

03;07;12

©1994

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СЖИМАЕМОСТИ ЖИДКОСТИ ПРИ МАЛЫХ ДАВЛЕНИЯХ

*В.Б.Константинов, А.Ф.Малый,
Л.Г.Малхасян, Н.Ю.Дунаев, Д.Ф.Черных*

Одним из показателей сжимаемости жидкости является изменение ее коэффициента преломления. Из-за малости коэффициентов сжимаемости жидкостей (для воды порядка 10^{-5} атм $^{-1}$) их определение обычно осуществляется при высоких давлениях [1]. Интерферометрия является одним из эффективных методов измерения малых изменений показателя преломления. Метод голографической интерферометрии обладает рядом преимуществ перед обычной техникой [2], упрощая проведение эксперимента. При применении голографического интерферометра существенно снижаются требования к качеству оптических элементов системы, осуществляется автоматическая компенсация исходных температурных полей и прочих неоднородностей в оптическом тракте. Введение оптического гетеродинамирования [2,3] упрощает интерпретацию интерферограмм. Использование малогабаритного голографического интерферометра с фототермопластическим регистратором голограмм [4] и компьютерной обработкой изображений позволяет вследствие высокой чувствительности определять коэффициенты сжимаемости жидкостей при малых изменениях давления, растворимость газов в жидкостях и исследовать переходные тепловые процессы на границе двух сред.

Из выражения для изотермической сжимаемости

$$\kappa = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta \rho}{\Delta P}, \quad (1)$$

где $\Delta \rho = \rho - \rho_0$ — разность между плотностью до и после приращения давления при сжатии, следует

$$\frac{\rho_0}{\rho} = 1 - \kappa \Delta P. \quad (2)$$

С другой стороны, Δn , связанное с $\Delta \rho$, определяется из изменения длины оптического пути $\Delta S = \Delta n d$, но

$\Delta S = \Delta K \lambda$, где ΔK — изменение числа интерференционных полос, сопровождающее изменение длины оптического пути ΔS . Тогда

$$\Delta n = \frac{\lambda}{l} \Delta K, \quad (3)$$

где λ — длина волны света лазера, l — толщина кюветы.

Соотношение между плотностью и показателем преломления может быть получено из формул для удельной рефракции r [5], из которых наиболее теоретически обоснована формула Лоренц-Лоренца $\frac{n^2-1}{n^2+2} \cdot \frac{1}{\rho} = r$ [6]. При этом считают, что удельная рефракция r не зависит от внешних условий (температуры, давления) и агрегатного состояния вещества.

В работе [7] было показано, что для жидкостей в широком диапазоне давлений (до 1500 атм) с высокой точностью выполняется условие

$$\frac{n-1}{n_0-1} = \frac{\rho}{\rho_0} = 1, \quad (4)$$

которое непосредственно вытекает из эмпирической формулы для удельной рефракции Гледстоуна-Дейла

$$\frac{n-1}{\rho} = r. \quad (5)$$

Тогда

$$\kappa = \frac{\lambda \Delta K}{l(n-1) \Delta P}. \quad (6)$$

Для воды, имеющей $\kappa = 0.5 \cdot 10^{-4}$ и $n = 1.332$ при $\frac{\lambda}{l} = 6.33 \cdot 10^{-5}$ и $t = 20^\circ \text{C}$, на изменение давления в 1 атм придется $\Delta K = 0.26$.

Сжатие жидкости удобно осуществлять подачей газа из баллона. При непосредственном контакте газа и жидкости имеет место увеличение растворимости газа в жидкости с ростом давления, что влияет на величину изменения показателя преломления. Удельная рефракция смесей практически аддитивна и является функцией весовых долей компонентов. Изменение показателя преломления, обусловленное растворением газа в жидкости, мало, но может оказаться сопоставимым с изменением Δn , вызванным сжатием. При экспериментах с гелием, плохо растворимым в воде, были получены результаты, совпадающие с табличными значениями коэффициента сжимаемости воды κ , а при экспериментах с азотом они резко отличались, т.к. по расчетным

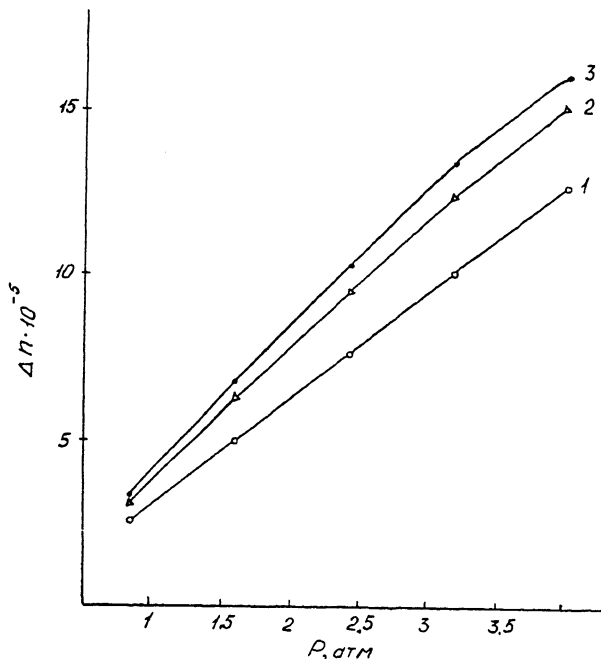


Рис. 1. Зависимость приращения показателя преломления от давления для воды H_2O (1), бутанола $\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$ (2), керосина КО-20 (3).

данным для азота, растворяемого под давлением, величина $\alpha = \frac{1}{3}$ и (рис. 1).

Таким образом, можно измерять растворимость газа в жидкости. Коэффициент α при некотором ΔP определяется по изменениям коэффициента преломления жидкости с газом Δn_1 и без газа Δn_2 .

$$\alpha = \frac{\Delta n_1 - \Delta n_2}{\rho_0 r_1 \Delta P}. \quad (7)$$

Для устранения влияния растворимости газа давление на жидкость передавалось через мембрану. В этом случае опыты с водой дали совпадение экспериментальных и табличных данных с точностью не хуже 4% при всех изменениях давления в системе.

Кроме того, метод позволяет качественно и количественно оценивать процессы, происходящие на границе раздела двух сред (рис. 2). Газ при сжатии нагревается больше, чем жидкость, и эту разницу температур можно вычислить, зарегистрировав изменение числа интерференционных полос δK сразу после сжатия. По формуле (3) определяется

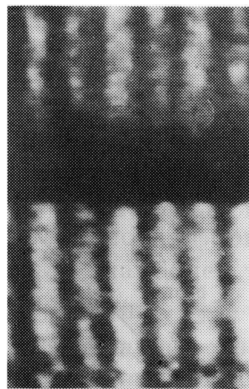


Рис. 2. Интерферограмма исходного состояния на границе раздела двух сред (спирта и гелия). Темная горизонтальная полоса — мениск.

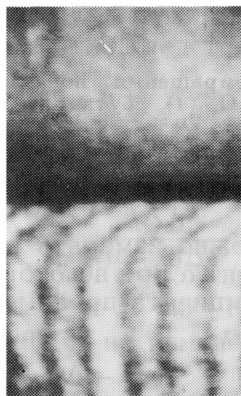


Рис. 3. Интерферограмма состояния на границе раздела двух сред непосредственно после сжатия (искривление полос обусловлено нагревом приповерхностного слоя жидкости).

изменение коэффициента преломления жидкости Δn , и по табличным значениям [5,8] соответствующее Δn изменение температуры Δt . Искажение интерференционных полос в пограничном слое фактически дает кривую изменений температуры в нем. Из сказанного выше ясно, что иногда тре-

буется учитывать увеличение растворимости газа в жидкости (например, азота в воде) при увеличении давления. Интерференционная картина (рис. 3) позволяет также непосредственно определить толщину слоя жидкости с температурным градиентом.

Таким образом, метод голографической интерферометрии позволяет определять сжимаемость жидкостей и газов при малых давлениях и исследовать переходные процессы в пограничном слое.

Список литературы

- [1] *Rosen I.F.* JOSA. 1947. V. 37. P. 932.
- [2] *Ostrovsky Yu.I., Butusov M.M., Ostrovskaya G.V.* Springer Series in Optical Sciences. V. 20 / Ed. by D.L.MacAdam. Springer Verlag, 1980.
- [3] *Phillipp H., Neger T.* et al. Measurement. 1992. V. 10. N 4.
- [4] *Gurevich S.B., Dunaev N.Yu.* et al. // Proceeding of AIAA/IKI Microgravity Science Symposium, Moscow, 1991.
- [5] *Иоффе Б.В.* Рефрактометрические методы химии. Л., 1969.
- [6] *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М., 1970.
- [7] *Кормер С.Б.* // УФН. 1968. Т. 94. В. 4. С. 650-653.
- [8] *Таблицы физических величин /* Под ред. И.Кикоина. М., 1976.

Физико-технический
институт им.А.Ф.Иоффе
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
7 февраля 1994 г.

