

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 626

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1095-1103

Экспериментальная проверка динамических характеристик системы измерения пульсационного давления

Генрих Васильевич Орехов¹, Михаил Константинович Складнев¹,
Александр Федорович Зубков²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Научно-исследовательский институт механики Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова (НИИ механики МГУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Динамическое давление измеряется во многих сферах жизнедеятельности человека. Разместить датчик непосредственно в точке приемника давления часто не представляется возможным. Приходится использовать соединительные трубки. Рассматривается диагностика измерительной системы для получения динамических характеристик потока в модели водосбросного тракта гидротурбины. Цель исследования — определение оптимальной длины соединительной трассы и проверка передаточных характеристик используемой измерительной системы.

Материалы и методы. Для диагностики измерительной системы создан специальный стенд. Программное обеспечение для обработки сигналов реализовано в среде графического программирования LabVIEW. Алгоритмом преобразования сигналов датчиков из области времени в область частот являлось дискретное преобразование Фурье. В измерительной системе применялись датчики давления XGZP6857A. Использовался аналого-цифровой преобразователь NI USB 6225. Калибровка выполнялась стандартным методом путем проведения «эталонных» экспериментов в аэродинамической установке AeroLab. Эталонным прибором стал дифференциальный цифровой манометр ЭКО-ИНТЕХ ДМЦ-01М.

Результаты. По итогам проведенных опытов получены значения пульсаций давления при шести различных длинах соединительных трубок. В экспериментах использовались соединительные трубки следующих длин: 20, 40, 70, 150, 400, 900 мм. Пульсации давления записывались в диапазоне от 0 до 70 Гц с шагом 10 Гц. При дальнейшем анализе сигналов были получены спектры пульсаций давления и зависимости амплитуды пульсаций давления от длины соединительной трубки.

Выводы. Описанный стенд может применяться для динамической калибровки датчиков давления в диапазоне частот до 70 Гц при различной длине соединительных трубок. Измерительная система, рассмотренная в статье, может быть использована для получения динамических характеристик потока в модели водосбросного тракта гидротурбины при применении медных соединительных трубок до 400 мм длиной.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: датчик давления, измерение давления, статическая и динамическая калибровка, соединительная трубка, частотный спектр сигнала, измерение пульсационного давления, стенд для динамической калибровки, длина трассы, пульсации давления

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Орехов Г.В., Складнев М.К., Зубков А.Ф. Экспериментальная проверка динамических характеристик системы измерения пульсационного давления // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 7. С. 1095–1103. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1095-1103

Автор, ответственный за переписку: Михаил Константинович Складнев, m.kons20@mail.ru.

Experimental verification of the dynamic characteristics of the pulsation pressure measurement system

Genrikh V. Orekhov¹, Mikhail K. Sklyadnev¹, Alexander F. Zubkov²

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

² Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Dynamic pressure is measured in many areas of human activity. It is often not possible to place a sensor directly at the pressure receiver point. Connecting tubes have to be used. This paper discusses the diagnostics of a measuring system for obtaining dynamic flow characteristics in a model of a hydraulic turbine spillway. The purpose of this study is to determine the optimal length of the pressure connecting line and to check the transfer characteristics of the measuring system used.

Materials and methods. A special stand was created for diagnostics of the measuring system. The software for signal processing is implemented in the LabVIEW graphical programming environment. The algorithm for converting sensor signals from the time domain to the frequency domain was the discrete Fourier transform (DFT). The measuring system used pressure sensors XGZP6857A. An analog-to-digital converter (ADC) NI USB 6225 was used. Calibration was performed using the standard method by conducting "reference" experiments in the AeroLab aerodynamic setup. The reference device is the differential digital pressure gauge ECO-INTECH DMC-01M.

Results. As a result of the experiments, pressure pulsation values were obtained for 6 different lengths of connecting tubes. The following lengths of connecting tubes were used in the experiments: 20, 40, 70, 150, 400, 900 mm. Pressure pulsations were recorded in the range from 0 to 70 Hz with a step of 10 Hz. During further analysis of the signals, pressure pulsation spectra and the dependence of the pressure pulsation amplitude on the length of the connecting tube were obtained.

Conclusions. The setup described in the paper can be used for dynamic calibration of pressure sensors in the frequency range up to 70 Hz with different lengths of connecting tubes. The measuring system discussed in the paper can be used to obtain dynamic characteristics of flow in the model of the hydraulic turbine spillway when copper connecting tubes up to 400 mm long are used.

KEYWORDS: pressure transducer, pressure measurement, static and dynamic calibration, connecting tube, signal frequency spectrum, pulsation pressure measurement, dynamic calibration stand, route length, pressure pulsations

FOR CITATION: Orekhov G.V., Sklyadnev M.K., Zubkov A.F. Experimental verification of the dynamic characteristics of the pulsation pressure measurement system. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(7):1095-1103. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1095-1103 (rus.).

Corresponding author: Mikhail K. Sklyadnev, m.kons20@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Динамическое давление измеряется во многих сферах жизнедеятельности человека: автомобильной промышленности, турбомашиностроении, аэродинамике, гидроэнергетике, различных производственных процессах, медицине и другом. Встречающиеся амплитуды варьируются от нескольких Па до нескольких ГПа, а частоты от менее одного Гц до примерно одного МГц [1–7]. Разместить датчик непосредственно в точке забора давления часто не представляется возможным. Приходится использовать соединительные трубки. Точность динамических измерений давления такой системы начинает сильно зависеть от размеров и геометрии соединительных элементов. Большинство существующих датчиков давления калибруются только на статическое давление [7–11]. Поэтому для измерения пульсаций давления в потоке жидкости нужно проверить динамические характеристики используемой системы сбора данных. В противном случае данные могут быть подвержены влиянию многих системных ограничений в частотных и амплитудных диапазонах сигналов давления, и они не смогут правдиво отражать гидродинамику исследуемого процесса [11–16].

В настоящей статье рассматривается диагностика измерительной системы для получения динамических характеристик потока в модели водосбросного тракта гидротурбины. В связи с особенностями эксперимента и конструкцией модели не было возможности разместить датчики непосредственно в точке забора давления. Поэтому потребовался соединительный элемент, в качестве которого была выбрана медная трубка с внутренним диаметром 1 мм. Рассматривался диапазон частот пульсаций от 0 до 70 Гц.

Цель исследования — определение оптимальной длины соединительного элемента и проверка качества применяемой измерительной системы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для диагностики измерительной системы создан специальный стенд, схема которого изображена на рис. 1.

Программное обеспечение для обработки сигналов реализовано в среде графического программирования LabVIEW.

Классический подход к спектральному анализу физических процессов основан на применении преобразования Фурье [17–20]:

$$\hat{p}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(t)e^{-2\pi ift} df,$$

где f — частота; $p(t)$ — сигнал; t — время; i — мнимая единица.

На практике приходится иметь дело с дискретными сигналами $p(t_i)$, полученными с некоторым временным шагом Δt . Алгоритм, который обеспечивает преобразование выборки сигнала из области времени в область частот, является дискретным преобразованием Фурье (ДПФ) [17–20]:

$$\hat{p}(f_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p(t_n) e^{\frac{2\pi i}{N} kn},$$

где k — k -й элемент спектральной составляющей; N — количество временных отсчетов; n — номер отсчета.

Фактически исходный сигнал представляется в виде ряда Фурье: набора гармоник с частотами, кратными частоте первой гармоники, и амплитудами, определяемыми с помощью преобразования Фурье исходного сигнала в пределах его периода.

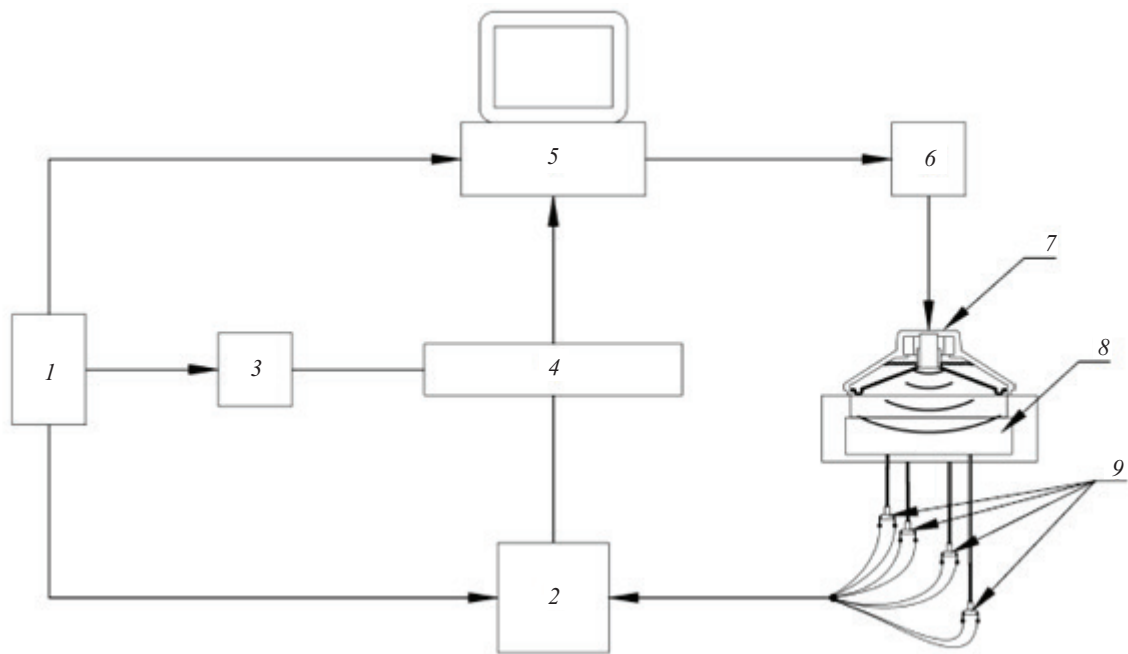


Рис. 1. Схема стенда для диагностики измерительной системы: 1 — сетевой фильтр питания; 2 — блок питания датчиков; 3 — блок питания аналого-цифрового преобразователя (АЦП); 4 — АЦП; 5 — персональный компьютер; 6 — усилитель звука; 7 — динамик; 8 — резервуар с водой; 9 — датчики давления

Fig. 1. Diagram of the stand for diagnostics of the measuring system: 1 — power line filter; 2 — sensor power supply; 3 — analog-to-digital converter (ADC) power supply; 4 — ADC; 5 — personal computer; 6 — sound amplifier; 7 — speaker; 8 — water tank; 9 — pressure sensors

Далее можно вычислить спектральную плотность мощности следующим образом [17–20]:

$$S_p(f_k) = \begin{cases} \frac{2}{N_s f_s} |\hat{p}(f_k)|^2, & f_k \neq 0, \quad f_{\max} \\ \frac{1}{N_s f_s} |\hat{p}(f_k)|^2, & f_k = 0, \quad f_{\max} \end{cases},$$

где N_s — количество временных отсчетов ($N - m$); $f_s = 1/\Delta t$ — частота дискретизации сигнала; $f_{\max} = f_s/2$ — максимальная частота разрешения спектра.

В измерительной системе использовались датчики давления XGZP6857A (рис. 2).

Их технические характеристики представлены в таблице.

Применяемый АЦП NI USB 6225 — 80-канальный модуль дифференциального ввода, разрешение 16 бит; максимальная частота опроса — 250 000 отсчетов/с.

Тарировка выполнялась стандартным методом путем проведения «эталонных» экспериментов.

Эталонным прибором является дифференциальный цифровой манометр ЭКО-ИНТЕХ ДМЦ-01М. Предел основной допускаемой абсолютной погрешности измерений не более $\pm(1 + 0,005\Delta P)$ Па. В результате калибровки были получены тарировочные зависимости для всех используемых при проведении исследований датчиков (рис. 3). Все полученные зависимости имеют линейный характер.

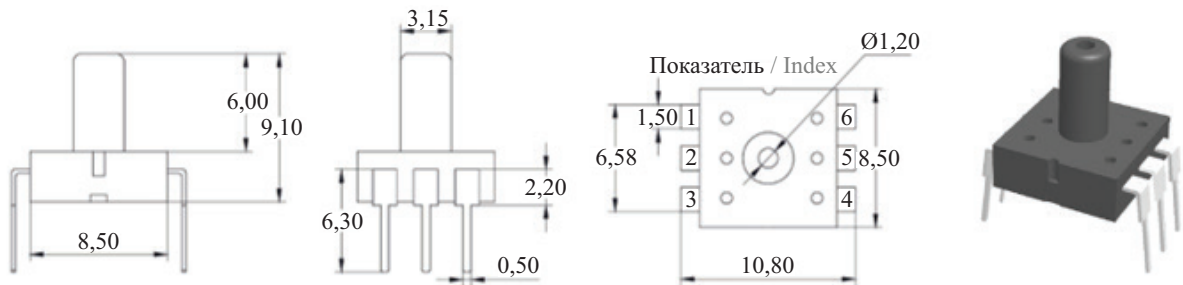


Рис. 2. Датчики давления XGZP6857A

Fig. 2. Pressure sensors XGZP6857A

Технические характеристики датчика давления XGZP6857A
Technical characteristics of the pressure sensor XGZP6857A

Тип датчика / Sensor type	Интегрированный / Integrated
Тип измеряемого давления / Type of pressure measured	Дифференциальный / Differential
P_{OP} , кПа / kPa	-40/+40
P_{MAX} , кПа / kPa	75
V_{CC} , В / V	4,75-5,25
T_A , °C	0-60
Корпус / Case	1351
Время отклика, мс / Response time, ms	2,5

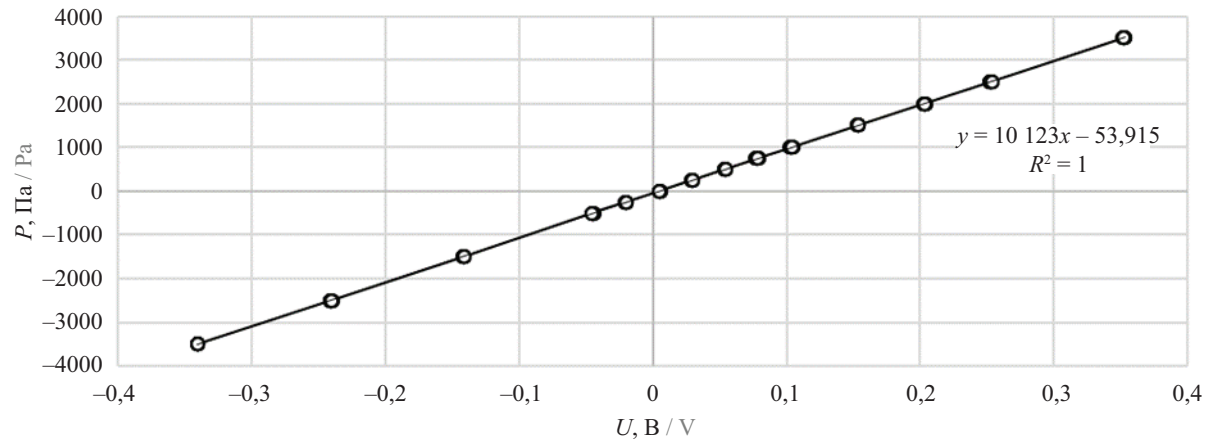


Рис. 3. Тарировочная зависимость одного из датчиков давления
Fig. 3. Calibration dependence of one of the pressure sensors

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате проведенных опытов получены значения пульсаций давления при шести различных длинах соединительных трубок. В экспериментах использовались соединительные трубки следующих длин: 20, 40, 70, 150, 400, 900 мм. Пульсации давления записывались в диапазоне от 0 до 70 Гц с шагом 10 Гц. Амплитудно-частотные характеристики

сигналов шести датчиков давления с различной длиной соединительной трубки от 20 до 900 мм представлены на рис. 4. На графике можно наблюдать фазовое смещение сигналов на датчиках с длиной соединительной трубки 400 и 900 мм. Также можно заметить уменьшение амплитуды пульсаций на длине трубки 900 мм. График пульсаций давления при частоте 70 Гц приведен на рис. 5.

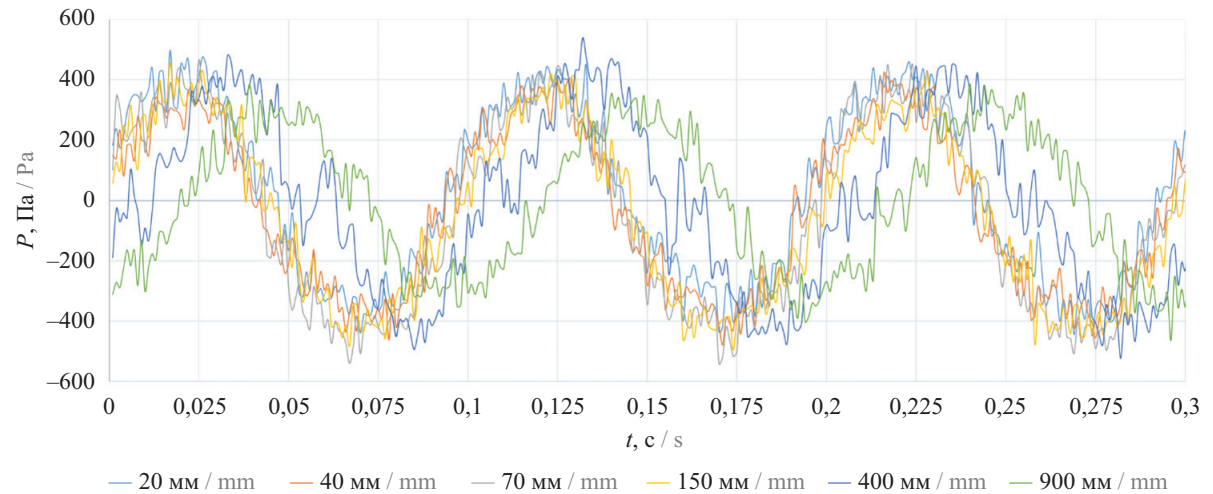


Рис. 4. Пульсации давления на частоте 10 Гц
Fig. 4. Pressure pulsations at a frequency of 10 Hz

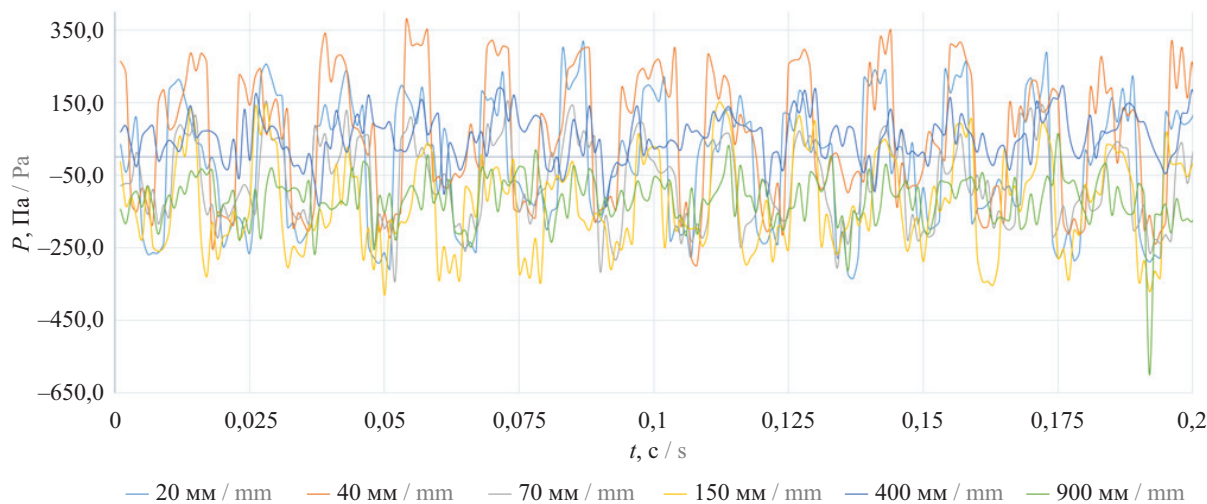


Рис. 5. Пульсации давления на частоте 70 Гц
Fig. 5. Pressure pulsations at a frequency of 70 Hz

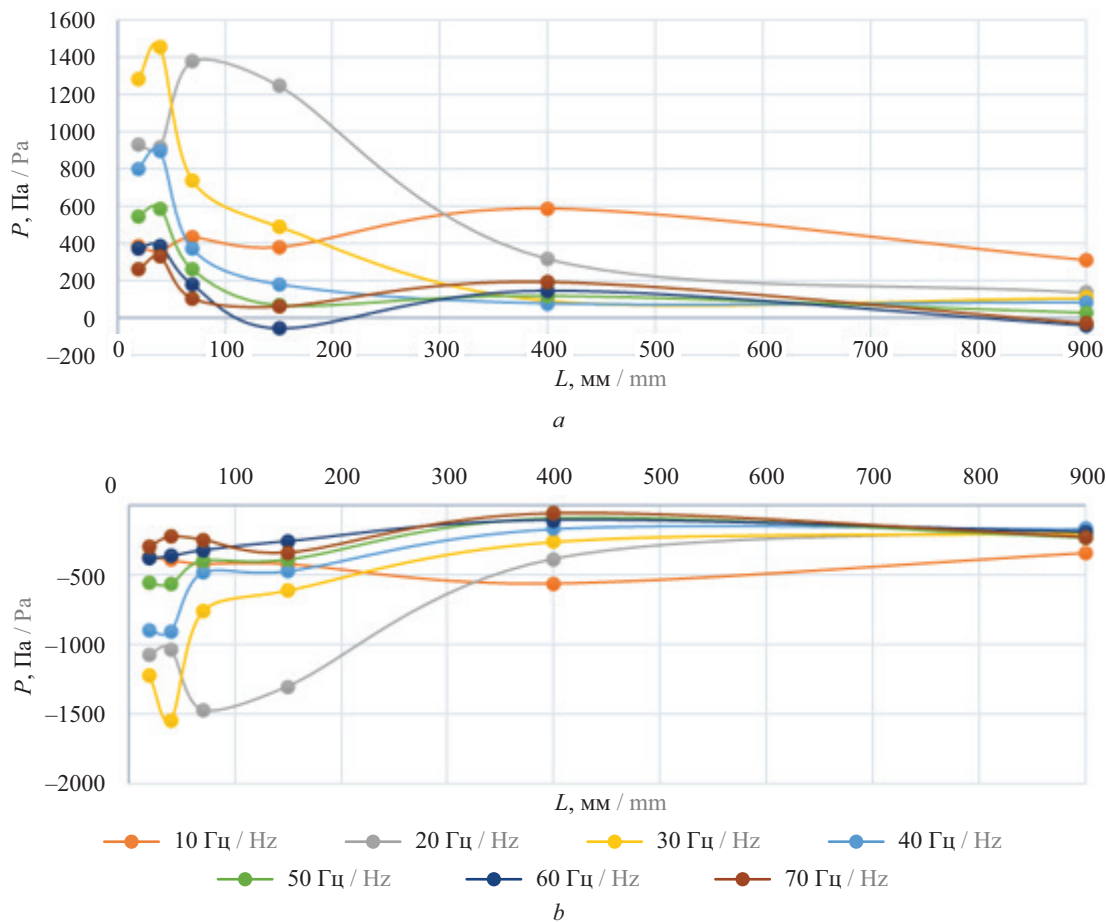


Рис. 6. Графики зависимости среднего давления от длины соединительной трубки: а — положительное давление; б — отрицательное давление
Fig. 6. Graphs of the dependence of average pressure on the length of the connecting tube: а — positive pressure; б — negative pressure

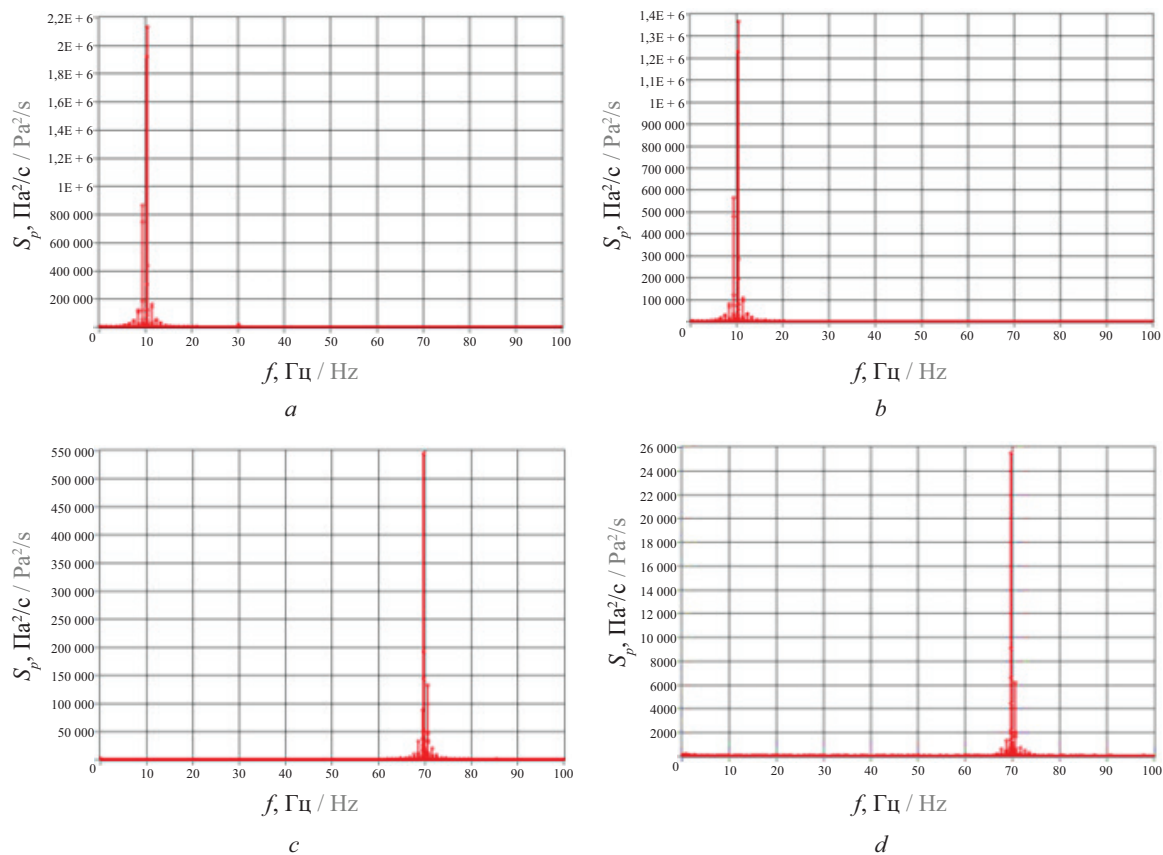


Рис. 7. Спектральная плотность мощности: *a* — длина соединительной трубки 20 мм, частота 10 Гц; *b* — длина соединительной трубки 900 мм, частота 10 Гц; *c* — длина соединительной трубки 20 мм, частота 70 Гц; *d* — длина соединительной трубки 900 мм, частота 70 Гц

Fig. 7. Power spectral density: *a* — length of connecting tube 20 mm frequency 10 Hz; *b* — length of connecting tube 900 mm frequency 10 Hz; *c* — length of connecting tube 20 mm frequency 70 Hz; *d* — length of connecting tube 900 mm frequency 70 Hz

На графике (рис. 5), так же как и на предыдущем, отмечается фазовое смещение и уменьшение амплитуды, но его уже можно наблюдать на более коротких трубках длиной 70 и 150 мм.

Проанализировав амплитудно-частотные характеристики, можно утверждать, что с увеличением длины соединительной трубки и частоты сигнала происходят уменьшение амплитуды пульсаций давления и фазовое смещение.

В результате дальнейшего анализа сигналов были получены зависимости амплитуды пульсаций давления от длины соединительной трубки (рис. 6).

Графики на рис. 6 подтверждают вышесказанное. Из них хорошо видно, что максимальную амплитуду пульсаций можно наблюдать при небольшой длине соединительных трубок до 250 мм и частотах от 0 до 50 Гц. При длине соединительных трубок больше 400 мм амплитуда пульсаций начинает мало зависеть от частоты и стремится к нулю. На частотах больше 50 Гц даже на самых коротких трубках амплитуда очень невелика по сравнению с более низкими частотами.

После преобразования выборки сигнала из области времени в область частот вычислена спектральная плотность мощности и построены спектры пульсаций давления (рис. 7).

Анализ графиков спектральной плотности мощности показывает, что на всем диапазоне длин соединительных трубок и генерируемых частот измерительная система улавливает частоту сигнала без искажений. С увеличением длины соединительной трубки и частоты уменьшается мощность сигнала. Уменьшение амплитуды при увеличении частоты возможно из-за особенностей динамика, с помощью которого генерировались пульсации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Описанный в статье стенд может использоваться для динамической калибровки датчиков давления в диапазоне частот до 70 Гц при различной длине соединительных трубок.

На амплитуду пульсаций давления сильно влияет как длина соединительных трубок, так и частота генерируемого сигнала. Максимальную амплитуду пульсаций можно наблюдать при небольшой длине соединительных трубок до 250 мм и частотах от 0 до 50 Гц. При длине соединительных трубок больше 400 мм амплитуда пульсаций начинает мало зависеть от частоты и стремится к нулю. На частотах больше 50 Гц даже

на самых коротких трубках амплитуда очень невелика по сравнению с более низкими частотами.

На всем диапазоне длин соединительных трубок от 20 до 900 мм и генерируемых частот от 0 до 70 Гц измерительная система улавливает частоту сигнала без искажений.

При прохождении сигнала через соединительные трубки длиной от 400 мм можно наблюдать его

фазовое смещение. Это говорит о нежелательном применении медных соединительных трубок длиной более 400 мм на практике.

Измерительная система, рассмотренная в статье, может быть использована для получения динамических характеристик потока в модели водосбросного тракта гидротурбины при применении медных соединительных трубок до 400 мм длиной.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Tey A.J.D., Vicarioli G.G., Rodríguez J.E.M.* Development of a dynamic standard of pressure // 18th International Congress of Metrology. 2017. P. 14002. DOI: 10.1051/metrology/201714002
2. *Gaetani P., Persico G.* Technology Development of Fast-Response Aerodynamic Pressure Probes // International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power. 2020. Vol. 5. Issue 2. P. 6. DOI: 10.3390/ijtp5020006
3. *Amer E., Jönsson G., Arrhen F.* Towards traceable dynamic pressure calibration using a shock tube with an optical probe for accurate phase determination // Metrologia. 2022. Vol. 59. Issue 3. P. 035001. DOI: 10.1088/1681-7575/ac5db5
4. *Kutin J., Svete A.* Connecting volume effects on dynamics of pneumatic pressure measurement systems // ACTA IMEKO. 2020. Vol. 9. Issue 5. P. 315. DOI: 10.21014/acta_imeko.v9i5.991
5. *Svete A., Kutin J.* Optimal dimensions of connecting tubes for dynamic measurements of pressure // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1065. P. 162006. DOI: 10.1088/1742-6596/1065/16/162006
6. *Pereira J.D.* Pressure Sensors: Working Principles of Static and Dynamic Calibration // Sensors. 2024. Vol. 24. Issue 2. P. 629. DOI: 10.3390/s24020629
7. *Bajsić I., Kutin J., Žagar T.* Response time of a pressure measurement system with a connecting tube // Instrumentation Science & Technology. 2007. Vol. 35. Issue 4. Pp. 399–409. DOI: 10.1080/107391-40701436579
8. *Dos Reis E., de Gaspari C.A.* On measuring dynamic pressure in multiphase flows // 19th International Congress of Mechanical Engineering. 2007.
9. *Venkatasubramanian V., Rengaswamy R., Yin K., Kavuri S.N.* A review of process fault detection and diagnosis // Computers & Chemical Engineering. 2003. Vol. 27. Issue 3. Pp. 293–311. DOI: 10.1016/s0098-1354(02)00160-6
10. *Elgeneidy K., Lohse N., Jackson M.* Bending angle prediction and control of soft pneumatic actuators with embedded flex sensors — a data-driven approach // Mechatronics. 2017. Vol. 50. Pp. 234–247. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2017.10.005
11. *Zeng W., Jacobi I., Beck D.J., Li S., Stone H.A.* Characterization of syringe-pump-driven induced pressure fluctuations in elastic microchannels // Lab on a Chip. 2015. Vol. 15. Issue 4. Pp. 1110–1115. DOI: 10.1039/c4lc01347f
12. *Theodoro F.R.F., da Costa Reis M.L.C., d'Andrade Souto C., de Barros E.* Dynamic calibration of pressure transducers employed in the aerospace sector : a literature survey // 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013). 2013.
13. *Svetea A., Ștefea M., Mačeka A., Kutin J., Bajsić I.* Dynamic pressure generator for dynamic calibrations at different average pressures based on a double-acting pneumatic actuator // Sensors and Actuators A: Physical. 2016. Vol. 247. Pp. 136–143. DOI: 10.1016/j.sna.2016.05.031
14. *Pieniążek J., Ciecinski P., Ficek D., Szumski M.* Dynamic Response of the Pitot Tube with Pressure Sensor // Sensors. 2023. Vol. 23. Issue 5. P. 2843. DOI: 10.3390/s23052843
15. *Kutin J., Svete A.* On the theory of the frequency response of gas and liquid pressure measurement systems with connecting tubes // Measurement Science and Technology. 2018. Vol. 29. Issue 12. P. 125108. DOI: 10.1088/1361-6501/aae884
16. *Li R., Lin S., Ge N., Gao L.* Nonembedded measurement method based on amplitude correction for unsteady surface pressure estimation in a high-subsonic compressor cascade // Measurement. 2023. Vol. 222. P. 113685. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113685
17. *Кузнецов С.А., Мясникова М.Г., Панов А.П., Цыпин Б.В.* Выбор методов спектрального оценивания для системы контроля динамических характеристик датчиков давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2015. № 2 (12). С. 45–51. EDN UKSFCJ.
18. *Бушуев О.Ю.* Применение метода Прони для анализа выходных сигналов преобразователей давления // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2012. № 23 (282). С. 219–221. EDN PBBCTB.
19. *Мясникова Н.В., Панов А.П., Цыпин Б.В.* Система для исследования характеристик датчиков динамического давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2013. № 4 (6). С. 32–36. EDN RWVLJT.

20. Бушуев О.Ю., Семенов А.С., Шестаков А.Л. Экспериментальная оценка динамических характеристик тензопреобразователей давления // Вестник

Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2011. № 1 (82). С. 88–97. EDN NDXJPB.

Поступила в редакцию 2 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 8 апреля 2025 г.

Одобрена для публикации 22 мая 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Генрих Васильевич Орехов** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-6900-2704; orehov_genrih@mail.ru;

Михаил Константинович Складнев — преподаватель кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 4021-4471, ORCID: 0000-0003-4188-268X; m.kons20@mail.ru;

Александр Федорович Зубков — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник; **Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (НИИ механики МГУ)**; 119192, г. Москва, Мичуринский пр-т, д. 1; SPIN-код: 9378-1416, PII ID: 10906, Scopus: 55411829200, ORCID: 0000-0001-8041-5350; 9392998@mail.ru.

Вклад авторов:

Орехов Г.В. — научное руководство, научное редактирование текста, доработка текста.

Складнев М.К. — идея, сбор и обработка материала, написание исходного текста, итоговые выводы.

Зубков А.Ф. — научное руководство, концепция исследования, научное редактирование текста, доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Tey A.J.D., Vicarioli G.G., Rodríguez J.E.M. Development of a dynamic standard of pressure. *18th International Congress of Metrology*. 2017; 14002. DOI: 10.1051/metrology/201714002
2. Gaetani P., Persico G. Technology Development of Fast-Response Aerodynamic Pressure Probes. *International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power*. 2020; 5(2):6. DOI: 10.3390/ijtp5020006
3. Amer E., Jönsson G., Arrhen F. Towards traceable dynamic pressure calibration using a shock tube with an optical probe for accurate phase determination. *Metrologia*. 2022; 59(3):035001. DOI: 10.1088/1681-7575/ac5db5
4. Kutin J., Svete A. Connecting volume effects on dynamics of pneumatic pressure measurement systems. *ACTA IMEKO*. 2020; 9(5):315. DOI: 10.21014/acta_imeko.v9i5.991
5. Svete A., Kutin J. Optimal dimensions of connecting tubes for dynamic measurements of pressure. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018; 1065:162006. DOI: 10.1088/1742-6596/1065/16/162006
6. Pereira J.D. Pressure Sensors: Working Principles of Static and Dynamic Calibration. *Sensors*. 2024; 24(2):629. DOI: 10.3390/s24020629
7. Bajsić I., Kutin J., Žagar T. Response time of a pressure measurement system with a connecting tube. *Instrumentation Science & Technology*. 2007; 35(4):399-409. DOI: 10.1080/10739140701436579
8. Dos Reis E., de Gaspari C.A. On measuring dynamic pressure in multiphase flows. *19th International Congress of Mechanical Engineering*. 2007.
9. Venkatasubramanian V., Rengaswamy R., Yin K., Kavuri S.N. A review of process fault detection and diagnosis. *Computers & Chemical Engineering*. 2003; 27(3):293-311. DOI: 10.1016/s0098-1354(02)00160-6
10. Elgeneidy K., Lohse N., Jackson M. Bending angle prediction and control of soft pneumatic actuators with embedded flex sensors — a data-driven approach. *Mechatronics*. 2017; 50:234-247. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2017.10.005
11. Zeng W., Jacobi I., Beck D.J., Li S., Stone H.A. Characterization of syringe-pump-driven induced pressure fluctuations in elastic microchannels. *Lab on a Chip*. 2015; 15(4):1110-1115. DOI: 10.1039/c4lc01347f
12. Theodoro F.R.F., da Costa Reis M.L.C., d'Andrade Souto C., de Barros E. Dynamic calibration of pressure transducers employed in the aerospace sector : a literature survey. *22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013)*. 2013.
13. Svetea A., Ștefea M., Mačeka A., Kutin J., Bajsić I. Dynamic pressure generator for dynamic calibrations at different average pressures based on a double-acting pneumatic actuator. *Sensors and Actuators A*:

Physical. 2016; 247:136-143. DOI: 10.1016/j.sna.2016.05.031

14. Pieniżek J., Ciecinski P., Ficek D., Szumski M. Dynamic Response of the Pitot Tube with Pressure Sensor. *Sensors*. 2023; 23(5):2843. DOI: 10.3390/s23-052843

15. Kutin J., Svete A. On the theory of the frequency response of gas and liquid pressure measurement systems with connecting tubes. *Measurement Science and Technology*. 2018; 29(12):125108. DOI: 10.1088/1361-6501/aae884

16. Li R., Lin S., Ge N., Gao L. Nonembedded measurement method based on amplitude correction for unsteady surface pressure estimation in a high-subsonic compressor cascade. *Measurement*. 2023; 222:113685. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113685

17. Kuznetsov S.A., Myasnikova M.G., Panov A.P., Tsypin B.V. Choice of methods of spectral evaluation

for checking of dynamic descriptions of pressductors. *Measuring. Monitoring. Management. Control*. 2015; 2(12):45-51. EDN UKSFCJ. (rus.).

18. Bushuev O.Yu. Use of Prony's method when analyzing the signal of a pressure transducer. Bulletin of the South Ural State University. *Series Computer Technology, Automatic Control, Radio Electronics*. 2012; 23(282):219-221. EDN PBBCTB. (rus.).

19. Myasnikova N.V., Panov A.P., Tsypin B.V. System for research of characteristics of sensors dynamic civil pressure. *Measuring. Monitoring. Management. Control*. 2013; 4(6):32-36. EDN RWVLJT. (rus.).

20. Bushuev O.Y., Semenov A.S., Shestakov A.L. Experimental evaluation of dynamic characteristics of pressure strain gauge transducers. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. *Series Instrument Engineering*. 2011; 1(82):88-97. EDN NDXJPB. (rus.).

Received March 2, 2025.

Adopted in revised form on April 8, 2025.

Approved for publication on May 22, 2025.

B I O N O T E S: **Genrikh V. Orekhov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6900-2704; orehov_genrih@mail.ru;

Mikhail K. Sklyadnev — lecturer of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 4021-4471, ORCID: 0000-0003-4188-268X; m.kons20@mail.ru;

Alexander F. Zubkov — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior research fellow; **Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University**; 1 Michurinsky prospect, Moscow, 119192, Russian Federation; SPIN-code: 9378-1416, ID RSCI: 10906, Scopus: 55411829200, ORCID: 0000-0001-8041-5350; 9392998@mail.ru.

Contribution of the authors:

Genrikh V. Orekhov — scientific leadership, scientific text editing, text revision.

Mikhail K. Sklyadnev — idea, collection of material, processing of material, writing the original text, final conclusions.

Alexander F. Zubkov — scientific leadership, research concept, scientific text editing, text revision.

The authors declare no conflicts of interests.