

Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

A. N. Amenitskii,
O. A. Evtikhieva, B. S. Rinkevichius, Определение
градиента температуры в жидкости по рефракции
луча лазера,
TVT, 1974, Volume 12, Issue 4, 902–904

<https://www.mathnet.ru/eng/tvt7418>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that
you have read and agreed to these terms of use
<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.14.82

July 17, 2025, 15:24:50



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ В ЖИДКОСТИ ПО РЕФРАКЦИИ ЛУЧА ЛАЗЕРА

А. Н. Аменицкий, О. А. Естухиева, Б. С. Ринкевичюс

Известно, что показатель преломления жидкости однозначно связан с ее температурой при неизменных остальных параметрах. Наличие градиента температуры в жидкости, например около нагретой пластинки, вызывает градиент показателя преломления, в результате чего жидкость становится оптически неоднородной. При распространении световых лучей в такой среде возникает их рефракция. Данное явление используется в теневых методах измерения градиента показателя преломления среды [1] и тем самым определения градиента температуры. В этих методах обычно используются широкие пучки света и в фокусе линзы ставится диафрагма (нож Фуко). Прошедшее излучение наблюдается на экране. Отклонение лучей в среде приводит к изменению освещенности экрана. В таких приборах требуется применение высококачественных объектов. Несмотря на это, пространственное разрешение не удается получить лучше, чем 10 *лин/мм*, что не позволяет проводить исследования в наиболее интересных случаях вблизи нагретой стенки. Кроме того, следует отметить, что зависимость показателя преломления жидкости от температуры довольно сильная ($\partial n/\partial T \sim 10^{-4}$ 1/°C), поэтому расшифровка теневых картин в этом случае также не простая задача.

Если в качестве источника использовать узконаправленный пучок лазера, то его отклонение можно определить простыми способами без дорогостоящей оптики и при этом получить пространственное разрешение порядка 100 *лин/мм*.

В случае плоских оптических неоднородностей угол отклонения луча вдоль оси y $\alpha(y)$ связан с градиентом показателя преломления следующим образом [1]:

$$\alpha(y) = \frac{L}{n_0} \frac{dn}{dy}, \quad (1)$$

где n_0 — показатель преломления среды; L — длина пути светового луча в исследуемой жидкости.

По измеренным углам отклонения можно определить зависимость показателя преломления от координаты y , интегрируя уравнение (1)

$$n(y) = n(y_0) + \frac{n_0}{L} \int_{y_0}^y \alpha(y) dy. \quad (2)$$

Здесь $n(y_0)$ — значение показателя преломления вдоль линии на расстоянии y_0 от начала координат.

В уравнениях (1) и (2) предполагается, что луч проходит среду с постоянным значением dn/dy , т. е. смещение луча пренебрежимо мало, что верно только для малых градиентов показателя преломления и для небольших длин L .

Если для данной жидкости известна зависимость показателя преломления от температуры $n(T)$, то по измеренному $n(y)$ можно найти распределение температуры $T(y)$, однако в этом случае следует знать точное значение $n(y_0)$ (до пятого знака после запятой), что требует дополнительных оптических измерений. Более просто градиент температуры можно определить, если известна температура в какой-либо точке.

Заменим в уравнении (1) производную dn/dy на

$$\partial n/\partial y = dn/dT \cdot dT/dy.$$

Тогда получим следующее интегральное уравнение:

$$\int_{T_0}^T \frac{\partial n}{\partial T} dT = \int_{y_0}^y \frac{n}{L} \alpha(y) dy. \quad (3)$$

Для большинства прозрачных жидкостей dn/dT известно из экспериментальных [2], либо теоретических [3] исследований. Зависимость от температуры носит сложный характер и аналитический вид ее неизвестен, поэтому интегральное уравнение (3) можно решить только численными методами. Для малого интервала $\Delta y = y - y_0$ и малого перепада температур, когда $dn/dT \approx \text{const}$, уравнение (3) примет вид

$$T(y) = T(y_0) + n_0/L(dn/dT)^{-1} \alpha(y) \Delta y. \quad (4)$$

Таким образом, температуру в любой точке y можно легко найти, если известна температура в одной точке и измерено отклонение лучей $\alpha(y)$ путем последовательного вычисления температуры в соседней точке, отстоящей на малом расстоянии Δy . В первом приближении значение dn/dT можно брать при температуре в предыдущей точке. Уравнение (4) для жидкости применимо только для небольших

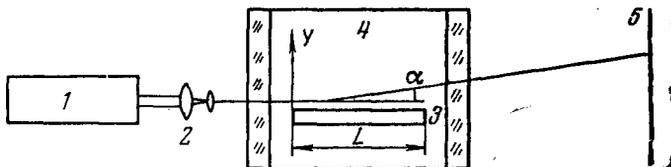


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

перепадов температуры и малых длин L , поскольку в отличие от газов они имеют большое значение dn/dT . Это приводит к заметному смещению луча лазера от его первоначального положения. Поэтому экспериментально определенное отклонение лучей $\alpha(y)$ соответствует не точке их входа y , а некоторой другой точке. В первом приближении траектория луча в жидкости будет описываться параболой. В этом случае смещение луча δy на выходе оптической неоднородности будет [4]

$$\delta y = \frac{1}{2} n_0 \alpha(y) L. \quad (5)$$

Экспериментальная установка для определения градиента температуры вблизи нагретой стенки по рефракции луча лазера показана на рис. 1. Пучок света от He-Ne лазера 1 типа ЛГ-55 проходил телескопическую систему 2, уменьшающую размеры пучка до 0,075 мм, и далее направлялся около исследуемой пластины 3, помещенной в сосуд с дистиллированной водой 4. Угол отклонения луча в жидкости определялся по измеренному смещению пятна на экране 5 с учетом преломления луча при прохождении стенок сосуда. Нихромовая пластина высотой 100 и шириной 50 мм имела толщину 0,1 мм и нагревалась электрическим током. Размеры сосуда составляли 300×200×400 мм. Наряду с оптическими измерениями проводились измерения температур пластины и жидкости на большом расстоянии от пластины с помощью медь-константановых термопар.

На рис. 2 приведены измеренные значения углов отклонения луча лазера при различных тепловых потоках Q .

Вычисление градиента температуры в жидкости по измеренным отклонениям $\alpha(y)$ осуществлялось следующим образом. Весь пограничный слой разбивался на малые участки Δy . По выражению (5) находилось смещение луча δy и измеренное отклонение $\alpha(y)$ относилось к точке $y + \delta y/2$. Температура в точке $y = y_0 + \Delta y + \delta y/2$ при известной температуре в точке y_0 находилась по уравнению (4). Точка y_0 соответствовала поверхности стенки и ее температура измерялась при помощи термопары. Значение dn/dT бралось при температуре в точке y_0 . Такая последовательность вычислений повторялась до тех пор, пока не был найден полный профиль температуры.

Следует еще раз отметить, что dn/dT сильно зависит от температуры. Так, для воды $dn/dT = -0,55 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$ при $T = 15^\circ\text{C}$ и $dn/dT = -1,05 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$ при $T = 30^\circ\text{C}$, поэтому при вычислении температуры в точке $y = y_0 + 2\Delta y + \delta y/2$ значение dn/dT бралось при температуре в точке $y = y_0 + \Delta y$.

На рис. 3 приведены рассчитанные таким образом распределения температур около пластины при различных тепловых потоках. Полный перепад температур с погрешностью +5% совпал с измеренным при помощи термопар, в то время как данные, рассчитанные без учета смещения луча, были занижены. Например, для $Q = 28,8 \cdot 10^2 \text{ вт/м}^2$ $\Delta T_{\text{изм}} = 6,5^\circ\text{C}$, $\Delta T_{\text{выч}}$ без учета смещения равно $6,0^\circ\text{C}$ и с учетом смещения $\Delta T_{\text{выч}} = 6,7^\circ\text{C}$, а полное смещение луча при $y = 1,0 \text{ мм}$ составляло 0,26 мм.

Как видно из данного примера, смещение луча при таких градиентах температуры составляет заметную величину и его необходимо учитывать.

Чувствительность данного метода измерения градиента температуры при $L = 100 \text{ мм}$, $dn/dT = 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$ и регистрации угла отклонения лучей $1''$ составляет $10^{-3} \text{ }^\circ\text{C/мм}$.

Максимальный градиент температуры с учетом принятых допущений и $L=10$ мм составляет $\sim 3^\circ \text{C}/\text{мм}$.

К преимуществам данного способа определения градиента температуры по сравнению с применяемыми для этих целей теневыми и интерференционными приборами следует отнести отсутствие высококачественной оптики, более высокое пространственное разрешение и простоту измерений.

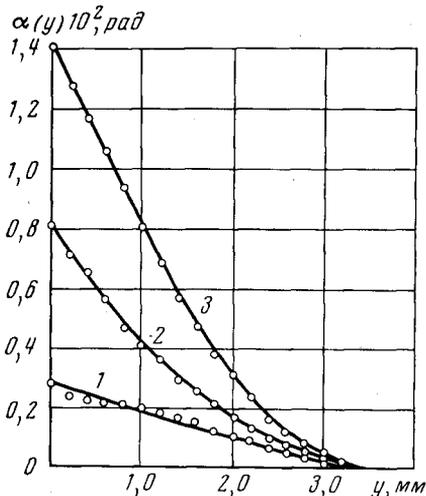


Рис. 2

Рис. 2. Углы отклонения луча лазера:

1 — $Q=6,2 \cdot 10^2 \text{ вт}/\text{м}^2$; 2 — $14,2 \cdot 10^2 \text{ вт}/\text{м}^2$; 3 — $28,8 \cdot 10^2 \text{ вт}/\text{м}^2$

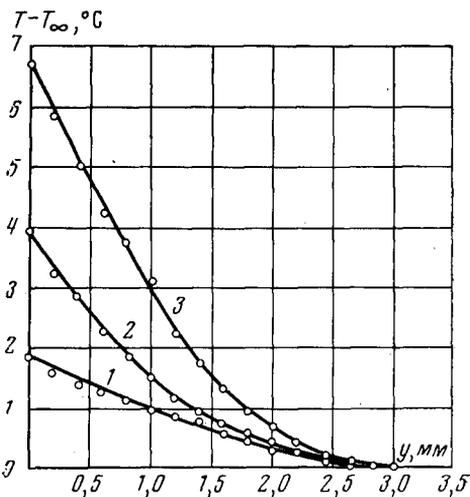


Рис. 3

Рис. 3. Распределение температуры вблизи нагретой стенки:

1 — $Q=6,2 \cdot 10^2 \text{ вт}/\text{м}^2$; 2 — $14,2 \cdot 10^2 \text{ вт}/\text{м}^2$; 3 — $28,8 \cdot 10^2 \text{ вт}/\text{м}^2$

В заключение следует отметить, что данный способ позволяет определить не только градиент температуры, но и любые другие параметры жидкости, которые приводят к градиенту показателя преломления, например поле концентраций в жидкости, вызванное термодиффузией.

Авторы выражают благодарность В. А. Фабриканту за критические замечания.

Московский энергетический институт

Поступило в редакцию
5 X 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Васильев. Теневые методы. «Наука», 1968.
2. L. W. Tilfon, J. K. Taylor. J. Res. Nat. Bur. Stand., 20, 419, 1938.
3. N. Dass. Indian J. Pure and Appl. Phys., 8, 55, 1970.