

УДК 538.8

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ И ПОГЛОЩЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В ЖИДКОСТЯХ В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ P, ρ, T -СОСТОЯНИЙ

Л. Г. БЕЛИНСКАЯ, Б. А. БЕЛИНСКИЙ, Е. П. ТЕТЕРИН, Н. Д. ЧЕКУНОВА
(Кафедра физики)

В настоящей работе [3] дается описание конструкции измерительной камеры для проведения комплексных измерений термодинамических и кинетических параметров жидкостей, а также методики измерения скорости распространения ультразвуковых волн и плотности жидкостей в широком интервале P, ρ, T -состояний.

Ниже рассматриваются методики измерения сдвиговой вязкости и поглощения ультразвуковых волн на этой же установке.

При использовании комплексного метода измерений [1] широкое распространение получили поршневые вискозиметры, в которых η_s находят как функцию скорости падения поршня в кольцевом зазоре жидкости. В этом случае динамический коэффициент вязкости определяется по формуле

$$\eta_s = k (\rho_n - \rho_{ж}) \frac{1}{v}, \quad (1)$$

где k — конструктивная постоянная системы цилиндр—поршень; ρ_n и $\rho_{ж}$ — плотность соответственно поршня и исследуемой жидкости; v — скорость падения поршня.

Конструктивная постоянная вискозиметра либо определяется тарировкой, либо рассчитывается по формуле

$$k = g \frac{(D_2 - D_1)^3}{24D_2}, \quad (2)$$

где g — ускорение свободного падения поршня; D_1 — диаметр поршня; D_2 — внутренний диаметр цилиндра вискозиметра.

Таким образом, задача по определению η_s сводится к нахождению скорости падения поршня. Существуют различные способы определения этой скорости, и все они, как правило, связаны с измерением времени прохождения поршнем достаточно большого известного расстояния, что в ряде случаев (например, при высоких давлениях) создает значительные конструктивные трудности при относительно низкой точности измерений. Поэтому в целях упрощения конструктивных решений и повышения точности измерений была разработана оригинальная методика определения скорости падения поршня безотносительно к расстоянию, основанная на эффекте Доплера. Известно, что скорость движущегося объекта через частоту Доплера определяется из выражения [7]

$$v = \frac{c}{2} \cdot \frac{F_d}{f_0}, \quad (3)$$

где c — скорость распространения волны; F_d — частота Доплера; f_0 — несущая частота.

Из (1) и (3) следует, что коэффициент динамической вязкости может быть найден из уравнения.

$$\eta_s = \frac{2k (\rho_n - \rho_{ж})}{c} \cdot \frac{f_0}{F_d}. \quad (4)$$

Блок-схема измерительной системы, позволяющей реализовать это уравнение, представлена на рис. 1. В модуляторе 2 из непрерывных высокочастотных колебаний генератора

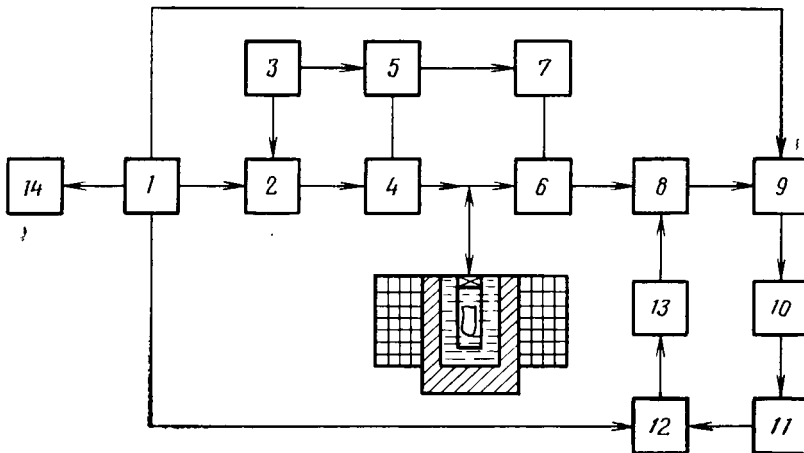


Рис. 1. Система измерения вязкости на основе эффекта Доплера.

Результаты контрольных измерений вязкости ($\eta_s \cdot 10^2$, пауз)

$P \times 10^5$	$C_3H_7OH, T = 303^\circ K$			$P \times 10^5$	$C_4H_9OH, T = 303^\circ K$		
	эффект Доплера	эффект «стоячей волны»	[8]		эффект Доплера	эффект «стоячей волны»	[8]
1	1,68	1,69	1,72	1	2,13	2,02	2,30
474	2,45	2,08	2,40	512	3,80	3,30	3,66
1000	3,34	3,15	3,29	986	4,91	4,72	4,79
1963	5,42	5,27	5,30	1998	8,39	8,21	8,24

ра 1 прямоугольными видеопульсами генератора импульсов 3 формируются радиопульсы, которые через блок строба 4, открываемого на время прохождения радиопульсов разрешающими импульсами генератора импульсов 5, поступают на пьезопреобразователь. В это время блок строба 6 закрыт запрещающими импульсами генератора импульсов 7, отсекая вход широкополосного усилителя 8 от зондирующих радиопульсов большой амплитуды. Пьезопреобразователь посылает акустический импульс в жидкость, который, отразившись от торца падающего поршня, вновь поступает на кристалл, где преобразуется в электрический импульс с частотой заполнения ($f_0 + Fa$), который через открытый блок строба 6 идет на вход широкополосного усилителя 8. В момент приема акустического сигнала блок строба 4 закрыт, таким образом исключается возможность шунтирования низкоомным выходом усилителя модулятора 2 высокоомного входа широкополосного усилителя 8, с выхода которого усиленный и ограниченный сигнал поступает на частотный детектор 9, в котором сигналом опорной частоты f_0 являются высокочастотные колебания генератора 1. Частотный детектор 9 выделяет частоту Доплера, которая через полосовой фильтр Дюпелерских частот 10 и усилитель низкой частоты 11 подается на один из входов частотомера 12, работающего в режиме счета отношения частот. На второй вход частотомера 12 подается сигнал с частотой f_0 . С выхода частотомера 12 цифровой сигнал f_0/Fa поступает на дифференцирующий блок 13, связанный с запирающим входом широкополосного усилителя 8. Применение дифференцирующего блока исключает ошибки измерения, связанные с неравномерностью падения поршня, так как он включает тракт усиления широкополосного усилителя на постоянную работу при трех стабильных показаниях отношения частот в 2 и 3 первых разрядах соответственно для пяти- и шестизначных значений отношения f_0/Fa .

Максимальная относительная погрешность нахождения η_s для данного метода не превышает 2×10^{-2} . Результаты контрольных измерений представлены в табл. 1.

Приведенная выше методика определения динамического коэффициента вязкости на основе эффекта Доплера требует сложной комплексной нестандартной радиоэлектронной аппаратуры. Поэтому была разработана иная методика определения скорости па-

дения поршня, отличающаяся той же точностью, но требующая менее сложную аппаратуру.

При образовании стоячей волны между плоскостью ультразвукового излучателя и торцом падающего поршня скорость последнего может быть определена из выражения [2]

$$v = \frac{cn}{2f_0\tau}, \quad (5)$$

где c — скорость ультразвука; f_0 — частота ультразвукового излучения; n — число импульсов, соответствующих максимумам (или минимумам) стоячей волны; τ — интервал времени, за которое отсчитывается n импульсов.

В выражении (5) отношение n/τ есть число максимумов (или минимумов) стоячей волны в единицу времени или же частота следования последних при движении поршня вдоль стоячей волны со скоростью v .

Обозначим $\frac{n}{\tau} = F$, тогда выражение (5) примет вид

$$v = \frac{c}{2} \cdot \frac{F}{f_0}. \quad (6)$$

Выражение (6) имеет тот же вид, что и (3), поэтому аналитическое определение коэффициента η_s может проводиться из уравнения (4).

Блок-схема измерительной системы вязкости на основе эффекта «стоячей волны» представлена на рис. 2.

Генератор высокой частоты 1 вырабатывает непрерывный высокочастотный сигнал, поступающий на пьезопреобразователь, который излучает падающую ультразвуковую волну. Дойдя до торца поршня, волна отражается и вновь поступает на пьезопреобразователь. В результате наложения падающей и отраженной волн образуется стоячая волна. Полученный результирующий сигнал через согласующее устройство 2 поступает на амплитудный детектор 3. После детектирования низкочастотный сигнал, соответствующий кривой реакции пьезопреобразователя на стоячую волну, усиливается усилителем низкой частоты 4, проходит через полосовой фильтр низкой частоты 5 и вызывает срабатывание спусковой схемы 6 (триггер Шмидта). Импульсы в определенной последовательности со спусковой схемы 6 и высокочастотный сигнал с генерато-

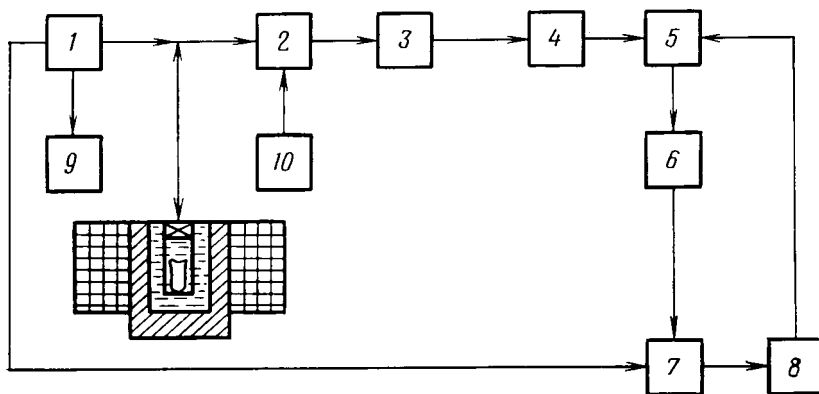


Рис. 2. Система измерения вязкости жидкости на основе эффекта «стоячей волны».

ра высокой частоты 1 поступают на частотомер 7, работающий в режиме счета отношения частот. Выход частотомера 7 соединен с дифференцирующим блоком 8, связанным с усилителем низкой частоты 5. Работа дифференцирующего блока осуществляется аналогично работе описанного выше. Контроль частоты генератора 1 производится частотомером 9. Контроль настройки согласующего устройства выполняется по осциллографу 10.

Максимальная относительная ошибка при определении η_s не превышает 2×10^{-2} .

Известно, что при распространении плоской ультразвуковой волны в жидкостях ее амплитуда изменяется по закону [5]:

$$A_x = A_0 e^{-\alpha \Delta x}, \quad (7)$$

где A_0 и A_x — амплитуда ультразвуковой волны соответственно в точке излучения и приема.

Отсюда коэффициент амплитудного поглощения ультразвука при измерении затухания в децибелах с учетом квадратичного закона изменения поглощения в зависимости от частоты в жидкостях определяется

$$\frac{\alpha}{f^2} = \frac{\Delta A}{20 \lg e \Delta x f^2}, \quad (8)$$

Блок-схема импульсной измерительной системы, позволяющей определять коэффициент поглощения для двух фиксированных расстояний по формуле (8) методом импульса сравнения, приведена на рис. 3.

Работа системы осуществляется следующим образом: из непрерывных высокочастотных колебаний генератора высокой частоты 1 в модуляторе 2 прямоугольными импульсами генератора импульсов 3 формируются прямоугольные радиоимпульсы, которые через широкополосный усилитель 4 подаются на излучающий пьезопреобразователь. После прохождения одного из акустических путей через исследуемую жидкость зондирующий акустический импульс преобразуется одним из приемных пьезоэлектрических кристаллов в электрический сигнал, который через коммутатор 5 идет в широкополосный усилитель 6, усиливается и детектируется амплитудным детектором 7, затем поступает на осциллограф 8 и импульсный вольтметр 13. Из тех же непрерывных высокочастотных колебаний генератора 1 в модуляторе 9 прямоугольными импульсами, задержанными во времени относительно импульсов генератора 3, формируются калибровочные радиоимпульсы. Че-

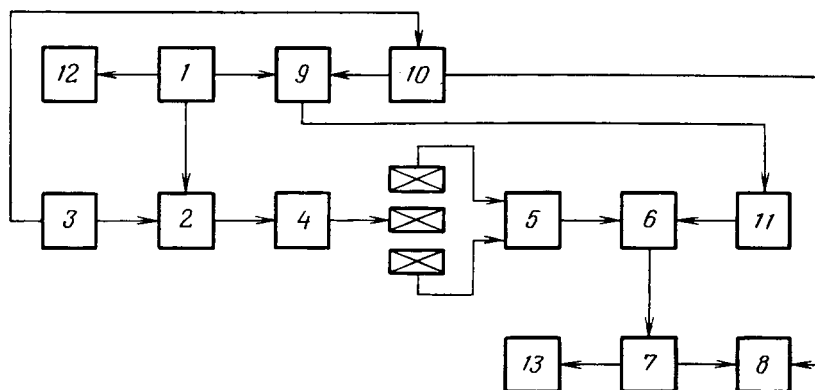


Рис. 3. Блок-схема измерения коэффициента поглощения ультразвуковых волн для двух фиксированных расстояний.

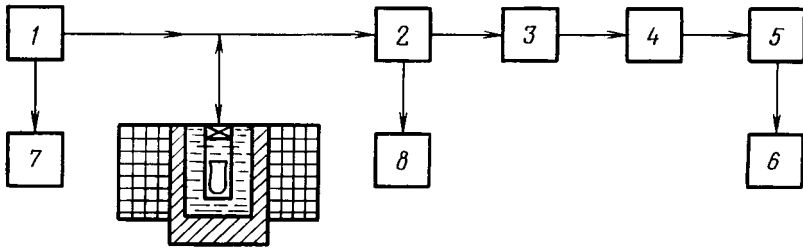


Рис. 4. Блок-схема измерения коэффициента поглощения ультразвуковых волн методом акустического интерферометра.

рез attenuатор 11 эти импульсы поступают в широкополосный усилитель 6, детектируются детектором 7 и также подаются на осциллограф 8. Развертка осциллографа 8 синхронизирована импульсами генератора 3 по цепи синхронизации через генератор 10. Контроль частоты генератора 1 производится частотомером 12.

Формирование калибровочного импульса из того же непрерывного высокочастотного сигнала, что и зондирующий импульс, и пропускание его через тот же усилительный тракт в отличие от системы, описанной в работе [4], производится в целях предотвращения возможных ошибок при измерениях, обусловленных неравномерностью частотных и амплитудных характеристик усилительного тракта [8].

Анализ конструктивных характеристик акустических путей измерительной камеры и электрических параметров электронной аппаратуры по методикам, предложенным в работах [5, 10], позволил определить оптимальные параметры зондирующих импульсов, сводящие к возможному минимуму ошибки, которые обусловлены дифракцией, интерференцией, краевыми эффектами, эффектами разброса частот, присущими процессу формирования (модулирования) зондирующих импульсов.

Параметры зондирующих импульсов:
 --- частота заполнения $f \geq 10$ МГц,
 --- длительность импульса $T_n \geq 4,73$ мкс,
 --- амплитуда импульса $V \leq 15$ В,
 --- частота следования импульсов $F \leq \leq 21,3$ КГц.

Описанная система позволяет проводить измерения с максимальной относительной погрешностью $\sim 8 \times 10^{-2}$.

Результаты контрольных измерений на частоте 22 МГц представлены в табл. 2. Однако надо иметь в виду, что при использовании методов фиксированного расстояния возможны систематические ошибки, поэтому необходим жесткий контроль. Метод переменного расстояния лишен отмеченного недостатка.

С этой точки зрения определенный интерес представляет интерферометрический метод определения коэффициента поглощения ультразвуковых волн в системе с падающим поршнем при одновременном измерении сдвиговой вязкости и скорости. В этом случае коэффициент поглощения находится путем измерения отношения максимумов и минимумов амплитуды кривой реакции пьезопреобразователя для двух различных положений поршня [6]:

$$\alpha\lambda = \frac{2}{Q_2 - Q_1} (\operatorname{arctg} \sqrt{B} - \operatorname{arctg} \sqrt{A}), \quad (9)$$

$$\text{где } A = \left(\frac{V_{s \max}}{V_{s \min}} \right)_1; \quad B = \left(\frac{V_{s \max}}{V_{s \min}} \right);$$

Q_1 и Q_2 — порядковые номера максимумов на кривой реакции пьезопреобразователя.

Блок-схема системы измерения коэффициента поглощения ультразвука интерферометрическим методом приведена на рис. 4.

Непрерывные высокочастотные колебания генератора 1 поступают на пьезопреобразователь и преобразуются в акустические волны. В результате наложения падающей и отраженной от торца поршня волн образуется стоячая волна. Кривая реакции пьезопреобразователя при движении поршня на-

Т а б л и ц а 2

Результаты контрольных измерений коэффициента поглощения ($\frac{\alpha}{f^2} \cdot 10^{-17}$, см $^{-1}$ с 2)

$P \times 10^{-8}$	$C_2H_5OH, T = 303^\circ K$			$P \times 10^{-8}$	$C_4H_9OH, T = 303^\circ K$		
	импульсный метод	интерферометрический метод	[9]		импульсный метод	интерферометрический метод	[9]
1	68,0	68,9	62,7	1	83,7	84,7	77,4
474	52,7	61,0	48,4	512	65,4	59,2	60,2
1000	46,1	45,9	42,4	986	62,8	63,0	57,2
1963	43,0	43,6	39,4	1998	59,3	58,0	55,0

кладывается на непрерывные высокочастотные колебания, которые через согласующее устройство 2 поступают на амплитудный детектор 3, детектируются, в результате чего выделяется кривая реакции, которая усиливается усилителем низкой частоты 4 и через полосовой фильтр низкой частоты поступает на самописец 6, движение ленты которого синхронизировано с движением поршня-отражателя. Контроль частоты генератора 1 осуществляется частотомером 7.

Подстройка согласующего устройства 2 производится с помощью осциллографа 8.

Наибольшая частота, которая была достигнута при измерении поглощения данным методом, — 37 МГц. Максимальная относительная погрешность метода — 1×10^{-1} .

Таковы особенности методики измерения сдвиговой вязкости и коэффициента поглощения ультразвуковых волн в измерительной камере установки для комплексного исследования жидкостей в широком диапазоне P, ρ, T -состояний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белинский Б. А., Мамедов И. А. Разработка методики измерения динамической вязкости жидкостей в ультразвуковой измерительной камере. — В сб.: Применение ультразвуки к исследованию вещества. МОПИ, вып. 18, 1971, с. 171—175. — 2. Белинский Б. А., Ходжаев С. А., Ергопуло Е. В. Методы измерения сдвиговой вязкости и скорости ультразвука в жидкостях по счету импульсов. — В сб.: Ультразвуковая техника. М., НИИМАШ, вып. 4, 1965, с. 6—8. — 3. Белинская Л. Г., Белинский Б. А., Тетерин Е. П., Чекунова Н. Д. Комплексные исследования жидкостей в широком интервале давлений и температур на основе акустической спектроскопии. — Изв. ТСХА, 1979, вып. 3,

с. 161—168. — 4. Колесников А. Е. Ультразвуковые измерения. М., Изд-во стандартов, 1970. — 5. Ноздрев В. Ф. Применение ультразвуки в молекулярной физике. М., ГИФМЛ, 1958. — 6. Ноздрев В. Ф., Федорищенко Н. В. Молекулярная акустика. М., «Высшая школа», 1974. — 7. Сайбель А. Г. Основы радиолокации. М., «Советское радио», 1961. — 8. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М., «Мир», 1972. — 9. Hawley S., Allegra J., Holton G. — JASA, 1970, vol. 47, p. 137—143. — 10. Law A. K. — Canad. J. of Physics, 1970, vol. 48, p. 2692—2698.

Статья поступила 25 октября 1978 г.