

10

Использование квадратичных эффектов для измерения скорости потока среды ультразвуковым времяимпульсным методом

© Д.И. Макарьев

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия
E-mail: dmakarev@rambler.ru

Поступило в Редакцию 12 мая 2026 г.

В окончательной редакции 3 июля 2026 г.

Принято к публикации 6 июля 2026 г.

Предложена модификация ультразвукового времяимпульсного метода измерения скорости потока среды. Основным отличием является использование только одного ультразвукового преобразователя и отражателя вместо обычно используемой пары преобразователей. При этом нет возможности измерения разности времен прохождения ультразвукового сигнала по направлению потока среды распространения и против него, но есть возможность измерения суммы этих времен. Это позволяет определять скорость движения среды путем учета акустических эффектов второго порядка малости, зависящих от отношения квадратов скорости движения и скорости звука среды.

Ключевые слова: ультразвук, расходомерия, времяимпульсный метод, квадратичный эффект.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.20.63606.20769

Проблема измерения скорости потока среды остается актуальной, поскольку постоянное совершенствование электроники позволяет увеличивать точность и расширять область применения приборов измерения потока [1–3]. В частности, это касается измерения расхода жидкостей и газов в трубопроводах. Существует множество методов измерения расхода, таких как механические, электромагнитные, корреляционные, термоанемометрические и др. В настоящее время наиболее точными и устойчивыми к внешним воздействиям считаются ультразвуковые методы измерения расхода [4,5].

Самым распространенным среди ультразвуковых методов учета расхода является времяимпульсный. Его суть заключается в следующем. Два ультразвуковых преобразователя, каждый из которых одновременно является излучателем и приемником ультразвука, устанавливаются таким образом, чтобы ультразвуковые лучи, излучаемые этими преобразователями, находились на одной оси, были направлены друг на друга и каждый из них имел возможность принять сигнал другого. Кроме того, эта пара преобразователей располагается относительно потока среды таким образом, чтобы имела ненулевая проекция лучей преобразователей на вектор направления потока. В этом случае поток будет ускорять ультразвуковой (УЗ) сигнал, направленный по потоку, и замедлять сигнал, направленный против потока. Измерив разницу времен прохождения сигналов между преобразователями по потоку и против потока, можно вычислить его скорость.

Для простоты представим, что оси излучения УЗ-преобразователей совпадают с осью направления потока. При этом сигнал одного из преобразователей распространяется в направлении, совпадающем с направлением потока, а сигнал другого — в направлении,

противоположном направлению потока. Запишем разницу времен прохождения

$$\Delta t = \frac{L}{c - v} - \frac{L}{c + v} = \frac{2Lv}{c^2} \left(\frac{1}{1 - (v^2/c^2)} \right). \quad (1)$$

Здесь Δt — разность времен прохождения сигналов по потоку и против потока, L — расстояние между излучающими поверхностями преобразователей, v — скорость движения среды, c — скорость звука в среде.

В формуле (1) присутствует множитель

$$k = \left(\frac{1}{1 - (v^2/c^2)} \right), \quad (2)$$

зависящий от отношения квадратов скорости потока и скорости звука среды. Физический смысл этого множителя понятен. Если скорость потока будет равна скорости звука в среде, то УЗ-сигнал, движущийся против потока, никогда не достигнет приемника, и время прохождения сигнала будет равно бесконечности. Соответственно, бесконечности будет равна и разность времен прохождения сигналов, что и следует из формулы (1) благодаря множителю k , если положить скорость потока равной скорости звука ($v = c$). Отрицательные значения разности времен прохождения сигналов, появляющиеся, когда скорость потока превышает скорость звука в среде, означают, что УЗ-сигнал, направленный против потока среды, не приближается к приемнику, а удаляется от него.

На практике при расчете скорости потока по разности времен задержки при использовании времяимпульсных ультразвуковых расходомеров множитель k опускают, поскольку для интервалов скоростей потока, на которые они рассчитаны, он оказывается близким к единице и им можно пренебречь.

Необходимость использования двух преобразователей в приборе сопряжена с рядом трудностей, основной из которых является подбор параметров пары преобразователей. Это особенно важно для приборов учета газа вследствие узких полос пропускания специализированных УЗ-преобразователей для этих приборов. Исходя из этого возникает вопрос: можно ли упростить времяимпульсный расходомер, оставив в его конструкции только один преобразователь и заменив второй преобразователь на отражатель? Такая конструкция помимо отсутствия необходимости подбора пары преобразователей будет обладать целым рядом преимуществ. Во-первых, сократятся затраты на производство. Во-вторых, уменьшатся массогабаритные характеристики прибора. В-третьих, упростятся настройка и юстировка прибора на месте работы. В-четвертых, появится возможность использовать естественные отражатели в случаях, когда доступ к обратной стороне потока затруднен.

Очевидно, что в этом случае нет возможности измерить разность времен прохождения сигналов от преобразователя к отражателю и от отражателя к преобразователю, поскольку отражатель не способен самостоятельно принимать и излучать сигнал. Но можно измерить общее время прохождения сигнала от преобразователя к отражателю и обратно. Попробуем его вычислить. Для этого в формуле (1) заменим минус на плюс. В итоге имеем

$$t = \frac{L}{c-v} + \frac{L}{c+v} = \frac{2L}{c} \left(\frac{1}{1-(v^2/c^2)} \right). \quad (3)$$

Здесь t — время прохождения УЗ-сигнала от преобразователя к отражателю и обратно. Нужно отметить, что исходя из формулы (3) t всегда увеличивается при росте скорости потока среды распространения УЗ-сигнала независимо от его направления. Также следует отметить, что формула (3) существенно отличается от (1) с точки зрения вычисления скорости потока. Если в формуле (1) можно пренебречь множителем k и положить его равным единице, поскольку скорость потока v присутствует в основном множителе, то в формуле (3) скорость потока в основном множителе отсутствует и есть только в k . Поэтому здесь мы уже не можем им пренебречь, если хотим вычислить скорость потока. Соответственно, скорость потока в этом случае будет равна

$$v = c \sqrt{1 - \frac{2L}{tc}}. \quad (4)$$

В приборе с одним преобразователем и отражателем фактически будет измеряться время прохождения сигнала от источника до отражателя и обратно. Это время будет сравниваться с заранее измеренным временем прохождения сигнала при нулевой скорости потока. Разница этих времен будет равна

$$t - t_0 = \frac{2L}{c} \left(\frac{1}{1-(v^2/c^2)} - 1 \right). \quad (5)$$

Здесь t_0 — время прохождения сигнала от преобразователя к отражателю и обратно при нулевой скорости потока ($v = 0$). Попробуем сравнить данную разницу времен с разницей времен прохождения сигнала по потоку и против потока для прибора с двумя преобразователями. Для этого уравнение (5) разделим на уравнение (1):

$$\frac{t - t_0}{\Delta t} = \frac{v}{c}. \quad (6)$$

Из формулы (6) видно, что отношение этих времен равно отношению скорости потока среды к скорости звука этой среды. Для жидкостей и газов характерная скорость потока обычно измеряется метрами в секунду, а скорость звука — километрами в секунду для жидкостей и сотнями метров в секунду для газов. Соответственно, данные времена будут различаться на два-три порядка, что приводит к дополнительным требованиям к электронной элементной базе прибора с отражателем. Для газов эти требования будут менее жесткими.

Для экспериментального подтверждения полученных результатов были использованы разработанные нами работающие для воздуха и других газовых сред УЗ-преобразователи на основе пористой пьезокерамики с силиконовым согласующим слоем. Они располагались соосно, их рабочие поверхности были направлены навстречу друг другу. Угол между общей осью УЗ-лучей преобразователей и направлением воздушного потока составлял 45° . Совместная рабочая частота преобразователей составляла 96.2 МГц. Диаметр воздушного канала был равен 105 мм. Расстояние между излучающими поверхностями преобразователей с учетом технологических „карманов“ равно 232 мм. В качестве источника воздушного потока использовался вытяжной вентилятор с заявленной производительностью 500 м³/ч. В качестве источника сигнала использовался генератор Tektronix AFG 3101, в качестве приемника — осциллограф Tektronix MSO 3034. Эксперименты производились при комнатной температуре и атмосферном давлении. Сначала измерения проводились по классической схеме с двумя преобразователями, затем один из преобразователей заменялся металлическим отражателем. Расстояние между преобразователем и отражателем составляло 244 мм.

Результаты эксперимента представлены в таблице, в которой приняты следующие обозначения: $T1-T2$ — схема работы, при которой преобразователь $T1$ является излучателем, а преобразователь $T2$ — при-

Результаты экспериментальной проверки метода

Схема работы	$t_0 (v=0), \mu s$	$t, \mu s$	$\Delta t, \mu s$	$(t-t_0), \mu s$	$v, m/s$
$T1-T2$	672.52	686.61	27.5	—	15.5
$T2-T1$	672.52	659.11			
$T1-R-T1$	1414.51	1415.36	—	0.85	15.1

емником, УЗ-луч направлен против потока; в схеме работы $T2-T1$ УЗ-луч направлен по потоку; в схеме $T1-R-T1$ преобразователь $T1$ излучает УЗ-сигнал, который отражается от отражателя R и возвращается к $T1$; t_0 ($v = 0$) — время прохождения сигнала в системе при нулевой скорости потока, t — аналогичное время при наличии потока в системе. Из таблицы видно, что метод способен давать хорошие результаты при использовании приборов, способных обеспечить измерение временных интервалов с нужной точностью.

Теперь остается выяснить, позволяет ли существующая электронная элементная база использовать предложенный метод на практике при производстве расходомеров, способных измерять расход с необходимой точностью, составляющей обычно 1–2 %.

Попробуем оценить характерное значение Δt для прибора с двумя преобразователями исходя из литературных данных. Известно [6], что скорость потока газа в магистральном трубопроводе может составлять 10 м/с, при этом скорость звука среды зависит от давления и может изменяться от 250 до 650 м/с [7]. Для определенности положим $L = 1$ м, $v = 10$ м/с, $c = 500$ м/с. В данном случае, согласно формуле (1), получим $\Delta t = 80 \cdot 10^{-6}$ с. Соответственно, для этого же случая $(t - t_0)$, согласно (5), составит $1.6 \cdot 10^{-6}$ с.

Существуют специализированные бюджетные время-цифровые преобразователи для ультразвуковых расходомеров, точность измерения временных интервалов которых составляет десятки пикосекунд. В частности, время-цифровой преобразователь TDC7200PWR производства компании Texas Instruments имеет разрешение 55 ps, а время-цифровой преобразователь TDC-GP22 производства компании Acam Messelectronic GmbH имеет разрешение 22 ps [8]. Более универсальный преобразователь TDC-SSP способен измерять временные интервалы с точностью 8 ps. Таким образом, можно утверждать, что современная стандартная для данных приложений элементная база в принципе способна обеспечить измерение необходимых временных интервалов с нужной точностью в определенном диапазоне диаметров трубопроводов.

Следует отметить, что для жидкостей и трубопроводов малого диаметра $(t - t_0)$ будет составлять десятки пикосекунд. В этом случае стандартная элементная база уже не обеспечивает нужной точности и требуется применение более сложной электроники.

Таким образом, можно сделать вывод, что современная стандартная электронная элементная база в ряде случаев позволяет обеспечить необходимую точность измерения акустических эффектов второго порядка малости. Это позволяет использовать указанные эффекты для измерения скорости потока среды ультразвуковым времяимпульсным методом по схеме с одним УЗ-преобразователем. В свою очередь использование подобной схемы позволяет выйти на качественно новый уровень конструирования ультразвуковых приборов уче-

та расхода и существенно расширить область применения таких приборов.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание в сфере научной деятельности, проект № FENW-2026-0022).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Г.С. Абрамов, А.В. Барычев, М.И. Зимин, *Практическая расходометрия в промышленности* (ВНИИОЭНГ, М., 2000).
- [2] К.П. Латышенко, *Измерение расхода жидкостей и газов* (Юрайт, М., 2025).
- [3] И.И. Гринбаум, *Расходометрия гидрогеологических и инженерно-геологических скважин* (Недра, М., 1975).
- [4] L.C. Lynnworth, Y. Liu, *Ultrasonics*, **44**, 1371 (2006). DOI: 10.1016/j.ultras.2006.05.046
- [5] J.M. Szebeszczyk, *Flow Meas. Instrum.*, **5** (2), 127 (1994). DOI: 10.1016/0955-5986(94)90047-7
- [6] М.В. Лурье, И.Т. Мусаилов, *Газовая промышленность*, № 5 (784), 80 (2019).
- [7] А.В. Цветков, В.О. Струговец, В.Н. Абрашов, М.А. Скоробогач, О.В. Яньшина, В.П. Павлов, В.М. Бринстер, М.А. Чашин, *Газовая промышленность*, № 9 (821), 60 (2021).
- [8] Н.С. Чижов, *Наука, техника и образование*, № 4 (34), 65 (2017).