АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XV 1969 Вып. 1

УДК 534.22

ПРЕЦИЗИОННЫЙ МЕТОД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА В ЖИДКОСТИ НА ЧАСТОТАХ 0,7—30 *Мгц*

В. С. Кононенко, В. Ф. Яковлев

Рассматривается прецизионный метод измерения скорости ультразвука в жидкости, основанный на электрической интерференции n-го эхо-сигнала. Использование n-го эхо-сигнала позволяет достигнуть очень высокой точности настройки интерференции. Точность абсолютных измерений скорости ультразвука составила 0,006%; экспериментальный разброс вдвое меньше. Метод позволяет измерять дисперсию скорости с точностью 0,002—0,003%.

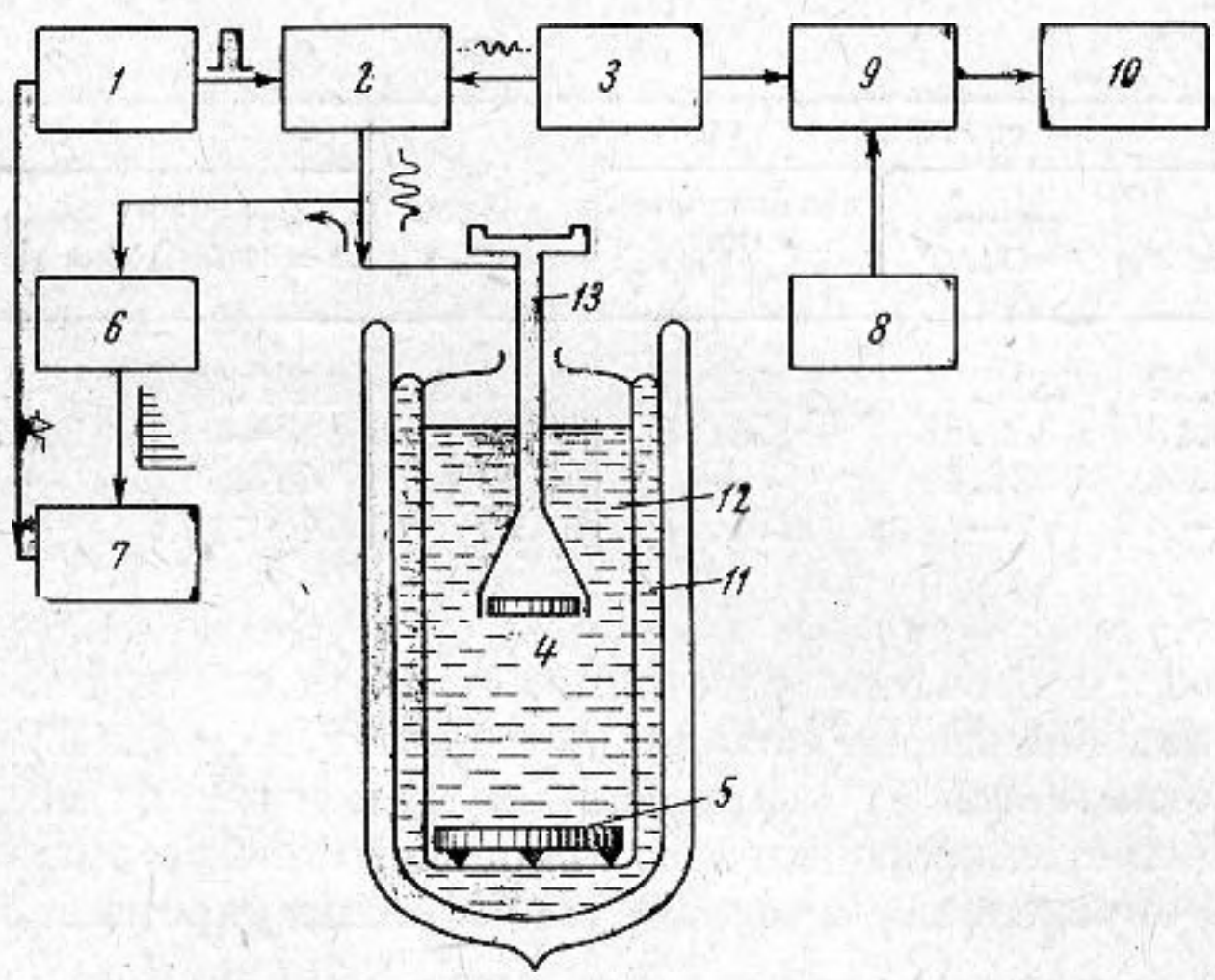
Описываемый ниже метод измерения скорости ультразвука является развитием импульсно-фазового метода [1] в сторону повышения точности измерений, особенно на низких частотах. Это достигается применением для отсчета длины волны электрической интерференции несущей n-го отраженного импульса с когерентной синусоидой, подаваемой на вход приемника.

Применение интерференции n-го эхо-сигнала для увеличения чувствительности отсчета значения скорости при измерениях в твердых телах было осуществлено в работе [2]. Однако использование таких эхо-сигналов при работе в жидкостях, сталкивалось с трудностью получения эхо-сигналов на собственной частоте кварца. В работе [3] была установлена возможность получения эхо-сигналов не на резонансной частоте кварца и использована для измерения поглощения. Наши дальнейшие исследования показали, что получение эхо-сигналов возможно в широкой области частот, в 2—3 раза отличных от резонансной, а также вблизи нечетных гармоник кварца (собственная основная частота кварца составляла 2 *Мгц*). С другой стороны, для исключения ошибок из-за сдвига фаз при отражениях, неизбежных при методике, описанной в работе [2] и ограничивающих точность измерений, в настоящей работе использовали изменение расстояния между кварцем и отражателем при постоянной несущей частоте импульсов.

Экспериментальная схема показана на фиг. 1. Генератор *1* прямоугольным импульсом ($\tau = 70$ *мксек*) отпирает модулятор *2*, который на время длительности импульса пропускает опорный синусоидальный сигнал от генератора *3*. Полученный радиоимпульс подается на кварц *4*. Ультразвуковой импульс испытывая отражения между кварцем и отражателем *5*, преобразуется в электрический, проходит через усилитель с детектором *6* и дает на экране осциллографа *7* картину нескольких (до 50) эхо-импульсов.

При изменении расстояния между кварцем и отражателем эхо-сигналы будут интерферировать вследствие сдвига фаз с когерентной синусоидой, проникающей через запертый модулятор на вход усилителя. С изменени-

ем расстояния на 60—80 *мм* n-ый импульс испытывает несколько тысяч пульсаций. Скорость ультразвука определяется по формуле $c = 2\Delta l n / m$, где m — число пульсаций n-го импульса, Δl — изменение расстояния между кварцем и отражателем, ν — частота несущей импульса. На экране осциллографа при перемещении излучателя n-ый импульс пульсирует в n раз быстрее, чем первый, поэтому точность измерений по сравнению с обычным импульсно-фазовым методом повышается в n раз и чувствительность отсчета расстояния при интерференции n-го импульса достигает 0,1—0,3 *мкм*.



Фиг. 1

Для определения скорости ультразвука удобно определять не числа m и n, входящие в формулу, а их отношение m / n, число повторений устойчивой интерференции, при которой все импульсы одновременно принимают максимальное значение. Картина интерференции повторяется при перемещении излучателя на $\lambda / 2$.

Ввиду того, что на высоких частотах m / n приближается к 3000, был разработан специальный способ счета числа пульсаций.

На частотах порядка 20 *Мгц* при большом акустическом пути, вследствие большого поглощения, амплитуда отраженного импульса мала, что ухудшает точность отсчета. Для повышения точности отсчета в этом случае использовалось не максимальное значение наблюдаемого импульса, а два положения отражателя, при которых импульс, вследствие интерференции, пропадает. Затем из этих очень чувствительных к перемещению отражателей отсчетов точно находилось среднее положение, соответствующее пиковому значению импульса. Расчет показывает, что точность такой установки при отсчете расстояния равна 0,03 *мкм*, а при наблюдении максимума на порядок хуже — 0,1—0,3 *мкм*.

Преимущество описываемого метода измерений состоит в том, что он позволяет проводить измерения с оптимальной чувствительностью путем выбора определенного эхо-импульса при данном поглощении. Чтобы затухание в жидкости не искажало симметричности указанных выше отсчетов, непрерывный сигнал выбирается всегда большей амплитуды, чем максимальная амплитуда n-го эхо-импульса. В электронной схеме детектирование осуществлялось с компенсацией опорного синусоидального сигнала, что повышает чувствительность измерений, которая ухудшается при неравенстве амплитуд непрерывного сигнала и n-го эхо-импульса. Ослабление же сигнала при изменении акустического пути можно исключить путем увеличения усиления в приемном тракте.

Для облегчения измерений и поддержания стабильности частоты генератора *3* (фиг. 1) мы использовали то обстоятельство, что эхо-сигналы в жидкости можно получать в широком спектре частот при вынужденных колебаниях кварца. Поэтому частота генератора *3* подбиралась так, чтобы какая-нибудь гармоника этой частоты вместе с гармоникой кварцевого генератора *8* давала нулевые биения, которые через смеситель и усилитель *9* наблюдались на осциллографе *10* (проверочные точки волномера). Рабочие частоты при этом были следующие: 0,66 . . . ; 0,75; 1,14 . . . ; 1,33 . . . ; 1,66 . . . ; 2,33 . . . ; 2,75 . . . ; 5,66 . . . ; 9,5; 13,5; 17,5; 22; 26 *Мгц*.

Таблица 1

f, *Мгц*	*c*, *м/сек*			*f*, *Мгц*	*c*, *м/сек*		
	вода $t = 19{,}92°$	толуол $t = 21{,}03°$	изоамиловый спирт $t = 21{,}05°$		вода $t = 19{,}92°$	толуол $t = 21{,}03°$	изоамиловый спирт $t = 21{,}05°$
5,66...	1482,12	1321,64	1254,75	17,5	1482,13	—	—
9,5	1482,13	1321,62	1254,75	18	—	1321,63	1254,78
13,5	1482,14	1321,60	—	22	1482,14	—	—
14	—	—	1254,78	26	1482,16	—	—

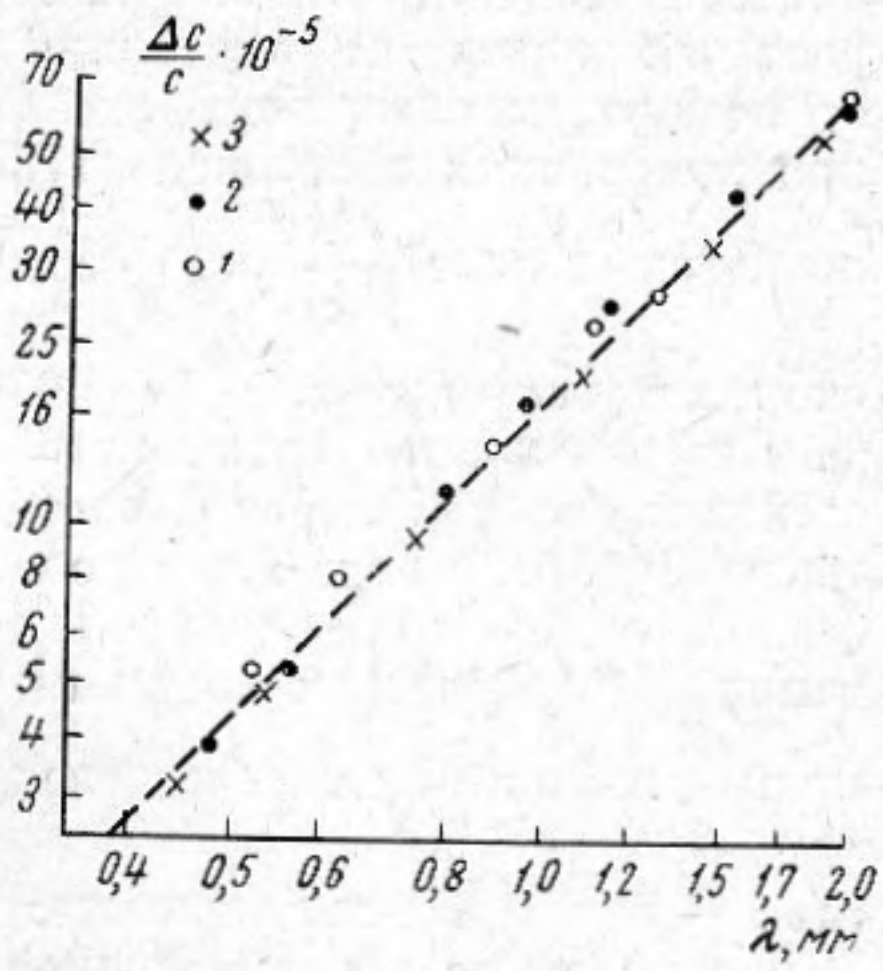
Перед каждым отсчетом расстояния частота подстраивалась на нуль биений. Так как биения происходят для частот порядка 20 *Мгц*, то рабочая частота отличается от кварцованной менее чем на 10^{-7}, и ошибка в частоте определяется погрешностью кварцевого генератора (порядка 10^{-5}). Настройка на определенную частоту значительно упрощает измерение скорости и не требует кварцевания рабочих частот генератора *3*.

Значительную ошибку в определении скорости ультразвука вызывают температурные колебания. Несмотря на то, что температурный режим применяемого обычно ультратермостата в процессе работы контактного термометра периодически отклоняется от равновесия на 0,05°, тепловая инерция термостатирующей рубашки *11* (фиг. 1) и исследуемой жидкости *12* уменьшает эти колебания на один — два порядка. Экспериментальная проверка при точности измерения 0,003° показала отсутствие градиентов температуры в жидкости и колебаний температуры у стенки термостатирующей рубашки. За несколько часов измерений температура изменялась не более 0,02°. Поэтому задача сводилась лишь к точному измерению температуры, которое выполнялось узкодиапазонным ртутным термометром, прошедшим государственную проверку и дающим точность измерения температуры, согласно гарантии 0,01°. Перед измерениями система термостатировалась в течение 5—6 *час*. Комнатная температура отличалась от температуры исследуемой жидкости не более, чем на 3°.

Система кварц — отражатель настраивалась на параллельность на высоких частотах; настройка не зависела от рабочей частоты.

Несмотря на то, что чувствительность отсчета в данном методе исключительно высокая, проведение точных измерений абсолютных значений скорости ультразвука связано с определенными трудностями. Точность измерений определяется в основном погрешностями измерения перемещения l, частоты f и температуры T, которые на порядок больше, чем возможности метода. Относительная ошибка измерений скорости составляет $\frac{\Delta c}{c} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta f}{f} + \frac{\partial c}{\partial T} \cdot \frac{\Delta T}{c}$. Погрешность измерения расстояния равна сумме погрешностей $\Delta l = \sum_{i=1}^{4} l_i$, где Δl_1 — погрешность измерительного при-

бора (ИЗВ-1), равная 1 *мкм*; Δl_2 — погрешность в установке пика интерференций, лежащая в пределах 0,1—0,3 (*мкм*); Δl_3 — изменение длины штока кварцедержателя *13* (фиг. 1) при перемещении вследствие наличия разности комнатной температуры и температуры исследуемой жидкости — меньше 0,5 *мкм*; Δl_4 — ошибка вследствие непараллельности осей кварцевого излучателя и перемещающего устройства — меньше 0,2 *мкм*. Поэтому относительная погрешность измерения расстояния составляет $\Delta l / l = 2{,}0 \cdot 10^{-3} / 70 = 0{,}003\%$. Погрешность кварцевого стандарта частоты, согласно гарантии, равна $\frac{\Delta f}{f} = 0{,}001\%$.



Фиг. 2

Так как для жидкости $\frac{\partial c}{\partial T}(20°) \approx$ ≈ 3—4 *м/град·сек*, а погрешность в измерении температуры $\Delta T = 0{,}01°$, то для измерений например в воде мы получаем $\frac{\partial c}{\partial T} \cdot \frac{\Delta T}{c} = 0{,}002\%$. Таким образом, точность абсолютных измерений значения скорости ультразвука в воде равна $\frac{\Delta c}{c} = 0{,}003 + 0{,}001 + 0{,}002 = 0{,}006\%$. Экспериментальный разброс значений скорости для различных частот оказался вдвое меньше.

В табл. 1 приведены результаты измерения скорости ультразвука в бидистиллированной воде, толуоле и изоамиловом спирте, проведенного описанным методом.

Взяв среднее значение скорости ультразвука и используя известный температурный коэффициент скорости [4], получаем, что скорость ультразвука в бидистиллированной воде при 20° равна $c = 1482{,}39 \pm 0{,}09$ *м/сек*.

Результаты измерения скорости ультразвука в воде совпадают в пределах ошибок эксперимента с данными других авторов, приведенными в табл. 2, что говорит о хорошей точности абсолютного измерения скорости ультразвука данным методом. В работе [4] скорость завышена на 30—40 *см/сек*, вследствие волноводного эффекта.

Таблица 2

Авторы	*c*, *м/сек* при 20°
Кононенко, Яковлев	1482,39±0,09
[5]	1482,32±0,01
[4]	1482,66±0,05
[6]	1482,27±0,2
[7]	1482,26±0,15

Измерение дисперсии скорости ультразвука при условии точного отсчета изменения температуры, а также вследствие того, что становятся систематическими ошибки отклонения от стандарта частоты $\Delta f / f$, ошибки $\Delta l_3 / l$ и $\Delta l_4 / l$, может быть проведено с точностью 0,002—0,003%. Это подтверждается малым экспериментальным разбросом значений скорости ультразвука при различных частотах, который при любом цикле наших измерений не превосходил 4—5 *см/сек*.

Дифракционное завышение скорости ультразвука, имеющее место при $\frac{a}{\lambda} < 50$, где a — радиус излучателя, изучалось в работах [7—9]. Было

показано, что ошибка зависит от a, λ и расстояния между излучателем и приемником ультразвука.

Однако проведенное нами специальное исследование показало, что в пределах точности отсчета для рассматриваемого метода завышение скорости не зависит от расстояния между кварцем и отражателем, а так же от номера используемого эхо-импульса. Поскольку радиус излучателя при измерениях постоянен (17,5 *мм*), то поправочную формулу следовало искать в виде $\frac{\Delta c}{c} = \lambda^{\alpha} \cdot \text{const}$, где Δc — дифракционное завышение скорости ультразвука.

Дифракционное завышение скорости находилось из разности скоростей для опорной высокой частоты и для исследуемой частоты. Результаты измерений в воде *1*, толуоле *2* и изоамиловом спирте *3* показаны на фиг. 2, где $\Delta c / c$ и λ отложены в логарифмическом масштабе. Полученные данные отклоняются от аппроксимирующей прямой не более 10—15%. Эта прямая линия выражается следующей зависимостью: $\frac{\Delta c}{c} = 1{,}7 \cdot 10^{-4} \lambda^{1{,}9}$, где λ — длина волны в миллиметрах.

Несмотря на то, что полученное соотношение дает поправку с точностью 10—15%, ввиду небольшой величины самой поправки, ошибка в измерении скорости, вносимая подобной неточностью, невелика. При исследовании дисперсии скорости ультразвука результаты измерений на нескольких близких частотах приводят к усреднению этой ошибки и соответственно уменьшают ее. Полученная формула с точностью 5% подтверждает теоретическую формулу П. Е. Краснушкина [10] $\frac{\Delta c}{c} = \frac{1}{20} \cdot \frac{\lambda^2}{a^2}$. Показатель степени при λ также отличается всего на 5%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Н. Феофанов. Измерение скорости ультразвуковых волн методом импульсного интерферометра. Тр. семинара по физике и применению ультразвука. Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина), 1968, 173—177.
2. И. И. Первушин, А. П. Филиппов. Способ измерения скорости ультразвука в твердых телах и жидкостях. Акуст. ж., 1961, **7**, 3, 385—387.
3. А. Д. Зипир, В. Ф. Яковлев. Экспериментальное обоснование методики использования многократных эхо-импульсов для исследования жидких сред на низких частотах. Сб. «Прим. ультраакуст. к исслед. вещества», МОПИ, 1960, **7**, 107—122.
4. M. Greenspan, I. Tshig. Tables of the speed of Sound in water. J. Acoust. Soc. America, 1959, **31**, 75—76.
5. H. I. McSkimin. Velocity of Sound in distilled water of the temperature range 20—75° C. J. Acoust. Soc. America, 1965, **37**, 325—328.
6. W. Neubauer, L. Dragonette. Experimental determination of the Freedfield sound speed in water. J. Acoust. Soc. America, 1964, **36**, 9, 1685—1690.
7. В. Илгунас, О. Кубилюнене, А. Япертас. Прецизионный интерферометр для измерения скорости ультразвука в жидкостях в диапазоне частот 1—12 *Мгц*. Акуст. ж., 1964, **10**, 1, 54—59.
8. H. I. McSkimin. Effect of diffraction of velocity of sound. J. Acoust. Soc. America, 1961, **33**, 4, 539.
9. H. I. McSkimin. Empirical Study of effect of diffraction of velocity of propagation of Highfrequency ultrasonic waves. J. Acoust. Soc. America, 1960, **32**, 11, 1401.
10. P. E. Krasnushkin. Theory of ultrasonic interferometer. Phys. Rev., 1944, **65**, 190—197.

Московский областной педагогический институт им. Н. К. Крупской

Поступила в редакцию 23 апреля 1967 г.