

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ ОТ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

А. М. Евтющенков и Ю. Ф. Кияченко

Описан интерференционный измеритель производных показателя преломления жидкостей от давления и температуры. Проведены измерения для бензола, толуола, ацетона, четыреххлористого углерода и воды. Типичная погрешность измерения при перепадах давления и температуры  $2 \text{ кг/см}^2$  и  $0.2 \text{ К}$  составляет  $0.5\%$ .

Отсутствие надежных данных о зависимости показателя преломления жидкостей от термодинамических переменных является одной из проблем, возникающих при сравнении результатов экспериментальных исследований коэффициента рассеяния света жидкостей с теоретическими расчетами [1]. В частности, почти полностью отсутствует информация о производной  $(dn/dT)_p$  (здесь и далее обозначения традиционные), которая особенно существенна при расчете отношения Ландау—Плачека [1]. Для решения этой задачи мы изготовили установку и измерили для ряда жидкостей производные  $n_p = (dn/dP)_T$  и  $n_T = (dn/dT)_P$ .

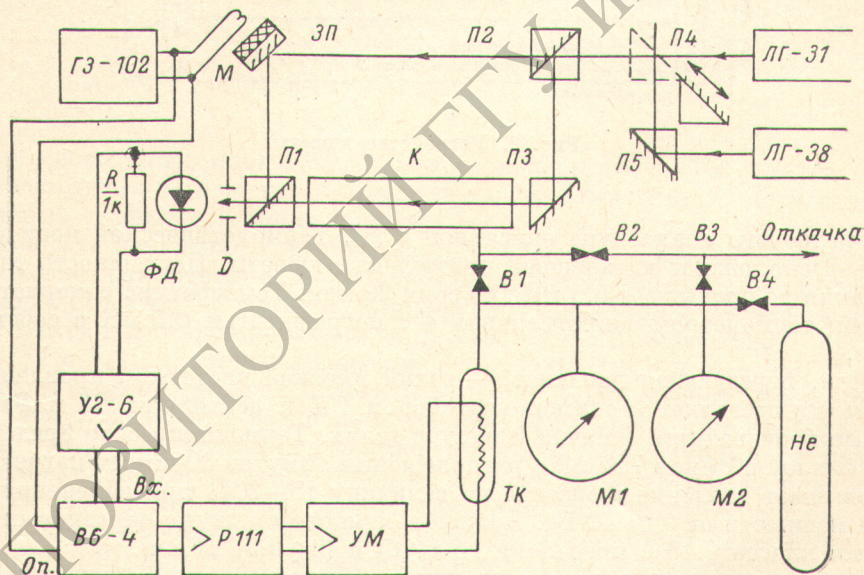


Рис. 1. Схема установки.

М — постоянный магнит, приклеенный к подвижному зеркалу; ГЗ-102 — звуковой генератор,  $R$  — сопротивление нагрузки фотодиода,  $D$  — диафрагма, У2-6 — избирательный усилитель, В6-4 — синхронный детектор, Р111 — операционный усилитель, УМ — усилитель мощности, В1 и В2 — вспомогательные вентили, используемые при заполнении кюветы; В3 и В4 — вентили.

Эти производные сводятся к обычно фигурирующим в теории величинам следующими очевидными соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} (\partial n / \partial p)_T &= n_p (\partial P / \partial p)_T, \\ (\partial n / \partial T)_p &= n_T + n_p (\partial P / \partial T)_p. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В ее основу положен интерферометр Маха—Цендера [2], образованный призмами  $П1$ ,  $П2$ ,  $П3$  и подвижным зеркалом  $ЗП$ . В одном из плеч интерферометра находится кювета  $K$  с исследуемой жидкостью. Источники света — лазеры ЛГ-31 ( $\lambda=441.6$  нм) и ЛГ-38 ( $\lambda=633$  нм). Смена длины волны производится перемещением призмы  $П4$ . Изменение разности хода лучей в интерферометре, связанное с изменением показателя преломления, равно

$$\Delta l = L\Delta n, \quad (2)$$

где  $L$  — длина кюветы,  $\Delta n$  — изменение показателей преломления. Подвижное зеркало модулирует разность хода на величину  $\sim \pm\lambda/4$  с частотой 33 Гц, благодаря чему на выходе синхронного детектора выделяется сигнал, пропорциональный малым отклонением разности хода от величины

$$\Delta l = \lambda(m + 1/2), \quad (3)$$

где  $m$  — целое число.

Устройство кюветы изображено на рис. 2. Корпус кюветы  $1$  изготовлен из нержавеющей стали, окна  $2$  — из плавленного кварца. Окна уплотнены полиэтиленовыми кольцами  $3$ . Длина кюветы (расстояние между внутренними поверхностями окон) — 100 мм, диаметр канала — 4 мм. Система термостати-

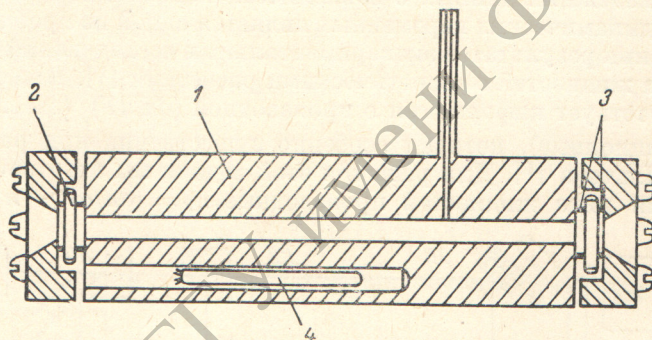


Рис. 2. Устройство кюветы.

рования кюветы аналогична описанной в [3]. Термометрический мост и нагреватель расположены на внешней поверхности кюветы. Погрешность термостатирования не превышает 0.5 мК за время 20 мин. Температура измеряется платиновым термометром сопротивления  $4$  с погрешностью 0.5 мК в собственной шкале.

Среда, передающая давление, — гелий высокой чистоты. Управление давлением осуществляется термокомпрессором  $TK$  и вентилями  $B3$  и  $B4$ , через которые производится откачка и напуск гелия. Термокомпрессор представляет собой баллон объемом 750 см<sup>3</sup> с расположенным внутри 10-омным нагревателем. Он повышает давление в системе на величину 15—20% при изменении подводимой мощности от 0 до 40 Вт. Давление измеряется двумя образцовыми манометрами класса 0.16 с пределами ( $-1 \div 0$ ) и ( $0 \div 2.5$ ) кг/см<sup>2</sup>.

Измерение величин  $n_P$  и  $n_T$  осуществляется по принципу, близкому к описанному в [4]. Выход синхронного детектора подключается к регуляторам давления или температуры, благодаря чему интерферометр поддерживается в состоянии, определяемом соотношением (3). При измерении производной  $n_P$  (этот случай изображен на рис. 1) напуском или откачкой гелия система из одного такого состояния переводится в другое. При этом интерферометр «проскакивает» несколько порядков интерференции, число которых считается «вручную» по периодическим отклонениям стрелки синхронного детектора. В этом случае измеряемая величина  $n_P$  (в предположении линейной зависимости  $n$  от  $P$ ) равняется

$$n_P = \frac{\Delta m \lambda}{L \Delta P}, \quad (4)$$

где  $\Delta m$  — число порядков интерференции, соответствующее изменению давления на величину  $\Delta P$ .

Случай измерения  $n_T$  отличается тем, что выход синхронного детектора подключается через систему усилителей к нагревателю кюветы, а давление поддерживается на уровне атмосферного. Выражение для  $n_T$  (в тех же предположениях) имеет вид

$$n_T = \frac{\Delta m \lambda}{L \Delta T} - (n - n_b) \alpha, \quad (5)$$

где  $\Delta m$  — также число порядков интерференции, соответствующее изменению температуры на величину  $\Delta T$ ,  $n$  и  $n_b$  — показатели преломления измеряемой жидкости и воздуха соответственно,  $\alpha = 1.7 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  — коэффициент линейного расширения корпуса кюветы. Для уменьшения влияния дрейфов установки

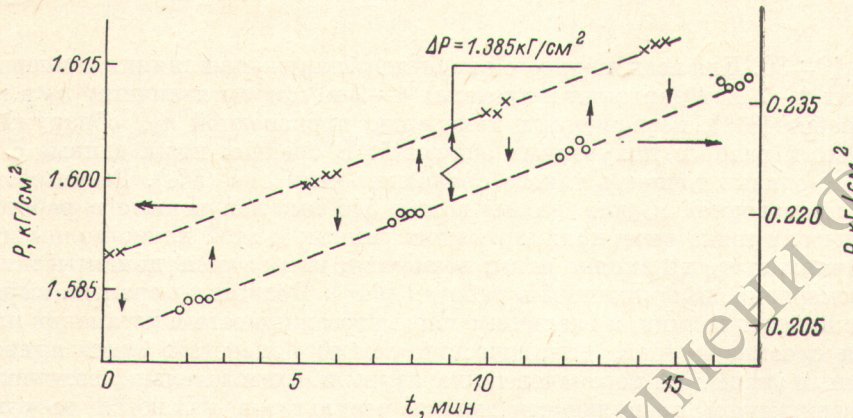


Рис. 3. «Ход» давления в кювете с толуолом.  
Стрелки  $\uparrow$  и  $\downarrow$  обозначают моменты напуска и стравливания давления.

измерения проводились многократно, с чередованием напуска и откачки гелия в случае измерения  $n_P$  и нагревания и охлаждения кюветы в случае измерения  $n_T$ . Типичный график измерения производной  $n_P$  толуола приведен на рис. 3.

Погрешности измерения величин  $n_T$  и  $n_P$ , связанные с классом измерительных приборов, растяжением кюветы под давлением, неточностью поправки в выражении (5), а также шумами, температурным дрейфом и нестабильностью интерферометра и электронной схемы не превышают соответственно  $0.3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  и  $0.3 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$ . При типичных значениях  $n_T = 60 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  и  $n_P = 5 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$  это приводит к относительной погрешности  $\sim 0.5\%$ . Измерения, проведенные с интервалом 1 месяц при различных заполнениях одним и тем же образцом, показали, что результат воспроизводится в пределах указанной погрешности. Возможное влияние растворения гелия на результаты измерения не превышает по оценкам  $10^{-2}\%$ . Это связано как с малым влиянием растворенного газа на показатель преломления, так и с тем, что время установления равновесия газа с жидкостью  $\sim 10^7 \text{ с}$ , что в 1000 раз превышает время измерения.

Для проверки работы установки мы измерили показатели преломления гелия и аргона. Приведенные к нормальным условиям эти значения оказались равными  $n_{633\text{нм}} = 1.00003494$ ,  $n_{441.6\text{нм}} = 1.00003504$  для гелия и  $n_{633\text{нм}} = 1.0002329$ ,  $n_{441.6\text{нм}} = 1.0002865$  для аргона. Значения  $n-1$  отличаются от табличных [5, 6] не более чем на 0.2%.

Измерения величин  $n_T$  и  $n_P$  были выполнены для следующих жидкостей: ацетон, бензол, толуол, четыреххлористый углерод и вода. Вода была двукратной перегонки, остальные жидкости — марки ХЧ. Результаты измерений приведены в таблице. Там же приведены результаты расчета производной  $(\partial n / \partial T)_P$  по формуле (1).

Измерения выполнены для температуры  $20^\circ \text{ C}$ . Перепады температуры и давления составляли 0.2 К и  $1 \div 2 \text{ кГ/см}^2$ , что соответствовало изменению числа

Вещество	$\lambda$ , нм	$n_T \cdot 10^5$ К	$n_P \cdot 10^{10}$ , Па	$(\partial n/\partial T)_P \cdot 10^5$ К
Ацетон	633.0	-53.0	4.58	$-0.6 \pm 0.5$
	441.6	-54.5	4.71	$-0.6 \pm 0.5$
Бензол	633.0	-63.3	4.92	$0.4 \pm 0.5$
	441.6	-66.3	5.18	$1.0 \pm 0.5$
Толуол	633.0	-55.7	4.62	$0.4 \pm 0.5$
	441.6	-58.4	4.89	$1.0 \pm 0.5$
Четыреххлористый углерод	633.0	-59.6	5.07	$0.5 \pm 0.5$
	441.6	-61.8	5.24	$0.3 \pm 0.5$
Вода	633.0	$-8.5 \pm 0.3$	$1.50 \pm 0.03$	$-1.7 \pm 0.5$
	441.6	$-8.5 \pm 0.3$	$1.53 \pm 0.03$	$-1.6 \pm 0.5$

полос на  $10 \div 30$ . Для всех жидкостей не было обнаружено влияния температуры в пределах  $1-2$  К и давления в пределах  $1-2$  кГ/см<sup>2</sup> на величины  $n_T$  и  $n_P$ .

Ряд работ [7-9], посвященных измерению производной  $n_T$ , обнаруживают значительный разброс полученных значений. В среднем наши данные с ними совпадают, однако точность такого сравнения невысока (5%). Результаты измерения производной  $n_P$  для длины волны 546 нм, полученные в работе [7], систематически ниже интерполяции наших данных к этой длине волны на 3-4%. Причины этого не вполне ясны; возможно, играет роль динамический характер измерений, выполненный в работах [8, 9]. Поскольку времена выравнивания в жидкости велики, а различные параметры жидкости и установки плавно меняются с температурой, динамический режим измерений будет приводить к смещенным значениям перепадов температуры и, следовательно, величины  $n_T$ .

Подтверждением правильности наших результатов являются результаты калибровки по аргону и гелию, а также прямые измерения производной  $(\partial n/\partial T)_P$ , выполненные в [10]. В этой работе для воды получено значение  $1.93 \cdot 10^{-5}$  К<sup>-1</sup> ( $\lambda = 530$  нм), что хорошо согласуется с нашим результатом. Полученные результаты вместе с термодинамическими данными позволяют рассчитать интенсивность изотропного рассеяния света и отношение Ландау-Плачека (в рамках соответствующих теорий) с точностью, типичной для современных экспериментальных работ [11, 12]. Наши данные позволяют также сделать вывод о роли флуктуаций температуры в рассеянии света. Оценки по формулам из [1, 7] показывают, что относительный вклад рассеяния на флуктуациях температуры для этих жидкостей не превышает 0.03-0.05%, что качественно согласуется с выводами работ [1, 7]. Поправки к отношению Ландау-Плачека для бензола, толуола, четыреххлористого углерода и ацетона составляют соответственно  $(-3 \pm 3)\%$ ,  $(-3 \pm 3)\%$ ,  $(-2 \pm 2)\%$  и  $(3 \pm 3)\%$ . Для воды эта поправка равна  $(50 \pm 20)\%$ , однако, поскольку для воды  $(C_P - C_V)/C_V \approx 0.007$ , эта поправка, по видимому, пренебрежимо мала.

Мы признательны В. А. Медведеву, В. К. Ярунцеву и Е. Е. Городецкому за помощь при разработке установки и полезное обсуждение результатов.

#### Литература

- [1] И. Л. Фабелинский. Молекулярное рассеяние света. «Наука», М., 1965.
- [2] М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. «Наука», М., 1973.
- [3] М. А. Анисимов, А. М. Евтюшенков, Ю. Ф. Кияченко, И. К. Юдин. Письма ЖЭТФ, 20, 378, 1974.
- [4] Я. С. Агранович, В. М. Малышев. Измерительная техника, 5, 93, 1974.
- [5] В. Кеезом. Гелий. ИЛ, М., 1949.
- [6] Дж. Кей, Т. Лэби. Таблицы физических и химических постоянных. Физматгиз, М., 1962.
- [7] D. J. Coumou, E. L. Mackor, J. Humans. Trans. Farad. Soc., 60, 1539, 1964.
- [8] G. Abbate, A. Attanasio, U. Bernini, E. Ragozzino, F. Somma. J. Phys. D, 9, 1945, 1976.
- [9] D. Beysens, P. Callmettes. J. Chem. Phys., 66, 766, 1977.
- [10] А. И. Ерохин, Н. В. Морачевский, Ф. С. Файзулов. ЖЭТФ, 74, 1336, 1978.
- [11] E. R. Pike, W. R. Pomeroy, J. M. Vaughan. J. Chem. Phys., 62, 3188, 1975.
- [12] Y. Kato, G. A. Zdasiuk. J. Opt. Soc. Am., 65, 995, 1975.

Поступило в Редакцию 4 июля 1980 г.