

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ГИПЕРЗВУКОВОЙ УДАРНОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

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

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

Аннотация

Эксперименты по обтеканию моделей летательных аппаратов газовыми потоками в гиперзвуковой ударной аэродинамической трубе сопровождались измерениями динамического давления в цифровом виде. Произведена оценка точности результатов экспериментальных исследований. Представлены предложения по градуировке датчиков динамического давления и мониторинга внешней и внутренней сред при экспериментах.

EXPERIMENTAL RESEARCHES METHODIC 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 flows for flying object models in hypersonic aerodynamic shock tube are passed with dynamic pressure measurements in digital form. The accuracy of test results was measure. Actions for dynamic pressure device gradation inside and outside of the experimental facility and monitoring suggested.

1. ВВЕДЕНИЕ

Ударные аэродинамические трубы, известные с прошлого века, но оснащенные новым технологическим оборудованием, активно используются в настоящее время для нового уровня исследований [1, 2]. Новые профили летательных аппаратов, условия их полета, физико-химический состав среды и ее динамическое изменение накладывают аналогичные требования к организации экспериментальных исследований по обтеканию моделей. Численные методы расчета процессов обтекания моделей летательных аппаратов заданной конфигурации подвергаются верификации с экспериментальными данными реальных процессов. Это налагает ответственность к представлению экспериментальных данных для сравнения их с расчетными данными.

Известен государственный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р ИСО 5725-1, соответствующий международному стандарту ИСО 5725-2: 1994 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Он предназначен, как нам видится, для испытания и аттестации продукции, предназначенной для вывода ее на международный рынок. Цель данного документа заключается, в том числе, в подтверждении соответствия, оценке компетентности испытательных лабораторий согласно требованиям ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025-2000 Часть 2. «Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений».

Данный подход предусматривает наличие партии продукции, выборку образцов из партии, регламентирует способы экспериментальной оценки повторяемости (сходности) и воспроизводимости методов и результатов измерений p лабораториями с q уровнями и n результатами измерений.

Экспериментальные исследования, представленные в настоящей работе, в целом не подпадают под указанные документы. Это обусловлено эксклюзивностью геометрических форм поверхностей моделей и штучным характером таких испытаний. Однако основные тенденции документа учитываются в оценке результатов экспериментов и будут совершенствоваться при дальнейших испытаниях.

2. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА УСТАНОВКЕ ГУАТ ИПМЕХ РАН

2.1. Общие требования к проведению экспериментов на ГУАТ

Описание гиперзвуковой ударной аэродинамической трубы (ГУАТ) в лаборатории радиационной газовой динамики ИПМех РАН, лабораторного оборудования и некоторых исследуемых моделей приведены в [1–4].

В соответствии с [5–8] измерения необходимо проводить «в пределах короткого интервала времени и одним и тем же оператором, а также без какой бы то ни было промежуточной перекалибровки аппаратуры, если только это не является неотъемлемой частью выполнения измерений». Эти рекомендации учтены при экспериментах на ГУАТ ИПМех РАН.

При экспериментах на ГУАТ предусматриваются действия одного оператора для регистрации базы данных, поступающих с датчиков динамического давления через блоки аналого-цифровых преобразователей (АЦП) на компьютер, а также для запуска высокоскоростной видеокамеры по сигналу первичного датчика давления.

Экспериментальная установка ГУАТ ИПМех РАН и оператор изображены на фото рис.1.

Экспериментальная установка постоянно дополняется новым приборами и оборудованием. Проблемы

синхронизации их работы во время экспериментов, учет систематические и случайные погрешности измерительных приборов решаются совершенствованием методик проведения экспериментов.



Рис. 1. Фото ГУАТ с оператором

2.2. Датчики в экспериментальной установке

Число блоков АЦП с ЦАП в лаборатории увеличилось с одного [1, 2], имеющего 4 аналогового входа и несколько цифровых выходов, до трех, в связи с увеличением количества датчиков. Вопрос синхронизации работы трех АЦП решился прошивкой компьютера лицензионной спецпрограммой. Погрешность синхронизации составила менее 0.5 мкс.

Температура, давление, влажность внешней среды, в экспериментальной лаборатории контролировалась соответствующими датчиками. Эти данные стабильны в любое время года, поэтому практически не влияют на электронную аппаратуру и состояние стенок ГУАТ.

В ряде экспериментов использовался малогабаритный датчик влажности типа НН 4010-003, производителя Honeywell Sensing & Control, диапазон измерения которого $0 \div 100\%$, а точность $\pm 3.5\%$.

Датчик прошел испытание на установке ГУАТ. Сначала он был подключен к блоку АЦП и измерял наличие влажности вне ГУАТ. Затем им проводились измерения внутри ГУАТ на выходе сверхзвукового сопла. При его установке в ГУАТ изменение влажности при воздействии сверхзвуковых газовых потоков при истечении их из сопла не наблюдалось.

Датчик влажности типа НН 4010-003 Honeywell Sensing & Control с конструктивными размерами в мм. изображен на рис.2.

Температурные датчики для контроля внешней среды и измерений внутри блоков известны в своем многообразии. Интересны цифровые датчики вышеупомянутой фирмы, например, LM92 700-102ВАВ, имеющий широкий диапазон и малое время отклика. Среди температурных датчиков, устанавливаемых на модели известны платиновые проволочные датчики (ТЭП 012), термокраски и датчики градиента температурного поля [9].

Влияние погрешности измерений таких датчиков в данной работе не рассматривалось.

Наибольшее влияние на результаты экспериментов на ГУАТ оказывают датчики динамического давления.

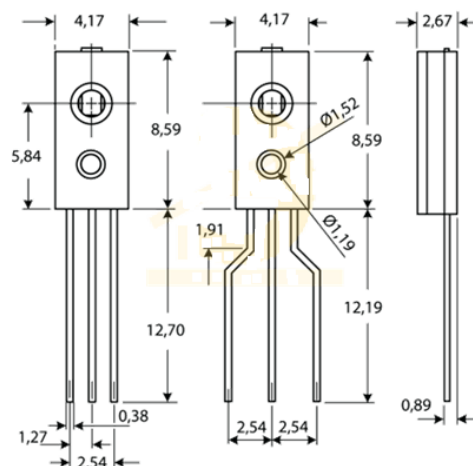


Рис.2. Датчик влажности НН 4010-003 Honeywell Sensing & Control

После образования ударной волны динамическое давление измерялось двумя датчиками динамического давления, расположенными в середине трубы. Эти датчики являются первичными датчиками, по которым запускается регистрирующая аппаратура (блоки АЦП с компьютером). Один из датчиков - отечественный не сертифицированный, другой - РСВ Piezotronics, производства США, с сертифицированной градуировочной характеристикой (рис.3).



Рис. 3. Датчик динамического давления РСВ

2.3. Влияние погрешностей датчиков динамического давления на результаты экспериментов

Погрешность измерения складывается из систематической погрешности, обусловленной погрешностью датчика данного типа, систематической погрешностью регистрирующей аппаратуры, а также случайной погрешностью для данного метода измерения. Рассмотрим их.

Опытным путем установлено, что при использовании разработанного ножевого блока [1,2] на каждые 0.1 мм толщины медной мембраны при ее разрыве прогнозируется давление $5.2 \times (1 \pm 0.13)$ атм. Реальные давления разрыва регистрировались как датчиком динамического давления, установленным в камере высокого давления (КВД), так и электрическим манометром, установленным там же. Последний прибор имеет временное запаздывание и нормированную погрешность 10 %. Разрыв мембраны в камере высокого давления регистрировался также пьезоэлектрическим датчиком динамического давления. Подключенные к компьютеру через АЦП вышеуказанные датчики, при

сравнении их сигналов в цифровом виде в разных реализациях при однотипных запусках ГУАТ показали, что погрешность в среднем составила $\delta_M = 7\%$.

Для РСВ датчиков динамического давления, применяемых в эксперименте, градуировочная характеристика составляла 0.73 мВ/кР, с систематической погрешностью 15 % от диапазона, нелинейностью 2 %, и временем нарастания импульса 2 мкс.

Примем для РСВ датчиков систематическую погрешность равную $\delta_C = 15\%$.

В процессе экспериментов выполнялась задача получения семейства данных при одинаковых условиях реализации процессов. Для оценки погрешности измерения датчиков давлений ГУАТ был выбран датчик динамического давления, расположенный в камере низкого давления у входа в сопло. Оценена амплитуда в момент прихода первой ударной волны при одинаковых начальных условиях эксперимента.

Режимы давлений (P) при этом составили: в камере высокого давления $P_{КВД} \approx 36$ атм, в камере низкого давления $P_{КНД} \approx 1$ мбар, в вакуумном блоке (ресивере): $P_{рес} \approx 0.4$ мбар.

В ИСО 5725 [3–5] для описания точности метода измерений используются два термина: «правильность» и «прецизионность». Термин «правильность» характеризует степень близости среднего арифметического значения большого числа результатов измерений к истинному или принятому опорному значению, термин «прецизионность» – степень близости результатов измерений друг к другу. В нашем случае: среднее арифметическое значение составило 160.7 мВ, а среднеквадратическое отклонение 30.8 мВ.

С вероятностью 0.95 % случайные показания X_i датчика (в мВ) лежат в области

$$160.7 - 3 \times 30.8 \leq X_i \leq 160.7 + 3 \times 30.8, \quad (1)$$

а случайная погрешность составила

$$\delta_{Cl} = 19.16\%. \quad (2)$$

Таким образом, сумма систематической и случайной погрешности динамических датчиков в данном диапазоне измерений составляет

$$\delta_{сумм} = \sqrt{\delta_M^2 + \delta_C^2 + \delta_{Cl}^2} = 25.7\%. \quad (3)$$

Данный расчет является предварительным и будет редактироваться в дальнейшем при увеличении количества испытаний и совершенствовании методики их проведения.

3. ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

3.1. Градуировка отечественных датчиков динамического давления

В эксперименте РСВ и отечественные датчики динамического давления были установлены по одной линии сечения и являлись первичными датчиками в ударной части ГУАТ. Положительный эффект – градуировка в эксперименте не сертифицированных отечественных пьезодатчиков, и отображение их сигналов

не в электрических единицах (вольтах) а в единицах давления (атм).

В связи с наличием блока электроники у РСВ датчиков, позволяющим фильтровать и линеаризовать сигналы с них во всем измерительном диапазоне, градуировка отечественных датчиков должна происходить на всем диапазоне, а не по отдельным реперным точкам.

С помощью установки гибких пьезодатчиков в модель и на срез сопла в аэродинамической части ГУАТ был определен профиль фронта истекающего сверхзвукового потока из сопла на модель и измерено давление при различных числах Маха.

3.2. Коррекция оптической системы с высокоскоростной видеосъемкой

Для высокоскоростной съемки обтекания моделей газовыми потоками в аэродинамической части ГУАТ использовалась видеокамера CR3000×2/C/4GB с частотой кадров 2000 кадров/с при числах Маха $M=7\div 8$. Большой диапазон возможных скоростей съемки (до 10000 кадров/с) при приемлемой четкости изображения и видеопамяти позволяет визуализировать более скоростные процессы. Задача совмещения по времени видеоряда с семейством графиков значений динамического давления на всех датчиках ГУАТ решалась синхронизацией их по входу в АЦП по сигналу первичного датчика. Особенностью запуска видеокамеры является то, что запускающий сигнал должен иметь амплитуду 5 В, в то время как сигнал с первичного датчика динамического давления не превышает 1.5 В. Поэтому, по сигналу первичного датчика динамического давления, который поступает через АЦП в компьютер, формируется импульс в ЦАП, амплитудой 5 В, который запускает видеокамеру. Погрешность синхронизации включает в себя временную задержку, состоящую из погрешности преобразования сигнала АЦП-ЦАП, погрешности нарастания фронта импульса и реакцию самой видеокамеры, что составляет не более 0.0005 мс.

3.3. Настройка оптического оборудования

Оптическая часть экспериментальной установки ГУАТ, включающая в себя осветитель, теневой прибор и ответную часть с видеокамерой, постоянно нуждается в юстировке. При этом сложно обеспечить воспроизводимость и точность экспериментов.

Одним из вариантов решения проблемы явился отказ от штативов и применение стола с трехкоординатными направляющими. Такие устройства имеют небольшой люфт и погрешность перекосов кареток не более 0.02 мм.

Другая задача заключалась в выборе фокусного расстояния при различных скоростях видеосъемки. Эта проблема разрешилась применением объектива с настраиваемым фокусным расстоянием. Для экспериментов на ГУАТ применяется объектив с регулируемым фокусным расстоянием 70 ÷ 200 мм.

Замена моделей в вакуумном блоке (ресивере) также может нарушить выбранную настройку оптической системы. Поэтому целесообразно использовать для этого оптические окна быстрой загрузки. При близком

расстоянии оптического стекла теплера от ГУАТ, окно быстрой загрузки должно быть поворотным-откидным.

Сертифицированные по европейским стандартам газовые гибкие шланги, редукторы, датчики расхода, вакуумные краны и быстроразъемная вакуумная арматура делают экспериментальную работу более безопасной, информативной и воспроизводимой.

Применение вышеуказанных технологических приемов позволит повысить точность и воспроизводимость результатов экспериментальных исследований на ГУАТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные экспериментальные данные по обтеканию моделей в гиперзвуковой ударной аэродинамической трубе, используемые для тестирования вычислительного моделирования ударно-волновых процессов и газодинамических эффектов, оценивались с учетом современных положений и требуют дальнейших уточнений и повышений точности измерений.

Дальнейшее повышение точности должно быть обеспечено увеличением количества испытаний, совершенствованием методики экспериментов и градуировкой измерительной аппаратуры и датчиков.

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;
 АЦП — аналого-цифровой преобразователь;
 ЦАП — цифроаналоговый преобразователь;
 КВД — камера высокого давления;
 КНД — камера низкого давления.
 $P_{\text{КВД}}$ — давление в камере высокого давления, атм;
 $P_{\text{КНД}}$ — давление в КНД, мбар;
 $P_{\text{рес}}$ — давление в ресивере, мбар;
 X_i — случайная величина давления;
 $\delta_{\text{сл}}$ — случайная погрешность измерения;
 $\delta_{\text{М}}$ — погрешность от запуска к запуску;
 $\delta_{\text{С}}$ — систематическая погрешность;
 σ — стандартное среднее квадратическое отклонение

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рулева Л.Б. Экспериментальные установки для исследования ударно-волновых течений в европейских научных центрах. Часть 1 // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2011. Том 11.
<http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2011-02-01-022.pdf>
2. Козлов П.В., Котов М.А., Рулева Л.Б., Суржиков С.Т. Предварительные экспериментальные исследования обтекания моделей в гиперзвуковой ударной аэродинамической трубе // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2013. Том 15.
<http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2013-04-29-017.pdf>

3. 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), Изд-во МАИ, Москва, 2012.
4. Котов М.А., Рулева Л.Б., Солодовников С.И., Суржиков С.Т. Проведение экспериментов по обтеканию моделей в гиперзвуковой ударной аэродинамической трубе // Сборник научных трудов 6-й Всероссийской школы-семинара «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем», 2012 г. С 70–75.
5. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения
6. ГОСТ Р ИСО 5725-5-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений
7. ГОСТ Р ИСО 5725-3-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 3. Промежуточные показатели прецизионности стандартного метода измерений
8. ГОСТ Р ИСО 5725-4-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 4. Основные методы определения правильности стандартного метода измерений
9. Сапожников С.Э., Митяков В.Ю., Митяков А.В. Измерение нестационарных тепловых потоков градиентными датчиками на основе анизотропных монокристаллов висмута // Журнал технической физики. 2004, Том 74, вып. 7.