

В. ЦВЕТКОВ и В. МАРИНИН

ОБ ОДНОМ ОПТИЧЕСКОМ МЕТОДЕ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА

(Представлено академиком А. А. Лебедевым 27 VI 1949)

Среди методов определения скорости ультразвука в прозрачных жидкостях и твердых телах хорошо известен и широко применяется оптический метод, использующий явление дифракции света на ультразвуковой решетке. Удобство его заключается в быстроте измерений. Существенным условием, которому должен удовлетворять исследуемый этим методом объект, является его оптическая однородность, ибо даже незначительные локальные колебания показателя преломления в изучаемой среде резко снижают четкость дифракционной картины. Кроме того, для получения достаточно большого числа дифракционных максимумов, достаточно отстоящих один от другого, приходится пользоваться длиннофокусными оптическими системами с большим отверстием объектива, что неизбежно увеличивает объем исследуемого вещества. Последнее обстоятельство практически сужает область применимости этого метода, поскольку поддержание оптической однородности жидкости в большом объеме, особенно при высокой (или низкой) температуре, встречает значительные экспериментальные трудности.

В настоящей работе излагается другой оптический метод, позволяющий производить измерения не менее быстро и почти свободный от указанных трудностей. Хотя на возможность его применения было указано много лет тому назад⁽¹⁾, для количественных измерений скорости ультразвука он мало использовался.

Метод основан на непосредственном наблюдении ультразвуковой решетки, создаваемой плоской ультразвуковой волной, при ее стробоскопическом освещении с помощью светового затвора, синхронизированного с генератором ультразвука. Возможность получения изображения решетки в виде системы резко очерченных эквидистантных полос явствует из схемы рис. 1.

Здесь K — кварц, возбуждающий в жидкости, заполняющей кювету C , плоские ультразвуковые волны, распространяющиеся в направлении x . Показатель преломления n среды, находящейся в звуковом поле, может быть представлен как функция времени t и координаты x :

$$n = n_0 + \Delta n = n_0 + \Delta n_0 \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right), \quad (1)$$

где T — период ультразвуковых колебаний, λ — длина звуковой волны, n_0 — показатель преломления в отсутствие ультразвука.

Таким образом, в определенный момент времени t показатель преломления является синусоидальной функцией координаты x .

Если в направлении y , параллельном фронту волн, распространяется параллельный пучок световых лучей $S_1 S_2$, то различные лучи, попадая в места с различным градиентом показателя преломления dn/dx , будут различным образом отклоняться в положительном или отрицательном направлении оси x . О характере пересечения отклоненных

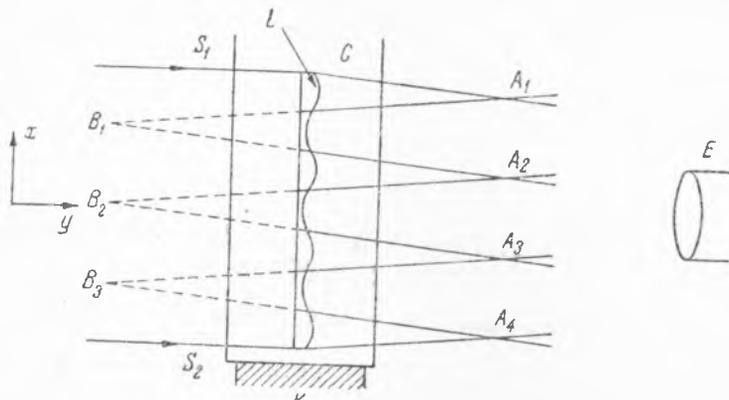


Рис. 1

лучей проще всего можно судить, если среду с переменным показателем преломления в первом приближении заменить системой чередующихся плоско-выпуклых и плоско-вогнутых цилиндрических линз L , изображенных на рис. 1. При этом на расстоянии, равном одной длине волны λ , очевидно, уместятся одна собирающая и одна рассеивающая

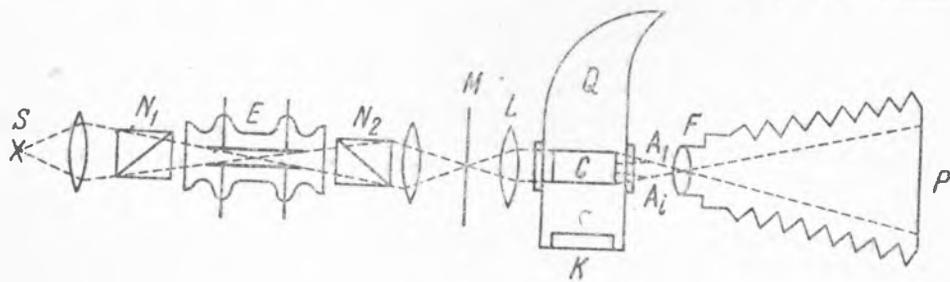


Рис. 2

линза. Как непосредственно видно из чертежа, лучи, после преломления в системе собирающих линз, будут фокусироваться на прямых линиях, перпендикулярных плоскости xu и отстоящих одна от другой в направлении x на расстоянии λ . След этих линий на плоскости xu изображают точки A_1, A_2, A_3, \dots . В то же время совокупность рассеивающих линз дает перед кюветтой аналогичную систему мнимых изображений B_1, B_2, B_3, \dots смещенную по отношению к A_1, A_2, A_3, \dots на $\lambda/2$ по оси x .

Так как системы прямых A_1, A_2, \dots и B_1, B_2, \dots движутся в направлении x со скоростью звука, то четкая фиксация их, например в микроскоп F , возможна при применении стробоскопического источника света, синхронно связанного с колебаниями кварца K . Измерение расстояний между полосами непосредственно дает λ , а следовательно, и величину скорости звука.

Схема оптической части применявшейся нами установки изображена на рис. 2. В качестве светового затвора используется ячейка Керра E , включенная на генератор, питающий пьезокварц K . Дополнительно на ячейку подается постоянное напряжение такой величины,

чтобы затвор „открывался“ один раз в течение периода T . Световой пучок после прохождения через ячейку Керра и николи N_1, N_2 освещает щель M , установленную параллельно плоскости звуковых волн, возбуждаемых кварцем K в кюветте Q (заполнена керосином). Последняя имеет плоско-параллельные стенки с окошками 10 мм в диаметре, заклеенными хорошими плоско-параллельными стеклами. Объектив L делает световой пучок строго параллельным, прежде чем он попадает в кюветту C , содержащую исследуемую жидкость. Кюветтой C служит прямоугольный сосуд с боковыми стенками из тонкого ($\sim 0,1$ мм) стекла, две из которых являются окошками для светового пучка

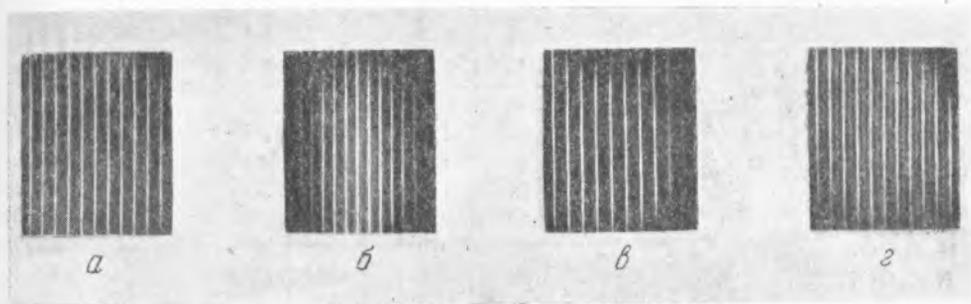


Рис. 3. Ультразвуковая решетка в некоторых жидкостях. Увел. 3,740. a — бензол, $t = 22,2^\circ$, $\nu = 2820,92$ кгц; $б$ — этиловый спирт, $t = 20,0^\circ$, $\nu = 2860,25$ кгц; $в$ — муравьиная кислота, $t = 20,0^\circ$, $\nu = 2714,52$ кгц; $г$ — пальмитиновая кислота, $t = 62,1^\circ$, $\nu = 2785,60$ кгц

(7×10 мм), две другие (14×14 мм) для ультразвукового. В наших опытах объем исследуемой жидкости не превышал $3,3$ см³ и в принципе может быть еще значительно уменьшен.

Система действительных изображений щели $A_1 \dots A_i$ или мнимых $B_1 \dots B_i$ (не изображенных на рис. 2) объективом F фокусируется на фотопластинке P . В наших опытах обычно использовалась система $B_1 \dots B_i$.

При хорошей юстировке всей установки и удачном подборе жидкости, наполняющей ячейку Керра E (смесь бензола с нитробензолом), полосы, изображаемые на пластинке P , могут быть весьма резкими и тонкими. Установка позволяла фотографировать до десяти полос, что обеспечивало точность в определении скорости до $0,1\%$. Некоторые фотографии приведены на рис. 3.

Так как время опыта продолжается не более нескольких секунд и так как объем исследуемой жидкости невелик, установка позволяет производить надежные измерения при температурах, значительно отличающихся от комнатной. Для этой цели кюветта Q снабжается нагревателем.

При правильной юстировке всей системы кюветта C легко может быть удалена и заменена другой, наполненной другой жидкостью, что облегчает и ускоряет производство серийных измерений.

В табл. 1 приводятся результаты измерений, сделанных в ряде предельных кислот и нормальных спиртов, в основном на частоте 2700 кгц. Частота колебаний генератора измерялась волномером типа КВ-5 с точностью $0,1\%$. Молярная скорость звука R вычислялась по известному соотношению

$$R = \frac{M}{\rho} c^{1/2}, \quad (2)$$

где c — измеренная скорость звука, M — молекулярный вес жидкости, ρ — ее плотность. Измерения последней производились с помощью пикнометра.

Таблица 1

Молярная скорость ультразвука в предельных жирных кислотах и H -спиртах

| Формула | Т-ра в °С | Плотность | Измеренная скорость звука в м/сек. | Молярная скорость звука | Молярная скорость на группу (СН ₂) | Адиабатич. сжимаемость, атм ⁻¹ ·10 ⁶ |
|---|-----------|-----------|------------------------------------|-------------------------|--|--|
| НСООН | 20 | 1,229 | 1401 | 419 | | 41,46 |
| H ₃ C ₃ ООН | 20 | 1,061 | 1253 | 610 | 191 | 60,01 |
| H ₅ C ₅ ООН | 20 | 1,005 | 1270 | 798 | 188 | 61,66 |
| H ₇ C ₇ ООН | 20 | 0,957 | 1234 | 987 | 189 | 68,61 |
| H ₁₁ C ₆ ООН | 20 | 0,927 | 1281 | 1360 | 187 | 65,79 |
| H ₁₃ C ₇ ООН | 20 | 0,917 | 1304 | 1550 | 190 | 64,16 |
| H ₃₁ C ₁₆ ООН | 62,1 | 0,855 | 1328 | 3294 | 194 | 66,37 |
| | | | | | 189,8 ± 1,7 | |
| СН ₃ ОН | 20 | 0,7948 | 1156 | 423 | 191 | 94,08 |
| С ₂ Н ₅ ОН | 20 | 0,7892 | 1165 | 614 | 190 | 93,33 |
| С ₃ Н ₇ ОН | 20 | 0,8040 | 1247 | 804 | 188 | 79,98 |
| С ₄ Н ₉ ОН | 20 | 0,8103 | 1278 | 992 | 190 | 75,61 |
| С ₈ Н ₁₇ ОН | 20 | 0,8270 | 1381 | 1752 | 194 | 63,38 |
| С ₁₀ Н ₂₁ ОН | 20 | 0,829 | 1413 | 2141 | 192 | 60,42 |
| С ₁₂ Н ₂₅ ОН | 22,3 | 0,831 | 1433 | 2526 | 192 | 58,63 |
| С ₁₄ Н ₂₉ ОН | 38,4 | 0,824 | 1404 | 2911 | 189 | 61,59 |
| С ₁₈ Н ₃₇ ОН | 59,1 | 0,812 | 1336 | 3666 | | 69,00 |
| | | | | | 190,7 ± 1,5 | |

Как показывают приведенные результаты, изменение молярной скорости на группу СН₂ в гомологических рядах составляет ~190, что хорошо согласуется со значениями, полученными другим методом^(2,3).

Физический институт
Ленинградского государственного университета
им. А. А. Жданова

Поступило
22 VI 1949

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Е. Гидеман, УФН, 16, 586 (1936). ² И. Г. Михайлов и А. М. Нижин, ДАН, 53, 1689 (1947). ³ R. T. Lageman, Journ. Chem. Phys., 16, 247 (1948).