ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
Том 22 1984 № 3

УДК 54.14:534.22

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА В ЖИДКОСТЯХ

Тимрот Д. Л., Середницкая М. А., Чхиквадзе Т. Д.

Описана установка для измерения скорости распространения ультразвуковых волн в широком классе жидкостей на линии насыщения. Измерения проведены импульсным эхо-методом фиксированного расстояния. Надежность работы проверена при измерении скорости звука в дистиллированной воде. Погрешность полученных данных составляет 0,03%.

Цель данной работы — создание универсальной установки, позволяющей достаточно просто и с высокой точностью проводить измерение скорости звука в широком классе жидкостей, в том числе химически активных.

Акустические измерения выполнены импульсным методом одного фиксированного расстояния, сущность которого состоит в непосредственном измерении времени прохождения ультразвуковым импульсом известного расстояния.

На рис. 1 представлен чертеж разработанной установки. Исследуемое вещество помещается в герметичную измерительную ячейку, представляющую собой кварцевую ампулу *1* диаметром 25 и длиной 170 мм. Ультразвуковой сигнал проходит между двумя оптически обработанными плоско-параллельными окнами *2*, впаянными в ампулу *1*. Расстояние между стенками окон составляет ~30 мм. Для временной селекции сигнала, проходящего через исследуемую среду, и сигнала, распространяющегося по цилиндрической стенке измерительной ячейки, стенка изготовлена в виде лабиринта. Измерительная ячейка заполняется таким количеством жидкости, чтобы в нее погружались обе плоско-параллельные поверхности. Часть свободного объема в зазоре между стенками лабиринта заполнена паром, что позволяет проводить измерения на линии насыщения.

Измерительная ячейка опускается в стеклянный сосуд *3* длиной 550 и диаметром 70 мм, в котором циркулирует термостатирующая жидкость. Температура в сосуде измеряется с помощью образцового термометра сопротивления *4*, погруженного в термостатируемый объем вблизи рабочего участка. Температура регистрируется цифровым вольтметром Щ 1516. Выход установки на стационарный температурный режим контролируется по стабильности сигнала на экране осциллографа измерительного прибора УЗАС-7. В случае высокотемпературных исследований жидкостный термостат заменяется электрической печью сопротивления.

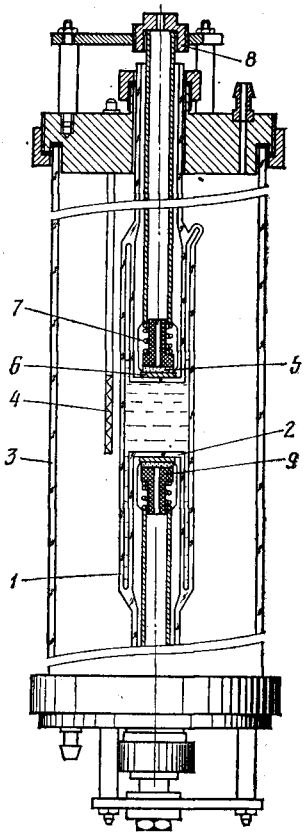

Рис. 1. Установка для измерения скорости звука в жидкостях

Для возбуждения и приема ультразвуковых колебаний используются пьезопреобразователи *5* из пьезокерамики ЦТС-19 диаметром 8 и толщиной 1 мм. Они расположены с наружной стороны плоско-параллельных окон измерительной ячейки таким образом, что не соприкасаются ни с исследуемой средой, ни с термостатирующей жидкостью. То обстоятельство, что излучатели не соприкасаются с исследуемой средой, исключает систематические ошибки, связанные с электропроводностью среды, а также позволяет измерять скорость звука в ряде химически активных жидкостей.

Электрический контакт с пьезодатчиками осуществляется через латунные шайбы *6* диаметром 12 и толщиной 2 мм. Пьезопреобразователи прижимаются к плоско-параллельным окнам пружинами *7*, сила

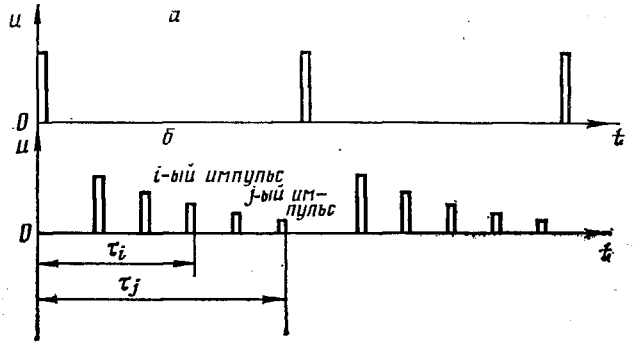

Рис. 2. Функциональная схема метода (u – амплитуда, t – время)

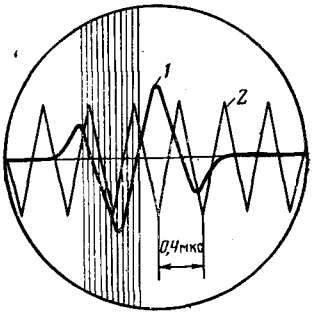

Рис. 3. Картина на экране измерительного прибора

натяжения которых регулируется с помощью гаек *8* и контролируется путем наблюдения за формой принятого пьезоприемником ультразвукового сигнала на экране осциллографа.

Акустический контакт между плоско-параллельными окнами *2*, латунными шайбами электроконтакта *6* и пьезопреобразователями *5* осуществляется с помощью солидола при низких и силиконовой смазки при высоких температурах. Демпфирование пьезопреобразователя обеспечивается текстолитовыми втулками *9*. Конструкция установки позволяет производить ее разборку и повторную сборку без заметного влияния на результаты измерений.

Для создания ультразвукового импульса и измерения временного интервала используется электронный блок ультразвукового анализатора скорости УЗАС-7, с генератора импульсов которого на излучающий пьезодатчик подаются импульсы длительностью 0,1 мкс с рабочей частотой 2 МГц. Принятый пьезоприемником ультразвуковой сигнал усиливается широкополосным усилителем и подается на осциллограф.

На рис. 2 представлена функциональная схема метода. На передающий элемент с генератора поступают импульсы с частотой повторения 400 Гц (рис. 2, *а*). Синхронизирующий импульс одновременно с генератором включает развертку осциллографа (рис. 2, *б*), где видны прямо прошедший и отраженные (эхо) импульсы. Регулирование задержки развертки осциллографа дает возможность сопоставления любого эхо-импульса с калибрационным сигналом. При этом измеряется время задержки данного импульса. В эксперименте определяется время распространения i- и j-го эхо-импульсов, для расчета скорости звука используется временной интервал между импульсами $\Delta\tau=\tau_j-\tau_i$. Это позволяет исключить влияние задержки в переходных слоях при измерении времени, так как рассматриваемые отраженные импульсы проходят переходные слои одинаковое число раз.

В результате на экране осциллографа наблюдается картина, изображенная на рис. 3. Одновременно с измеряемым сигналом *1* на осциллограф подается калибрационный сигнал *2*, относительно которого отсчитывается время распространения зондирующего сигнала. Для увеличения чувствительности прибора УЗАС-7 авторами изготовлена дополнительная шкала делений калибрационного сигнала, позволяющая снизить погрешность отсчета времени до $2{,}5\cdot10^{-8}$ с. Предварительно проверялась стабильность частоты калибрационного сигнала. С помощью частотомера Ч3-35А получено, что за 10 ч работы после прогрева нестабильность калибрационного сигнала не превышала 10^{-4}. Наблюдение сигнала, многократно отраженного окнами измерительной ячейки, позволило уменьшить погрешность определения скорости звука за счет увеличения расстояния, пройденного ультразвуковыми импульсами в исследуемой среде.

Для четкого наблюдения многократно отраженных сигналов большое внимание следует уделять точности изготовления и монтажа рабочей ячейки, а именно хорошей обработке и параллельности окон *2* (см. рис. 1) и фиксации пьезоэлементов. При достаточно хорошей обработке отражающих поверхностей и параллельности между ними фазовый сдвиг ультразвуковых импульсов при отражении можно считать равным нулю [1]. Выбор многократно отраженных импульсов приводит к уменьшению влияния дифракционных явлений, о которых подробнее будет сказано ниже. Из рис. 1 видно, что пьезопреобразователи со стороны исследуемой среды нагружены четырьмя переходными слоями. Однако, как указано выше, описываемая методика позволяет практически исключить влияние этих слоев на результаты измерений.

Измеренная скорость звука $w_и$ (м/с) рассчитывается по формуле

$$w_и = nL/\Delta\tau_и, \tag{1}$$

где L — расстояние между внутренними поверхностями плоско-параллельных окон рабочего участка, м; $\Delta\tau_и$ — временной интервал между i- и j-м отраженными импульсами, с; n — число отражений между j- и i-м импульсами.

Определение скорости звука может проводиться на данной установке абсолютным и относительным методами. В первом случае необходимо с высокой точностью измерять расстояние между окнами L, во втором — определить это расстояние путем тарировки по эталонной жидкости. Когда имеются точные данные по скорости звука в эталонных жидкостях, погрешность относительного метода будет мало отличаться от погрешности абсолютного.

При использовании относительного метода расстояние L определяется путем измерения скорости звука в эталонной жидкости по формуле

$$L = w_т\Delta\tau_т/n \tag{2}$$

где $w_т$ и $\Delta\tau_т$ — соответственно скорость звука и временной интервал в эталонной жидкости.

Для измеренных абсолютным методом значений скорости звука вводится дифракционная поправка, так как сложная дифракционная структура акустического поля, особенно в так называемой зоне Френеля, т. е. ближней относительно излучателя области, приводит к некоторой ошибке в измерении скорости звука, сказывающейся в завышении измеренной величины относительно истинной [2—4].

Дифракционные эффекты, связанные с искажением формы импульса, зависят в основном от частоты, размеров излучателя и приемника

ультразвука, а также от расстояния между ними. Эти эффекты уменьшаются с увеличением частоты, расстояния и диаметра пьезопреобразователя. В [5] показана необходимость учета дифракционных эффектов при проведении прецизионных измерений скорости звука. Автор [5] дает расчетное соотношение для дифракционной поправки (в %), полученное для скорости звука в образце из плавленого кварца, в виде

$$\Delta w_{д}=\frac{\lambda^{3/2} w_{и}}{2\pi^{2} d D^{1/2}}\cdot 100, \qquad (3)$$

где λ — длина волны, м; d — диаметр пьезопреобразователя, м; D — расстояние, пройденное ультразвуковым импульсом, м. В [6] рекомендуется использовать соотношение (3), полученное для твердого тела, при расчете дифракционных эффектов в жидкостях. Однако считать такой подход вполне обоснованным в настоящее время не представляется возможным: требуется дополнительное исследование дифракции в жидкостях.

Таким образом, термодинамическая скорость звука при отсутствии дисперсии, т. е. зависимости скорости звука от частоты, рассчитывается по формуле

$$w=w_{и}-\Delta w_{д}. \qquad (4)$$

Для проверки отсутствия дисперсии необходимо выполнить измерения скорости звука в широком диапазоне частот.

По мнению авторов, при проведении теплофизических исследований часто следует отдавать предпочтение относительным методам, так как они в большинстве случаев менее трудоемки, чем абсолютные, при сохранении высокой точности. В частности, при исследовании скорости звука абсолютным методом трудно учесть некоторые систематические ошибки, которые в случае относительных измерений частично включены в величину постоянной прибора.

В качестве характерного примера присутствия скрытых систематических ошибок результатов абсолютных измерений можно привести работы по скорости звука в воде Гринспана и Чигга [7] и повторившего их эксперимент Секояна [8]. В работе [7] на сегодняшний день выполнены одни из самых прецизионных измерений скорости звука в воде. Рассчитанные авторами [7, 8] относительные погрешности полученных данных составляют соответственно около 0,003 и 0,01%. Однако по результатам более поздних измерений [6, 9, 10], результаты которых считаются в настоящее время наиболее точными, выявилось, что данные [7, 8] систематически завышены на величину ~0,03%. Это объясняется, по-видимому, неучтенными поправками и дает основание для сомнений в оценке погрешности абсолютных методов.

Погрешность полученных в данной работе значений скорости звука при использовании абсолютного метода измерения складывается из погрешности определения расстояния L между плоско-параллельными окнами рабочей ячейки с учетом его температурного изменения, погрешности измерения временного интервала между импульсами и погрешности определения дифракционной поправки. Последняя может считаться пренебрежимо малой и составляет обычно в расчетах по Мак-Скимину ~0,01%.

При определении скорости звука относительным методом основными составляющими погрешности являются погрешности измерения временного интервала в основных и тарировочных опытах, а также погрешности тарировочных значений скорости звука. Одно из достоинств относительного метода состоит в том, что дифракционная поправка частично вводится в процессе тарировки установки при определении некоторого эффективного значения L, учитывающего отклонение акустического поля от идеального.

Как в абсолютных, так и в относительных измерениях следует учитывать погрешность отнесения полученных данных к определенным параметрам состояния.

Созданная установка апробирована при измерениях скорости звука в воде относительным методом. Полученные значения скорости звука имеют погрешность ~0,03%, расхождения с наиболее достоверными данными [9, 10] лежат в пределах этой погрешности.

Авторы выражают благодарность А. А. Александрову и А. И. Кочеткову за полезные консультации в процессе работы.

Институт высоких температур
Академии наук СССР
Грузинский политехнический
институт

Поступила в редакцию
24.V.1983

ЛИТЕРАТУРА

1. *Колесников А. Е.* Ультразвуковые измерения. М.: Стандарты, 1970.
2. *McSkimin H. J.* J. Acoust. Soc. Amer., 1960, v. 32, N 11, p. 1401.
3. *Кононенко В. С.* Акустический ж., 1974, т. 20, № 2, с. 269.
4. *Химунин А. С.* Дальневосточный акустический сб., 1975, № 1, с. 124.
5. *McSkimin H. J.* J. Acoust. Soc. Amer., 1961, v. 33, N 4, p. 539.
6. *McSkimin H. J.* J. Acoust. Soc. Amer., 1965, v. 37, N 2, p. 325.
7. *Greenspan M., Tschiegg C. E.* J. Acoust. Soc. Amer., 1959, v. 31, N 1, p. 75.
8. *Секоян С. С.* Измерительная техника, 1963, № 4, с. 51.
9. *Del Grosso V. A., Mader C. W.* J. Acoust. Soc. Amer., 1972, v. 52, N 5, p. 1442.
10. *Александров А. А., Ларкин Д. К.* Теплоэнергетика, 1976, № 2. с. 75.