

# Методы измерения геометрических параметров измерительных участков ультразвуковых расходомеров

Б. В. Абушинова

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

abushinova.baina@yandex.ru

А. С. Титов

Группа компаний «Взлёт»,  
СЗИУ РАНХиГС

aleks.titov.work@gmail.com

М. Ю. Шестопалов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)

shestopalov\_08@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются основные методы измерения геометрических параметров измерительных участков ультразвуковых расходомеров. Акцент делается на сравнении двух ключевых методов: механическом в сочетании с оптическим и 3D-сканировании. Освещены принципы работы каждого метода, их преимущества и недостатки, а также потенциал для улучшения точности измерений ультразвуковых расходомеров.

**Ключевые слова:** ультразвуковые расходомеры; измерительные участки; первичный преобразователь; механический метод; 3D-сканирование

## I. ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных аспектов эффективного функционирования время-импульсных ультразвуковых расходомеров с учётом соответствия современным метрологическим требованиям к неопределённости измерений является проведение высокоточных геометрических измерений параметров измерительного участка, так как математические модели, лежащие в основе работы таких расходомеров, напрямую зависят от точности определения данных параметров. Расхождения в данных о диаметре трубопровода, угле установки датчиков и расстоянии между ними, могут привести к значительным ошибкам в измерении расхода при эксплуатации приборов.

## II. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

На сегодняшний день измерение расхода жидкости и газа является одной из важных и востребованных задач в различных областях промышленности [1], коммунального хозяйства, медицинских [2], экологических и иных научных исследований [3–5]. Согласно статистике более 75 % приборов для измерения расхода используется именно в области промышленности [5, 6]. Одними из наиболее распространённых являются ультразвуковые расходомеры, поскольку подходят для труб большого диаметра, имеют широкий диапазон измерений, обладают достаточной точностью. Также одним из плюсов является низкое гидродинамическое сопротивление [7, 8].

Время-импульсные ультразвуковые расходомеры работают на измерении разности во времени между прохождением импульсов ультразвука, генерируемых вторичным измерительным преобразователем (ВП), на электроакустические преобразователи (ПЭА) 1 и 2 через измеряемую среду по потоку и против потока (рис. 1) [10].

Среда, двигаясь с определенной скоростью, влияет на направление и скорость движения ультразвуковой волны: скорость прохождения уменьшается, происходит задержка времени прохождения волны при движении против потока, и, наоборот, по потоку скорость увеличивается, и время прохождения уменьшается. На этом принципе основывается вычисление объёмного расхода время-импульсными ультразвуковыми расходомерами [10].

В данном случае значение расхода вычисляется в соответствии с выражением:

$$Q = v \times \pi \times D^2 / 4, \quad (1)$$

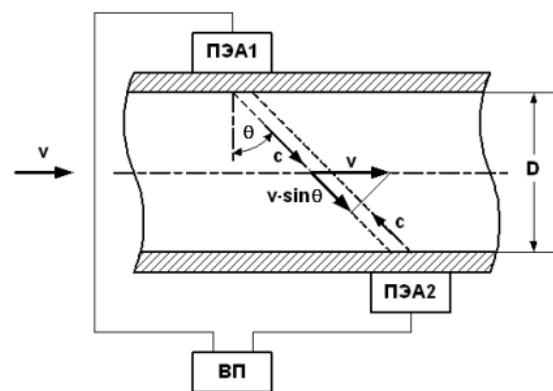


Рис. 1. Схема прохождения ультразвукового сигнала

где  $v$  – скорость жидкости, усредненная вдоль ультразвукового луча, вычисляемая по (2);  $D$  – внутренний диаметр трубопровода (первичного преобразователя/ измерительного участка (ИУ)).

$$v = [(T_{П2} - T_{П1}) - dT_0] \times c^2 / (2D \times tg\theta), \quad (2)$$

где  $\theta$  – угол между осевой базой и базой прибора.

Так как прямое измерение угла  $\theta$  в ИУ является затруднительным, производители приборов используют косвенные измерения (механически-оптический метод).

### III. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИУ

Согласно (1), для определения объемного расхода необходимы измерения внутреннего диаметра измерительного участка и скорости жидкости, на которую влияет угол  $\theta$  [11].

Геометрические параметры первичного преобразователя расхода определяются при выпуске из производства и включают в себя (рис. 2):

- среднее значение наружного диаметра ИУ –  $D_n$ ;
- толщину стенки ИУ –  $H$ ;
- базу прибора –  $L_p$  (расстояние между центрами излучающих поверхностей ПЭА);
- осевую базу прибора –  $L_o$  (расстояние между центрами излучающих поверхностей ПЭА вдоль оси ИУ).

Результаты определения этих параметров вносят в программное обеспечение расходомера для проведения расчетов при последующем вычислении расхода.

### IV. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ

На сегодняшний день большая часть предприятий, выпускающих приборы учета жидкости и газов, для определения геометрических параметров измерительного участка используют механический метод в сочетании с оптическим, где по измерениям наружного диаметра и толщине стенки вычисляют внутренний диаметр. Данные методы отличаются не самыми высокими показателями погрешности, что в дальнейшем влияет на абсолютную погрешность расхода, вычисляемую прибором [11–13].

В последнее время набирает популярность метод 3D-сканирования для получения точных данных о геометрии объектов [14–16]. В данном случае 3D-сканированию подвергаются измерительные участки.

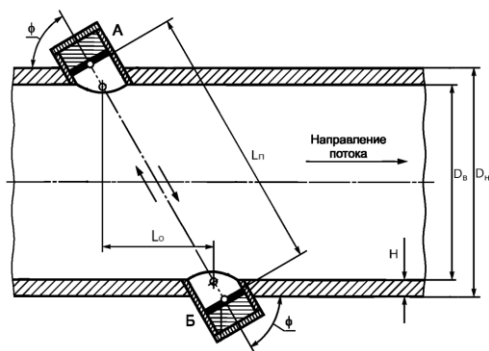


Рис. 2. Геометрические параметры ИУ

Этот метод основан на использовании 3D-сканера, который собирает точечные данные о поверхности объекта, используя расстояние от источника лазера до объекта по импульсному (по задержке времени) или

фазовому (по сдвигу фаз) методу, и преобразует их в трехмерную модель.

### V. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ТОЧНОСТЬ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАСХОДОМЕРА

В рамках работы поставлен эксперимент по сравнению двух методов нахождения геометрии ИУ.

В ходе эксперимента был использован ультразвуковой расходомер ВЗЛЕТ МР УРСВ-544Ц с врезными электроакустическими датчиками. Характеристики данного расходомера представлены в табл. 1.

Измерения механическим в сочетании с оптическим способами проводились с помощью средств измерений и приспособлений, указанных в табл. 2.

Процесс измерения в механическо-оптическом методе состоит из нескольких этапов:

Длина окружности ИУ измеряется с помощью циркуметра.

Толщина стенки измеряется толщиномером.

Наружный диаметр ИУ вычисляется путем математических преобразований.

База прибора расходомера измеряется нутромером согласно рис. 2.

Осевая база  $L_o$  измеряется дальномером с использованием линейки с уровнем, накладного приспособления, показывающего центральную ось ПЭА, и лазерного нивелира, как показано на рис. 3. На этом этапе велика вероятность возникновения погрешности, вносимой оператором.

Результаты измерений показаны в табл. 3.

Измерения методом 3D-сканирования проводились с помощью 3D-сканера Shining 3D-FreeScan UE Pro, обладающего точностью сканирования до 0,02 мм и глубиной сканирования 170-680 мм.

ТАБЛИЦА I. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗЛЕТ МР УРСВ-544Ц

Измерительные каналы	4
Схема зондирования	четырёхлучевая
Количество измерительных участков	1
Диаметр прохода трубопровода, DN	800
Наибольшее давление в трубопроводе, МПа	1,6

ТАБЛИЦА II. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Наименование и тип оборудования	Обозначения, ГОСТ
Нутромер микрометрический	НМ 150-1250 0,01
Толщиномер ультразвуковой	«ВЗЛЕТ УТ» ТУ 4213-040-44327050
Нивелир лазерный	Bosch GLL 3-80
Дальномер	Leica Disto D81
Уровень	ЛМ14-1500
Линейка с уровнем	Wolfcraft 4050
Циркометр	Ц700 ISO 276

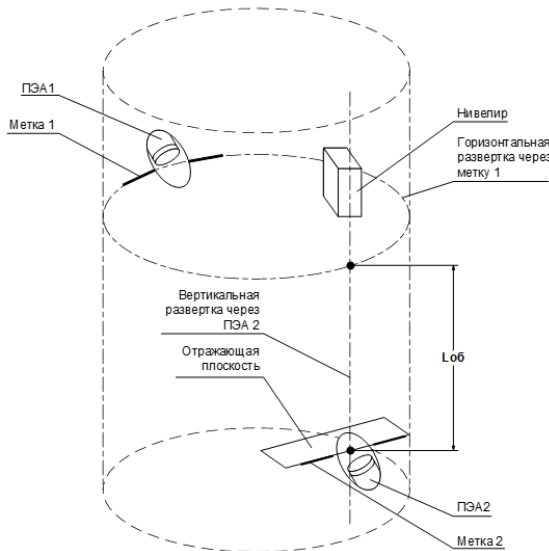


Рис. 3. Схема измерения осевой базы

Сканер предварительно настраивается и калибруется. ИУ ультразвукового расходомера предварительно подготавливается: ИУ монтируется на стабильной платформе, устанавливаются маркеры, необходимые для автоматического совмещения полученных результатов сканирования.

Сам процесс сканирования включает в себя направление лучей сканера на измерительный участок и сбор точечных данных о его поверхности. Наибольшее внимание уделяется патрубкам и ПЭА, так как для получения осевой базы и базы прибора необходимо получить плоскость и ось ПЭА.

Полученные данные обрабатываются специализированным программным обеспечением для создания трехмерной модели расходомера.

Данная модель позволяет напрямую определить необходимые для корректной работы расходомера геометрические параметры, такие как внутренний диаметр, база прибора, осевая база.

Измеренные значения базы прибора, осевой базы и внутреннего диаметра методом 3D-сканирования представлены на рис. 4–6.

Сравнение полученных двумя способами измерений представлено в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИУ

Геометрический параметр, мм	Механический + оптический	3D-сканирование	Откл.	
Длина окружности	2567,5	-		
Диаметр наружный	817,26	-		
Толщина стенки	9,84	-		
Диаметр внутренний	797,58	797,7	0,12	
База прибора	1 канал	1033	1033,6	0,6
	2 канал	1035	1035,2	0,2
	3 канал	1032	1032,5	0,5
	4 канал	1032	1034,7	2,7
Осевая база	1 канал	688	701,5	13,5
	2 канал	691	703,9	12,9
	3 канал	691	701,2	10,2
	4 канал	692	702,3	10,3

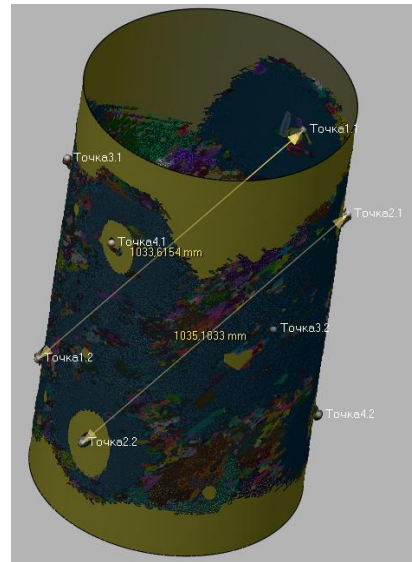


Рис. 4. Измерение базы прибора методом 3D-сканирования для 1 и 2 канала ИУ

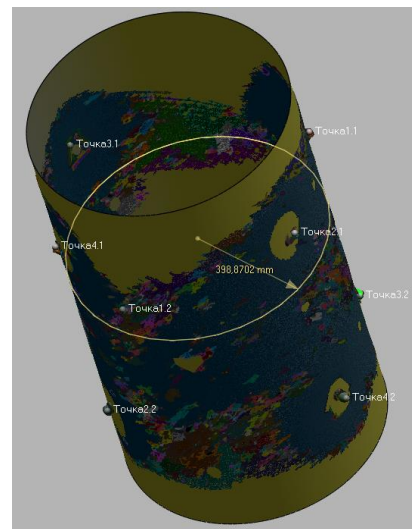


Рис. 5. Измерение внутреннего диаметра ИУ методом 3D-сканирования

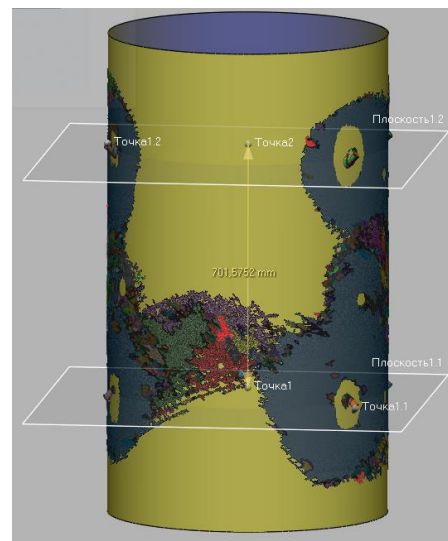


Рис. 6. Измерение осевой базы методом 3D-сканирования для 1 канала ИУ

С помощью проливной установки методом непосредственного сличения были определены отклонения измерений от эталонного значения расхода жидкости при геометрических параметрах, измеренными двумя способами. Обобщенные результаты представлены в табл. 4.

ТАБЛИЦА IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА

Механический + оптический метод				
Тип расхода	Эталонный расход, м <sup>3</sup> /час	Измеренный расход, м <sup>3</sup> /час	Откл., абс., м <sup>3</sup> /час	Откл., %
Высокий	9757.8	9765	7.2	0.07
Средний	4601.2	4588.6	-12.6	-0.27
Низкий	1028.5	1032.6	4.1	0.40
3D-сканирование				
Тип расхода	Эталонный расход, м <sup>3</sup> /час	Измеренный расход, м <sup>3</sup> /час	Откл., абс., м <sup>3</sup> /час	Откл., %
Высокий	8892.9	8897.4	4.5	0.05
Средний	3934.9	3941.1	6.2	0.16
Низкий	593.0	593.5	0.6	0.09

Метод непосредственного сличения (табл. 4) показал, что благодаря высокой точности 3D-сканера и простоте производимых измерений геометрических параметров ИУ, метод измерений геометрии при помощи 3D-сканирования обладает большей точностью и улучшает точностные характеристики ультразвукового расходомера, максимально приблизив их к результатам измерений методом непосредственного сличения с эталоном расхода.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение метода 3D-сканирования для определения геометрических параметров измерительных участков ультразвуковых расходомеров представляет собой значительный прогресс в сравнении с традиционными механическими методами измерения. Этот подход обеспечивает ряд преимуществ, обусловленных как техническими аспектами самой методики, сокращением времени измерения, так и её влиянием на точность и надёжность получаемых результатов.

В первую очередь, использование 3D-сканирования позволяет напрямую измерять внутренний диаметр трубопровода, минуя необходимость вычислений, связанных с определением наружного диаметра и толщины стенок. Это устраняет потребность в применении большого количества средств измерений, снижая таким образом количество потенциальных источников ошибок.

Кроме того, метод 3D-сканирования значительно уменьшает вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором, поскольку автоматизированный процесс сканирования и обработки данных требует минимального вмешательства оператора. Это приводит к повышению точности и повторяемости измерений.

В результате проведенного экспериментального исследования на проливной установке по сравнению влияния методов измерения геометрических параметров ИУ расходомера на точность измерения расхода сделан

вывод, что измерения, проведённые с помощью 3D-сканирования, демонстрируют более высокую точность измерения геометрических параметров ИУ по сравнению с традиционным механическим методом, что в конечном итоге приводит к снижению погрешности измерения расхода.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Mohammed S., Abdulkareem L., Roshani G.H., Eftekhari-Zadeh E., Haso E. Enhanced Multiphase Flow Measurement Using Dual Non-Intrusive Techniques and ANN Model for Void Fraction Determination. *Processes*, 2022, vol. 10(11), p.2371. DOI:10.3390/pr10112371.
- [2] Gilbey J.D. Measurement of gas flow and volume. *Physics*, 2023, vol. 24, I. 12, pp. 776–780. DOI: 10.1016/j.mpaic.2023.09.016.
- [3] Doan T.M.H., Nguyen V.L., Radushinsky D. Impact of greening projects on the development of human capital in Vietnam's cities. *ITESE*, 2019, vol. 135. DOI: 10.1051/e3sconf/201913504054.
- [4] Marinin M.A., Marinina O.A., Rakhmanov R.A. Methodological approach to assessing influence of blasted rock fragmentation on mining costs. *Gornyi Zhurnal*, 2023 vol. 9, pp. 28-34. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.04.
- [5] Yury I., Martirosyan A. The development of the sodenberg electrolyzer electromagnetic field's state monitoring system. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, p. 3501. DOI: 10.1038/s41598-024-52002-w.
- [6] Sun B., Chen S., Liu Q., Lu Y., Zhang C., Fang H. Review of sewage flow measuring instruments. *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 12, I. 2, pp. 2089–2098. DOI: 10.1016/j.asej.2020.08.031.
- [7] Radoushinsky D., Gogolinskiy K., Dellal Y., Sytko I., Joshi A. Actual Quality Changes in Natural Resource and Gas Grid Use in Prospective Hydrogen Technology Roll-Out in the World and Russia. *Sustainability*, 2023, vol. 15. DOI: 10.3390/su152015059.
- [8] Rajita G., Mandal N. Review on transit time ultrasonic flowmeter. [2016 2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy & Communication (CIEC)]. *IEEE*, 2016, pp. 88–92. DOI: 10.1109/CIEC.2016.7513740.
- [9] Lynnworth L.C., Liu Y. Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955–2005. *Ultrasonics*, 2007, vol. 44, pp.1371–1378. DOI: 10.1016/j.ultras.2006.05.046.
- [10] Mousavi S. F., Hashemabadi S. H., Jamali J. Calculation of geometric flow profile correction factor for ultrasonic flow meter using semi-3D-simulation technique. *Ultrasonics*, 2020, vol. 106, 106165. DOI: 10.1016/J.ULTRAS.2020.106165.
- [11] Luca A., Marchiano R., Chassaing J.-C. Numerical simulation of transit-time ultrasonic flowmeters by a direct approach. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2016, vol. 63, I. 6, pp. 886–897. DOI: 10.1109/TUFFC.2016.2545714
- [12] Sanderson M.L., Yeung H. Guidelines for the use of ultrasonic non-invasive metering techniques. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2002, vol. 13, I. 4, 125–142, DOI:10.1016/S0955-5986(02)00043-2.
- [13] Wang C., Meng T., Hu H., Zhang L. Accuracy of the ultrasonic flow meter used in the hydroturbine intake penstock of the Three Gorges Power Station. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2012, vol. 25, pp. 32–39. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2011.12.003
- [14] Ilyushin Y., Afanaseva O. Spatial Distributed Control System Of Temperature Field: Synthesis And Modeling. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2021, vol. 16 I. 14, pp. 1491-1506.
- [15] Vozár M., Pätöprstý B., Hrušecký R. Comparison of Tactile and Optical Measurement Methods Using Precise Geometrical Shape. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2024, vol. 25, I. 3, pp. 565–570. DOI: 10.1007/s12541-023-00943-z
- [16] Kar S., Tripathi A., Singh J., Ramkumar J. Comparison of dimensional accuracy of elastomeric impression materials using 3D laser scanner. *Medical Journal Armed Forces India*, 2022, vol.78, pp. 55–60. DOI: 10.1016/j.mjafi.2021.05.019