоростей и чисел Маха (Табл. 2).

Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В.Ломоносова располагает мощным экспериментальным аэродинамическим комплексом. Параметры установок приведены [2] в Табл. 3. Ударная труба НИИ механики МГУ им. М.В.Ломоносова, описанная в работе [3], предназначена для проведения

исследований высоконагретых ударно-сжатых слоев газа, имеет внутренний диаметр 0.05 м., а общую длину около 8 м. Измерительные камеры оснащены оптическими окнами и пьезодатчиками. Датчики давления через интерфейс связаны с ПК. Применяемые газы: аргон, гелий, водород; откачка камеры низкого давления производится до 2×10<sup>-2</sup> Тор, рабочий диапазон чисел Маха M = 6.

Таблица 2. Аэродинамические трубы ЦАГИ

Наименование трубы	Описание установки
T-101	Дозвуковая аэродинамическая труба, размер рабочей части 14×24 м
T-102, T-103	Дозвуковые аэродинамические трубы
T-105	Вертикальная аэродинамическая труба для исследования моделей вертолетов
T-112	Трансзвуковая аэродинамическая труба, M = 1.05
T-128	Трансзвуковая аэродинамическая труба; размер рабочей части 2.75×2.75 м; M = 1.7; система адаптивной перфорации
T-108, T-113, T-114	Сверхзвуковые аэродинамические трубы; M = 0.4÷6.0
T-109	Сверхзвуковая аэродинамическая труба с многорежимным регулируемым соплом
T-116, T-117	Гиперзвуковые аэродинамические трубы; D = 1 м; M = 20
СВС-2, ТПД, T-131	Специализированные аэродинамические трубы с широким диапазоном скоростей, вплоть до гиперзвуковых
ВАТ-3, ВАТ-102, ВАТ-103, ВАТ-104	Вакуумные аэродинамические трубы

Таблица 3. Аэродинамические трубы Института механики МГУ

Наименование установки	Размер рабочей части, м	Диапазон чисел Маха	Диапазон чисел Рейнольдса, 1/м
ГАУ	D = 0.2; камера Эйфеля	5÷10	(0.02÷12.0)×10 <sup>6</sup>
A-6	Эллипс 4×2.33; открытая рабочая часть, аэромеханические весы	0.01÷0.25	(0.8÷1.2)×10 <sup>6</sup>
A-7	0.6×0.6; перфорированные стенки	0.7÷4.0	(4.0÷16.0)×10 <sup>6</sup>
A-8	0.6×0.6; аэромеханические весы	0.2÷0.8; 1.5÷3.0	(2.8÷17.0)×10 <sup>6</sup>
A-3	0.2×0.2; камера Эйфеля	1.5÷4.0	(12.0÷300.0)×10 <sup>6</sup>
AP-2	0.09×0.007; сопло регулируемое	1.7÷3.5	(22.0÷17.0)×10 <sup>6</sup>

Импульсная аэродинамическая труба ИПРИМ РАН [4] имеет максимальную продолжительность рабочего режима 0.2 с. В ней исследуются процессы при M=2÷7 и температуре торможения 570 К. Имеются возможности управления пограничным слоем, а также

исследования тел минимального сопротивления. На ударной трубе проводятся испытания моделей ПВРД с горением твердого топлива, а также исследования характеристик гиперзвуковых воздухозаборников.

В ОИВТ РАН проводятся исследования импульсных течений расширения на ударной трубе [5]. Диаметр КВД трубы 0.05 м, длина 2.0 м. Размеры камеры низкого давления: 0.04×0.04 м, длина 4 м. Вакуумная камера (ресивер), объемом 1 м<sup>3</sup>, имеет смотровые окна, а также возможность соединения с соплом. Вакуумная камера откачивается до давления  $5 \times 10^{-2}$  Торр. Для исследования трехмерной дифракции ударных волн на торце трубы установлен фланец с каналом круглого, квадратного или крестообразного сечения. Достижимое число Маха составляет  $M = 2 \div 6$ .

Ударная труба МФТИ имеет общую длину 6.5 м, с внутренним диаметром 0.076 м, максимальное давление КВД составляет 250 атм. Экспериментально изучается неравновесное излучение сильных ударных волн, в том числе, имитирующих атмосферу Титана.

Система диагностики включает в себя монохроматор с решеткой в 37.5 штрихов/мм и ICCD камера LaVision PicoStar HR-12, с рабочей областью фотокаода около 15 мм и минимальной выдержкой 200 пс. Достижимое число Маха составляет  $M = 8.2$ .

В ИПМех РАН введена в опытную эксплуатацию гиперзвуковая аэродинамическая ударная труба (ГУТ, рис. 3).



Рис.3.

Она выполняет две функции: как ударной, так и аэродинамической трубы. В первом варианте задействованы камера высокого давления (КВД), камера низкого давления (КНД) с измерительным блоком и заглушкой.

Здесь исследуется ионизационная релаксация газов за фронтом падающих и отраженных ударных волн.

Аэродинамическая часть трубы подсоединяется к трубе без заглушки через посредство сопел и второй тонкой мембраны.

Она предназначена для экспериментальных исследований задач обтекания газами профилей элементов конструкции летательных объектов.

Диаметр гиперзвуковой ударной трубы 0.08 м, длина КВД – 2 м, КНД – 6 м, ресивера – 4м, диаметр ресивера – 0.6 м. Максимальные расчетные давления  $P_{КВД} = 2000$  бар,  $P_{КНД} = 800$  бар. Безмасленное откачное оборудование позволяет производить откачку камер высокого и низкого давлений перед наполнением толкающим и рабочим газами. Глубина вакуума может варьироваться от 1 до  $5 \times 10^{-10}$  бар.

Одним из вариантов заполнения является следующий: давление  $P_{КВД} = 500$  бар,  $P_{КНД} = 1$  Торр,  $P_{РЕС} = 10^{-7}$  бар, рабочий газ – воздух, толкающий газ N<sub>2</sub>. Время существования стационарного потока, при котором возможны аэродинамические измерения из гиперзвукового сопла, при  $M = 4$  составляет 1 мс, а само стационарное истечение из гиперзвукового сопла составляет 20 мкс.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ударные и аэродинамические трубы, работа которых связана с гиперзвуковыми потоками газовых смесей, оснащенные современной высокоточной регистрирующей аппаратурой, востребованы в настоящее время в аэрокосмическом сообществе.

Гиперзвуковая ударная труба с функциями аэродинамической трубы ИПМех РАН имеет большие потенциальные возможности для исследований.

Появление высокоскоростной цифровой регистрирующей аппаратуры позволило выполнить за последние годы ряд экспериментальных исследований по неравновесному излучению ударных волн, что существенно расширило возможности расчетно-теоретических исследований по созданию и тестированию моделей физической и химической кинетики.

### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- ГУТ – гиперзвуковая ударная труба;
- EAST – Европейское космическое агентство, (институт гидродинамики фон Кармана);
- KAIST – научный центр Южной Кореи;
- МИПТ – научный центр МФТИ;
- МФТИ – московский физико-технический институт;
- TSM2 – научный центр Франции;
- X2 – научный центр Австралии;
- КВД – камера высокого давления;
- КНД – камера низкого давления;
- M – число Маха;
- МГУ – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова ;
- ЦАГИ – Центральный авиационный государственный институт;
- ИПРИМ – институт прикладной механики РАН;
- ОИВТ – объединенный институт высоких температур РАН;
- ИПМех РАН – институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Официальный сайт ЦАГИ: <http://www.tsagi.ru>
2. Официальный сайт Института механики МГУ: <http://www.imes.msu.ru>.
3. Козлов П.В., Лосев С.А., Романенко Ю.В. Поступательная неравновесность во фронте ударной волны в смеси аргона и гелия // Письма в ЖТФ, 2000, т.26, вып. 22., С. 69.
4. Васильев И.Ю., Захаров Н.Н., Полянских А.Г. и др. Исследование обтеканий различных тел на импульсной гиперзвуковой аэродинамической трубе. // ИПРИМ РАН Механика и наномеханика структурно-сложных и гетерогенных сред. Успехи, проблемы, перспективы. Материалы Всероссийской конференции. М.: Альянстрансатом, 2009, С.89.
5. Голуб В.В., Баженова Т.В. Импульсные сверхзвуковые струйные течения. М.: Наука, 2008, 280 с.