

УДК 531.787:53.089.6

ПРИМЕНЕНИЕ УДАРНОЙ ТРУБЫ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ДАТЧИКОВ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

А.А. Умаров¹, А.А. Рунич¹, А.А. Симчук¹, Г.А. Макаревич²

¹ ООО «ГТЛаб», Саров, Россия,

² ФГУП «ЦНИИмаш», Королёв, Россия,

umarov@gtlab.pro,

runich@gtlab.pro,

simtchuk@gtlab.pro,

avershiev@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена выбору методов и устройств для калибровки датчиков динамического давления (ДДД). Приводятся схема калибровочной установки, осциллограммы калибровки ДДД, результаты калибровки датчика на ударной трубе.

Ключевые слова: датчики динамического давления, ударная труба, калибровка, методы.

APPLICATION OF SHOCK TUBE TO CALIBRATE DYNAMIC PRESSURE TRANSDUCERS

A.A. Umarov¹, A.A. Runich¹, A.A. Simchuk¹, G.A. Makarevich²

¹ LLC "GTLab", Sarov, Russia,

² FSUE "TsNII Mash", Korolev, Russia,

umarov@gtlab.pro,

runich@gtlab.pro,

simtchuk@gtlab.pro,

avershiev@mail.ru

Annotation. The article is devoted to the choice of methods and devices for the calibration of dynamic pressure transducers (DPT). The diagram of the calibration setup, oscillograms of the DPT calibration, and the results of the sensor calibration on the shock tube are presented.

Key words: dynamic pressure transducers, shock tube, calibration, methods.

Для измерения параметров импульсного давления в нестационарных газодинамических и гидродинамических процессах применяются средства измерений, преобразующие переменное давление в электрический сигнал, — датчики динамического давления (ДДД). Знание метрологических характеристик ДДД необходимо для правильного определения амплитудных и временных параметров импульсов давления и оценки их точности. На практике наибольший интерес представляют следующие характеристики:

- функция преобразования (чувствительность);
- диапазон измерений;
- амплитудная характеристика;

- частотная характеристика;
- основные погрешности;
- дополнительные погрешности.

Перечисленные характеристики определяются в процессе калибровки, для чего используются различные методики и калибровочные установки.

Выбор методов и устройств для калибровки определяется конструкцией калибруемого ДДД, его измеряемыми характеристиками и их требуемой точностью, а также удобством и простотой средств калибровки. Для определения чувствительности, диапазона измерений и амплитудной характеристики пьезорезистивные и индуктивные датчики нагружают известным статическим давлением, а на пьезоэлектрические воздействуют импульсом давления миллисекундной длительности, который получают посредством сброса или напуска давления жидкости или газа. Определение указанных выше метрологических характеристик производится методом сравнения величин сигналов с калибруемых датчиков с показаниями образцовых манометров. Если не учитывать переходные процессы при импульсном сбросе или напуске давления, то погрешность определения характеристик ДДД определяется классом точности применённых образцовых манометров.

На рис. 1 показаны установки, используемые ООО «ГТЛаб» для калибровки ДДД.

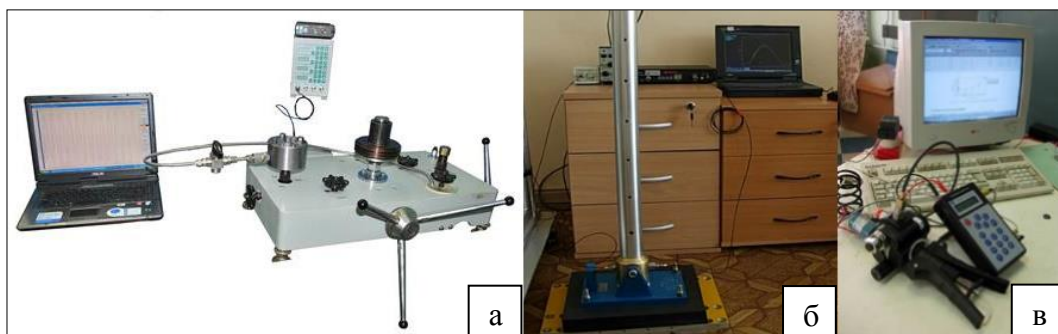


Рис. 1. Установки, используемые для калибровки ДДД: а — установка калибровочная (давление — 1–250 бар, длительность импульса — 1–10 мс); б — РСВ 913В02 (давление — 10–1400 бар, длительность импульса — 5–6 мс); в — установка низкого давления (давление — 0,001–30 бар, длительность импульса — 3–15 мс)

В то же время знание динамических характеристик ДДД необходимо для учёта динамических погрешностей, проявляющихся в отличии формы электрического импульса с датчика от формы импульса давления, воздействующего на датчик. Кроме того, существенно знание времени регистрации импульса давления с погрешностью, не превышающей заданного значения, определяемого как свойствами датчика, так и свойствами среды, с которой контактирует датчик. Динамические характеристики удобно определять

на ударной трубе, позволяющей воздействовать на ДДД калиброванным импульсом давления ступенчатой формы, параметры которого определяются расчётным методом.

Для определения динамических характеристик датчиков и повышения точности калибровки ДДД в ООО «ГТЛаб» (г. Саров) с использованием методических наработок ФГУП «ЦНИИмаш» (г. Королёв) была разработана методика калибровки ДДД на ударной трубе, а также была разработана и собрана система калибровки датчиков давления в ударной волне Т501.

Схема системы калибровки датчиков давления в ударной волне Т501 приведена на рис. 2. Основой установки является ударная труба 4 длиной 2200 мм и с внутренним диаметром 52 мм. Ударная труба состоит из отсека высокого давления (ОВД) 5 и отсека низкого давления (ОНД) 7, разделённых разрушаемой диафрагмой 6. При разрушении диафрагмы воздух с повышенным давлением из ОВД сжимает воздух в ОНД и формирует в нём воздушную ударную волну (ВУВ), распространяющуюся со сверхзвуковой скоростью. Пульт регулировки давления 3 позволяет создать давление в ОВД до 2,5 МПа. Импульс давления ВУВ имеет ступенчатую форму продолжительностью несколько миллисекунд и с длительностью фронта порядка 10^{-9} с, неравномерность давления за фронтом не превышает 1 %. На стенке трубы размещаются скоростные ДДД 9, служащие для определения скорости ВУВ. Барометр 1 и термометр 2 необходимы для определения атмосферных параметров, используемых для расчёта амплитуды и числа Маха ВУВ.

Калибруемый датчик 10 размещается на торцевой заглушке 8 заподлицо с её внутренней поверхностью. Сигнал, представляющий отклик датчика на воздействие ВУВ, поступает на вход вторичного преобразователя (11), в роли которого может выступать усилитель, аналоговый фильтр или согласующее устройство. Далее сигнал оцифровывается модулем сбора данных D001 (частота дискретизации — до 128 кГц, разрядность АЦП — 24 бита) или D002 (частота дискретизации — до 2 МГц, разрядность АЦП — 16 бит) 12 и с помощью специального ПО GTL непрерывно записывается в память ПК 13.

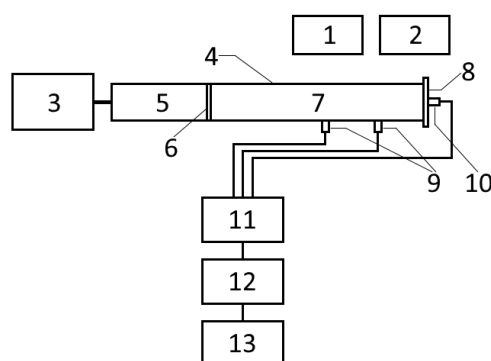


Рис. 2. Схема калибровочной установки Т501

Фотография ударной трубы установки Т501 приведена на рис. 3.

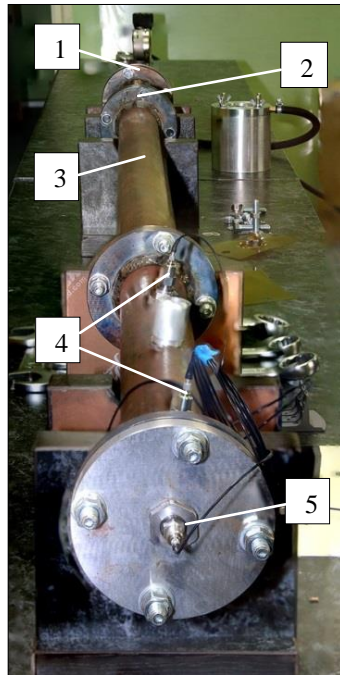


Рис. 3. Ударная труба установки Т501: 1 — ОВД; 2 — разрушаемая диафрагма; 3 — ОНД; 4 — скоростные ДДД; 5 — калибруемый ДДД

На основании законов сохранения массы и импульса при переходе потока газа через ударную волну, уравнения сохранения энергии и уравнения состояния идеального газа определена амплитуда импульса давления на фронте прямой ВУВ ΔP_2 , кПа [1, 2]:

$$\Delta P_2 = P_2 - P_1 = 2 \cdot \gamma \cdot P_1 \frac{M^2 - 1}{\gamma + 1}, \quad (1)$$

и амплитуда импульса давления на фронте отражённой от торца трубы ВУВ ΔP_5 , кПа:

$$\Delta P_5 = P_5 - P_1 = 2 \cdot \gamma \cdot P_1 \frac{(3\gamma - 1)M^4 - 4(\gamma - 1)M^2 - 3 + \gamma}{(\gamma^2 - 1)M^2 + 2(\gamma + 1)}, \quad (2)$$

где P_1 — начальное давление в ОНД, кПа; P_2 — давление на фронте прямой ВУВ, кПа; P_5 — давление на фронте отражённой ВУВ, кПа; γ — показатель адиабаты (для воздуха $\gamma = 1,4$); $M = V_s/a_1$ — число Маха ВУВ; V_s — скорость ВУВ, м/с; a_1 — скорость звука в ОНД, м/с. Формулы (1) и (2) справедливы при $M \leq 4$, пока величину γ можно считать постоянной. Таким образом, для определения величин давления за прямой и отражённой ударными волнами в ударной трубе необходимо:

- измерить скорость ВУВ V_s ;
- рассчитать скорость звука a_1 ;
- измерить начальное давление P_1 в ОНД.

Скорость ВУВ измеряется при помощи скоростных ДДД, размещённых на стенке трубы. Время прохождения ВУВ между датчиками определяется по записанным в память ПК осциллограммам сигналов с датчиков. В качестве примера на рис. 4 показаны осциллограммы калибровки ДДД 5V102TD. Интервалы времени движения ВУВ от первого и второго скоростных датчиков к калибруемому ДДД на заглушке обозначены как t_1 и t_2 соответственно.

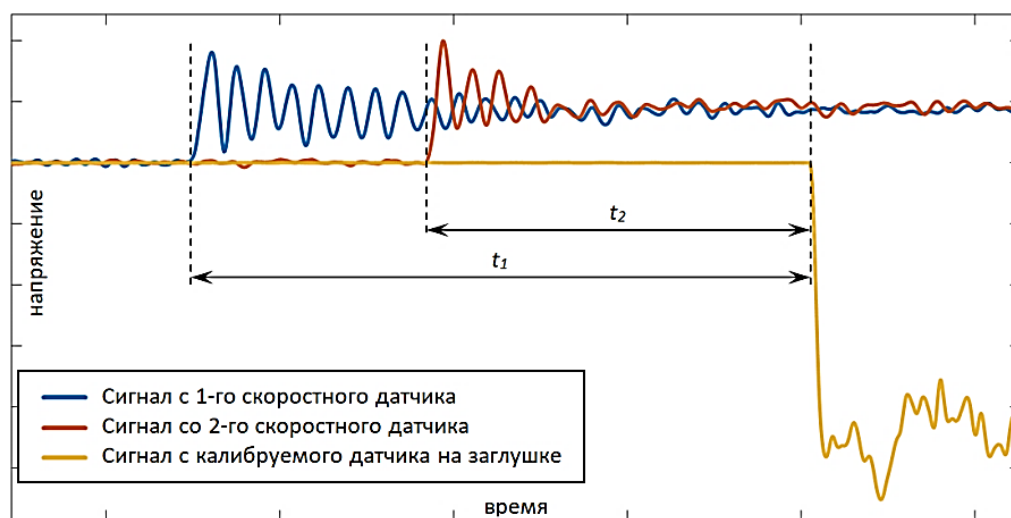


Рис. 4. Определение времени движения ВУВ от скоростных датчиков до калибруемого ДДД 5V102TD на заглушке

Скорость звука рассчитывается по температуре воздуха в ОНД трубы T , °С:

$$a_1 = (331,6 + 0,6 \cdot T). \quad (3)$$

Температура и давление в ОНД ударной трубы измеряются с помощью термометра и барометра, входящих в состав калибровочной установки.

После определения амплитуд прямой и отражённой ВУВ чувствительность калибруемого датчика S , мВ/кПа, может быть рассчитана по формуле:

$$S = \frac{U - U_0}{\Delta P}, \quad (4)$$

где U — установившееся значение напряжения с калибруемого датчика на фронте прямой или отражённой ВУВ, мВ; U_0 — коррекция смещения нуля калибруемого ДДД, мВ; ΔP — амплитуда импульса давления на фронте прямой или отражённой ВУВ, кПа. Пример определения установившегося напряжения на ДДД 5V102TD приведён на рис. 5.



Рис. 5. Определение установившегося напряжения на ДДД 5V102TD

Верхняя граница частотной характеристики датчика f_B , Гц, рассчитывается по формуле:

$$f_B = \frac{0,3}{T_H}, \quad (5)$$

где T_H — длительность нарастания фронта на осциллограмме отклика калибруемого ДДД на воздействие прямой ВУВ, с. Пример определения длительности нарастания фронта приведён на рис. 6.

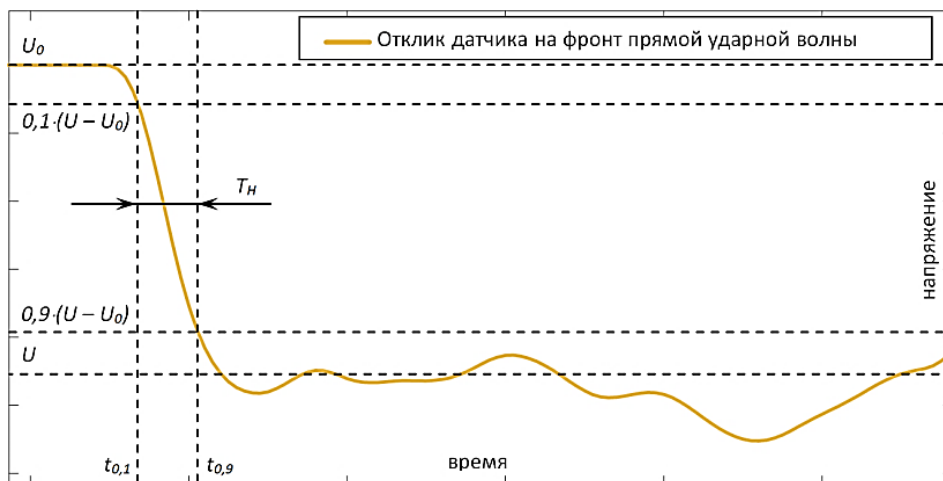


Рис. 6. Определение длительности нарастания фронта на осциллограмме отклика ДДД 5V102TD на воздействие прямой ударной волны

В таблице приведены результаты калибровки датчика 5V102TD на ударной трубе.

Таблица

Результаты калибровки датчика 5V102TD на ударной трубе

Номер эксперимента	1	2
Скорость ударной волны, м/с	518,6	522,7
Чувствительность (паспортные данные), мВ/кПа	3,51	
Чувствительность расчётная, мВ/кПа	3,79	3,85
Погрешность определения чувствительности, %	8	9,7
Длительность нарастания фронта, мкс	15	15
Верхняя граница рабочего диапазона частот, кГц	20	20

Наблюдается систематическая погрешность определения чувствительности датчика на ударной трубе относительно паспортных данных, определённых методом сброса давления на установках квазистатической калибровки. Это, предположительно, может быть связано с динамическим подъёмом отклика датчика при воздействии импульсов давления с коротким фронтом и требует дополнительных исследований.

Выводы

Таким образом, разработанная методика и калибровочная установка позволяют определять чувствительность и верхнюю границу рабочего диапазона частот ДДД. По мере накопления теоретических и экспериментальных данных методика будет дополняться, а в конструкцию системы Т501 будут вноситься изменения, направленные на улучшение технических характеристик. В частности, максимальное давление в ОВД ударной трубы будет увеличено до 15 МПа при использовании баллона сжатого воздуха. В ближайших планах — разработка методов определения на установке следующих характеристик ДДД:

- нестационарной чувствительности, зависящей от времени (чувствительность до завершения переходных процессов в датчике);
- переходной, импульсной и амплитудно-частотной характеристик;
- погрешности, определяемой переходными процессами в ДДД, вибропомехами, способом установки датчика и т.п.

Список литературы

1. Ефимов В.А. Режим работы ударной трубы при поверке преобразователей давления // Исследования в области механических измерений. ВНИИМ, 1978. Вып. 223 (283).
2. Ефимов В.А., Кабишев А.И. Расчёт параметров импульсного давления в ударных трубах // Измерительная техника. Сб. «Метрология». 1981. № 1.

3. Ефимов В.А., Плотников И.В. Установка с ударной трубой как средство воспроизведения размера единицы давления в динамическом режиме // Исследования в области механических измерений: сб. тр. ВНИИМ, 1978. Вып. 223 (283).

Статья поступила в редакцию: 22.09.2020 г.

Статья прошла рецензирование: 26.10.2020 г.

Статья принята в работу: 02.11.2020 г.