

УДК 533; 533.6

## **Определение амплитудно-частотных характеристик системы «термоанемометр + датчик» по лазерному импульсу\***

**Д.А. Бунтин, О.И. Вишняков, П.А. Поливанов, А.А. Сидоренко,  
Ю.В. Громыко**

*Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

E-mail: bountin@itam.nsc.ru

Предлагается экспериментальный способ определения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) термоанемометрической системы с помощью короткоимпульсного лазерного воздействия на чувствительный элемент датчика. Продемонстрирована возможность получения АЧХ данным способом. Получены АЧХ термоанемометров постоянного сопротивления двух производителей с двумя типами датчиков: поверхностным тонкопленочным и ниточным.

**Ключевые слова:** АЧХ, термоанемометр, тонкопленочный датчик.

### **Введение**

Термоанемометрия является одним из проверенных, надежных и широко используемых методов измерения характеристик потока. Схемы термоанемометров и свойства типовых датчиков достаточно хорошо изучены. Существуют теории, описывающие теплообмен датчика [1–3]. Производителями термоанемометров были предложены методики оценки диапазона частот для чувствительного элемента датчика по его временному отклику на тестовый электрический сигнал. Например, в рассматриваемом в работе термоанемометре AN1003 использовалась подача короткого импульса отрицательного напряжения на датчик [4].

Недостатки и ограничения термоанемометрического метода измерений также хорошо известны. Одной из проблем термоанемометрии является отсутствие надежной прямой экспериментальной методики определения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) системы «датчик + термоанемометр постоянного сопротивления» (ТПС), особенно для тонкопленочных датчиков, что затрудняет проведение количественных измерений амплитуд пульсаций потока таким типом датчиков.

---

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и правительства Новосибирской области № 22-21-20098, <https://rscf.ru/project/22-21-20098/>.

В настоящей работе демонстрируется относительно простой способ определения АЧХ системы «датчик+ТПС». Этот способ может быть использован как для определения АЧХ в лабораторных условиях (без потока), так и в аэродинамической трубе при параметрах потока, соответствующих экспериментальным. Указанный метод также позволяет сравнивать АЧХ термоанемометров разных производителей.

### **Известные методы определения АЧХ**

Отклик системы на нестационарное воздействие можно определять разными способами: с помощью подачи синусоидального сигнала разной частоты (см., например, [5, 6]), подачи прямоугольного сигнала [7], подачи дельтообразного импульса [4]. По отклику на подаваемое воздействие можно оценить АЧХ системы. В первом случае амплитуда, выдаваемая системой в ответ на гармоническое воздействие разной частоты, показывает АЧХ напрямую, в двух других случаях АЧХ системы можно получить, выполнив Фурье-преобразование отклика и сравнив его со спектром идеального воздействия (прямоугольным сигналом или коротким воздействием, моделирующим дельта-функцию).

Амплитудный спектр дельта-функции представляет собой константу для всех частот. Если смоделировать воздействие на систему в виде ультракороткого импульса с характерной частотой ( $1/t_{\text{импульса}}$ ) много больше исследуемой АЧХ системы, то такой импульс можно считать дельта-функцией и не учитывать его реальную ширину. Фурье-спектр отклика системы на такой сигнал и будет амплитудно-частотной характеристикой с точностью до нормировки.

В потоке газа или жидкости воздействия флуктуаций воздушного или водяного потока увеличивают или уменьшают отвод тепла от нагреветого датчика, заставляя электронную схему реагировать на возмущение для поддержания постоянства сопротивления датчика. Если оказать кратковременное тепловое воздействие на датчик термоанемометра, то по сигналу с прибора можно определить АЧХ системы «ТПС+датчик». В представленной работе в качестве кратковременного теплового воздействия был выбран импульс мощного лазера.

### **Экспериментальное оборудование**

В качестве источника теплового воздействия использовался лазер Litron Lasers NANO L135-15 с энергией в импульсе до 135 мДж и продолжительностью импульса около 10 нс. Это на несколько порядков величины меньше постоянной времени термоанеметрической системы, что с очень высокой точностью позволяет считать данный импульс дельта-функцией. В тестах использовались термоанемометры постоянного сопротивления ТПС18-8 (ИТПМ СО РАН) и AN-1003 (A.A. Lab System, Израиль). Отклик термоанемометра оцифровывался с помощью аналого-цифрового преобразователя L-Card 20-10 с частотой 2 МГц. Поскольку по диаметру лазерного луча мощность излучения меняется в соответствии с распределением Гаусса, возможно неравномерное прогревание чувствительных элементов датчиков. Для того, чтобы избежать неравномерности нагрева, диаметр луча увеличивался до размера, в несколько раз большего, чем линейный размер датчика, и составлял 5 мм, датчик располагался в центральной части луча.

В работе использовались датчики двух типов: ниточный и тонкопленочный. Ниточный датчик представлял собой стандартный датчик термоанемометра, изготовленный из вольфрамовой проволоки диаметром 10 мкм с длиной нити 1,8 мм. Применялись

Рис. 1. Тонкопленочный поверхностный датчик ПДА-10.

пленочные датчики двух видов: ПДА-10, изготовленный в ИТПМ СО РАН, и поверхностный датчик 55R47 фирмы Dantec Dynamics (Дания). Эксперименты проводились при перегреве, составляющем  $R_h/R_c = 1,75$  для ниточного датчика и 1,2 — для тонкопленочных датчиков, где  $R_c$  — сопротивление датчика при комнатной температуре,  $R_h$  — сопротивление нагретого датчика.

На рис. 1 представлен датчик ПДА-10. Он изготовлен на основе полиамидной пленки толщиной 50 мкм с напылением чувствительного элемента и подводящих электродов. Размеры чувствительного элемента составляют: длина — 1,5 мм, ширина — 110 мкм, толщина — 250 нм; толщина медных подводящих электродов — 5 мкм. Датчик покрывался защитным слоем диоксида кремния толщиной 200–300 нм.



## Результаты

Для настройки АЧХ ТПС обычно используется методика, состоящая в том, что на верх моста подается прямоугольный сигнал или короткий импульс напряжения непосредственно в цепь датчика [1, 2]. Отклик системы может иметь вид, показанный на рис. 2 [1, 5]. При настройке ТПС время отклика  $\tau_0$  определяет частотную характеристику системы с ниточным датчиком [5]:  $f_c = 1/(1,2 \cdot \tau_0)$  (для AN1003 [4]), где  $f_c$  — частота, при которой амплитуда в спектре сигнала термоанемометра падает на 3 дБ (см., например, [5]). Для работы ТПС настраивался таким образом, что время  $\tau_0$  для ниточного датчика составляло около 7 мкс. Таким образом, частотный диапазон для ниточного датчика  $f_c \approx 95$  кГц.

Однако в эксперименте частота  $f_c$  показала другое значение. На рис. 3 приведен пример отклика термоанемометра с тонкопленочным поверхностным датчиком ПДА-10 на импульсное воздействие лазерного излучения. Из графика видно, что происходит резкое падение выходного напряжения, вызванное быстрым нагревом датчика лазерным излучением. Чтобы сбалансировать мост, с помощью ТПС уменьшают ток в цепи, уменьшая тем самым нагрев датчика. Участок роста напряжения соответствует процессу остывания датчика за счет естественной теплопередачи. Так как эксперимент проводился

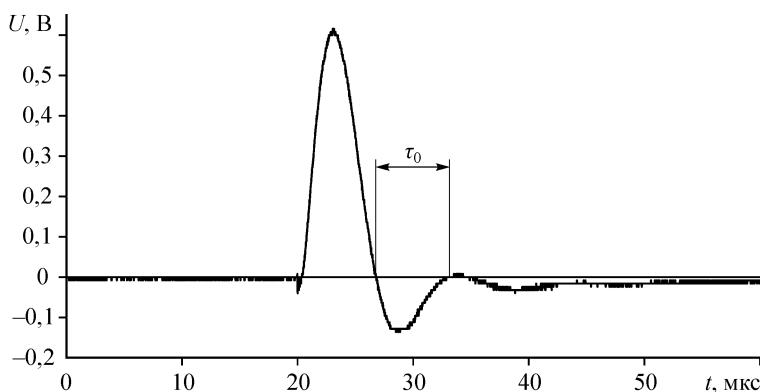


Рис. 2. Отклик ТПС на прямоугольный сигнал для настройки АЧХ.  
Ниточный датчик, ТПС AN-1003.

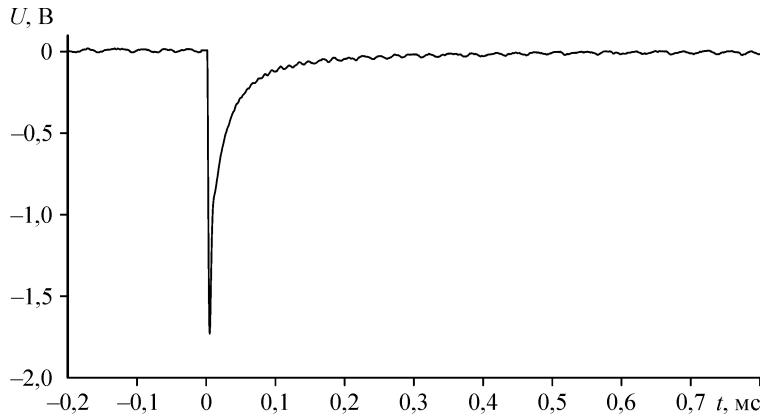


Рис. 3. Отклик ТПС на импульсное воздействие лазерного луча на датчик ПДА-10.

в отсутствие потока, остывание происходило за счет конвекции и теплопроводности, поэтому релаксация сопротивления датчика к начальному значению шла намного медленнее.

На рис. 4 в логарифмических координатах показаны Фурье-спектры отклика системы «ТПС + датчик» (рис. 3) на импульсное воздействие. Как было указано выше, для получения АЧХ необходимо разделить полученные спектры на спектр дельта-функции, т.е. на константу. Это позволяет определить АЧХ системы с точностью до нормировки. Было принято, что в области низких частот еще не происходит падения амплитуды отклика системы, вследствие чего все спектры нормировались на Фурье-амплитуду 20 Гц.

Можно видеть, что для ниточного датчика амплитуда не падает до примерно 300 Гц, дальше следует медленное уменьшение амплитуды до  $\approx 800$  Гц и затем — прямолинейное падение. Такое поведение является характерным для ниточного датчика термоанемометра (см., например, рис. 2.15 в работе [1], а также данные [2, 5]). Спектры обоих пленочных датчиков показывают, что амплитуда начинает заметно уменьшаться с частоты  $\approx 40$  Гц и непрерывно падает до конца измеряемого частотного диапазона. Такое поведение является также характерным для пленочных датчиков, что подтверждает рис. 2.21 из монографии [1].

Из рис. 4 видно, что АЧХ датчика 55R47 совпадает с АЧХ датчика ПДА-10 до 200 Гц, а затем убывает быстрее, оставаясь ниже до конца измеренного диапазона. По полученным данным была определена частота, при которой происходит падение амплитуды на 3 дБ. Для ниточного датчика  $f_c \approx 740$  Гц, для тонкопленочных —  $f_c \approx 70$  Гц.

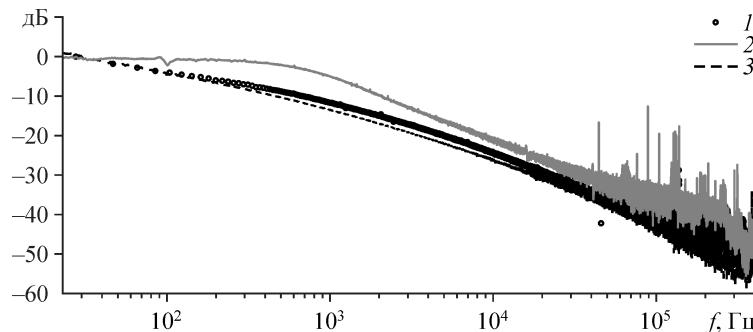


Рис. 4. Фурье-спектр отклика ТПС на импульсное лазерное воздействие на датчик.

1, 3 — соответственно тонкопленочные датчики ПДА-10 и 55R47,  
2 — ниточный датчик с  $d = 10$  мкм.

При использовании стандартной методики определения АЧХ для ниточного датчика по сигналу отклика было установлено, что  $f_c \approx 95$  кГц, т.е. на два порядка больше, чем экспериментально полученная (740 Гц). Столь сильное отличие принятой оценки АЧХ ТПС и экспериментально полученной АЧХ не ясны. Как показывает рис. 4, остывание датчика происходит крайне медленно, что и определяет ограничение постоянной времени и частотного диапазона. Одна из возможных причин медленного остывания заключается в том, что в эксперименте датчик целиком (вместе с ножками) находился в пятне лазерного излучения и, возможно, кроме самой проволочки, нагревались ножки, которые при остывании отдавали тепло в проволоку. Кроме того, датчик не обдувался потоком, и его остывание происходило за счет конвекции, которая является медленным процессом.

Изменение нормированной амплитуды спектра пульсаций в зависимости от частоты описывается следующей формулой [2]:

$$A(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f \tau)^2}}, \quad (1)$$

где  $\tau$  — постоянная времени датчика. Из этой формулы можно определить постоянную времени  $\tau$  измерительной системы «термоанемометр + датчик» по падению амплитуды на 3 ДБ:

$$\tau = 1/(2\pi f). \quad (2)$$

Для ниточного датчика данная величина, обозначенная как  $\tau_1$ , составила  $\tau_1 \approx 0,22$  мс, для пленочных —  $\tau_2 \approx 2,3$  мс; т.е. постоянные времени ниточного и тонкопленочного датчиков отличаются на порядок.

Если нарисовать АЧХ датчика в соответствии с формулой (1), подставив туда  $\tau_1 \approx 0,22$  мс, и сравнить с АЧХ системы «датчик + ТПС», то обнаружим, что начиная примерно с 4 кГц ТПС усиливает сигнал (рис. 5). Полученные данные можно интерпретировать следующим образом. Найденные значения постоянных времени термоанемометрической системы по своей величине соответствуют ожидаемым величинам постоянной времени датчиков. Это означает, что используемые в работе ТПС недостаточно хорошо усиливают сигнал в низкочастотной части. Тем не менее, хорошо видно, что в высокочастотной части спектра происходит усиление сигнала. Возможные причины отсутствия усиления сигнала на низких частотах связаны с тепловой инерцией, про которую упоминалось выше.

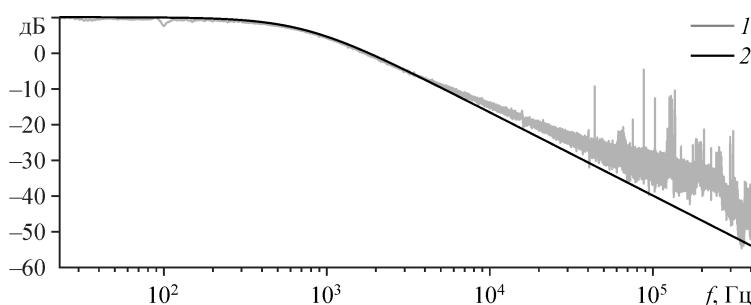


Рис. 5. Фурье-спектр отклика ТПС на импульсное лазерное воздействие на датчик (1) и теоретическая АЧХ ниточного датчика термоанемометра (2).

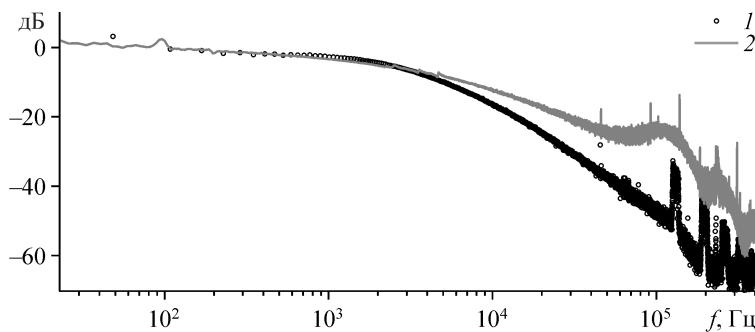


Рис. 6. Спектр отклика ТПС на импульсное лазерное воздействие на ниточный датчик.

1 — AN-1003, 2 — ИТПМ18-8.

На рис. 6 приведены данные для сравнения двух термоанемометров — AN-1003 (кривая 1) и ИТПМ18-8 (кривая 2) — с одинаковыми настройками и одним и тем же ниточным датчиком. Видно, что АЧХ термоанемометра ИТПМ18-8 заметно лучше, чем AN-1003, начиная с 4 кГц. Широкий пик в спектре ИТПМ18-8 на частоте около 110 кГц связан с возбуждением электрической схемы. Однако из настройки термоанемометра по форме отклика (рис. 4) подобное поведение АЧХ системы увидеть невозможно.

Аналоговый тест был проведен с пленочным датчиком ПДА-10, подводящими проводами и настройкой ( $\tau_0 = 5$  мкс). Получено, что АЧХ ТПС AN-1003 и ИТПМ18-8 не отличаются до 20 кГц. Однако далее АЧХ термоанемометра ИТПМ18-8 гораздо лучше, чем у AN-1003.

Таким образом, при одинаковых датчиках, подводящих проводах и настройках ТПС разных производителей дают разные АЧХ; стандартная настройка не позволяет увидеть немонотонное поведение АЧХ системы. Эти факты свидетельствуют о важности проведения прямых измерений АЧХ.

## Выводы

Авторами предложен усовершенствованный подход к определению АЧХ системы «датчик + ТПС». Предложенная методика позволяет быстро определить АЧХ системы вне зависимости от схемы прибора, а также провести калибровку в аэродинамическом потоке.

Получено, что тонкопленочные датчики разных производителей имеют хоть и близкое, но разное АЧХ. Показано, что ТПС двух разных производителей при подключении одного и того же датчика и при одинаковой настройке имеют расхождение в спектре отклика на импульсное воздействие, начиная уже с 4 кГц. Установлено, что АЧХ системы может быть немонотонно, однако при стандартной настройке термоанемометра обнаружить это невозможно. Получено, что принятая оценка частотного диапазона системы отличается от экспериментально измеренной на два порядка. Объяснений такому расхождению пока не найдено.

В целом полученные данные свидетельствуют о важности измерений АЧХ системы «термоанемометр + датчик» для корректного восстановления пульсаций в экспериментах.

## **Список литературы**

- 1. Bruun H.H.** Hot-wire anemometry: principles and analysis. Oxford University Press, 1995. 507 p.
- 2. Лебига В.А.** Термоанемометрия сжимаемых потоков. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1997. 81 с.
- 3. Хинце И.О.** Турбулентность. Ее механизм и теория. М.: Изд-во Физматлит, 1963. 680 с.
- 4. Инструкция к ТПС AN-1003 (A.A. Lab System).** 1993. С. 7.
- 5. Wood N.B.** A method for determination and control of the frequency response of the constant-temperature hot-wire anemometer // J. Fluid Mech. 1976. Vol. 67. P. 769–786.
- 6. Kegerise M.A., Spina E.F.** A comparative study of constant-voltage and constant-temperature hot-wire anemometers. Part II. The dynamic response // Exp. Fluids. 2000. Vol. 29. P. 165–177.
- 7. Knauss H., Roediger T., Bountin D.A., Smorodsky B.V., Maslov A.A., Srulijes J.** Novel sensor for fast heat-flux measurements // J. of Spacecraft and Rockets. 2009. Vol. 46, No. 2. P. 255–265.

*Статья поступила в редакцию 15 мая 2023 г.,  
после доработки — 25 июля 2023 г.,  
принята к публикации 21 ноября 2023 г.*