

ИЗУЧЕНИЕ ДИФФУЗИИ ГОЛОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

О.А.Шустин, Т.С.Величкина, Т.Г.Черневич,
И.А.Яковлев

Описаны результаты изучения диффузии методом голографической интерферометрии с разделенными временами экспозиции и дана теория нового метода.

В настоящее время голографическая интерферометрия находит все более широкое применение как чувствительный метод, позволяющий с точностью, свойственной оптической интерферометрии, измерять малые временные изменения объекта исследования (изучение деформаций, вибраций, газовых потоков и т. д.).

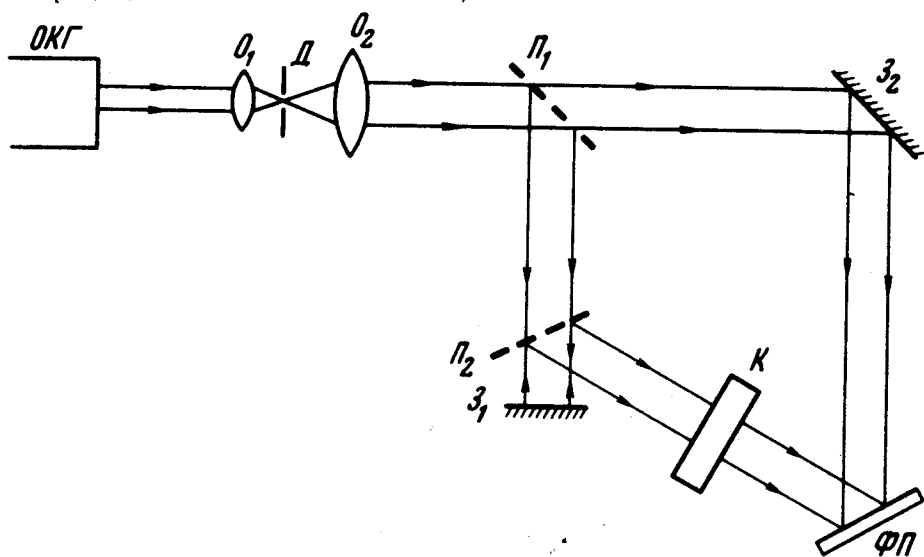


Рис. 1

Мы применили этот метод к исследованию процесса диффузии в жидкости. На рис. 1 представлена схема применяемой установки. Свет от гелий-неонового лазера (ОКГ) проходит через расширяющую световой пучок оптическую систему, состоящую из микрообъектива O_1 , объектива O_2 и фильтрующей диафрагмы D ($\phi \sim 0,03$ мм). Световой пучок отраженный от светоделительной пластинки Π_1 , создает предметную волну, проходящую через стеклянную кювету K с исследуемой жидкостью. Светоделительная пластинка Π_2 и зеркало Z_1 служат для выравнивания оптических путей, проходимых опорной и предметной волнами от источника света до фотопластинки $\Phi П$. Световой пучок, прошедший через светоделительную пластинку Π_1 и отраженный от зеркала Z_2 создает опорную волну. Кювета с плоскопараллельными стенками заполняется двумя жидкостями с показателями преломления n_1 (в нижней половине сосуда) и n_2 (в верхней).

Сущность предлагаемого метода измерения коэффициента диффузии заключается в следующем. В начальный момент времени после заполнения кюветы граница раздела жидкостей будет резкой (пунктирные прямые на рис. 2а). С течением времени эта граница вследствие диффузии будет размываться и градиент показателя преломления — уменьшаться. Пусть через t сек после начала диффузии распределение показателя преломления по высоте кюветы будет описываться кривой I на рис. 2а (предполагается, что граница раздела находится на половине высоты кюветы h). Через интервал времени Δt после этого момента (т. е. через $t + \Delta t$ после начала диффузии) градиент показателя преломления еще уменьшится и его распределение по высоте кюветы можно представить в виде кривой II рис. 2а.

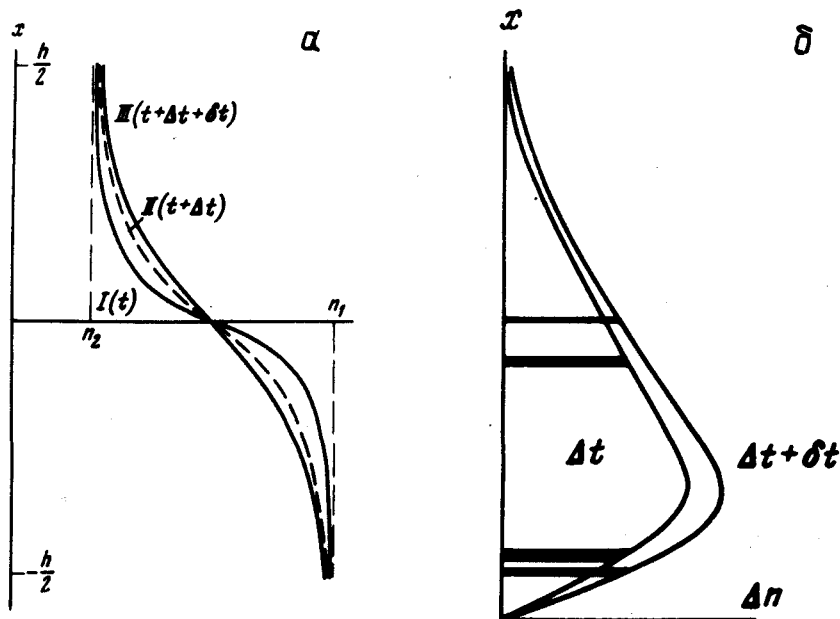


Рис. 2

На фотопластинку снимается голограмма световой волны, проходившей через кювету в момент времени t , а затем на той же фотопластинке регистрируется голограмма световой волны в момент времени $t + \Delta t$.

В восстановленном действительном изображении кюветы будут наблюдаться чередующиеся горизонтальные темные и светлые интерференционные полосы. Темные полосы будут видны в тех местах изображения кюветы (при тех значениях x), где за интервал времени между двумя экспозициями изменение показателя преломления будет удовлетворять условию $d \Delta n = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ (d — толщина кюветы, λ — длина волны света, k — целые числа).

Распределение интерференционных полос в изображении кюветы позволяет, в принципе, определить коэффициент диффузии. Однако, для

повышения точности метода съемка интерферограммы производится в следующем порядке. В момент времени t (после сливания жидкостей) производят первую экспозицию. За время экспозиции (~ 1 сек) распределение показателя преломления в жидкости практически не изменяется. После этого перекрывают половину опорного пучка (правую или левую) и через время Δt после первой экспозиции вторично снимают голограмму. Затем открывают ту часть опорного пучка, которая была закрыта во время второй экспозиции и закрывают вторую его половину. Через интервал времени δt после второй экспозиции производят съемку третьей голограммы. На полученной таким образом интерферограмме в одной ее половине будут зафиксированы голограммы снятые в моменты времени t и $t + \Delta t$, а в другой в моменты t и $t + (\Delta t + \delta t)$.

Из рис. 2а следует, что зависимость разности показателей преломления Δn от координаты x при данном значении интервала времени между экспозициями можно представить в виде рис. 2б (приведены две кривые для двух интервалов времени между последовательными экспозициями Δt и $\Delta t + \delta t$). Разность показателей преломления при увеличении x сначала быстро растет, порядок интерференции полос увеличивается и в этой области интерференционные полосы расположены близко друг к другу. Вблизи максимума Δn изменение x дает малое изменение разности показателей преломления и расстояние между интерференционными полосами увеличивается. Дальнейшее увеличение x приводит к уменьшению Δn и, соответственно, к уменьшению порядка интерференции.

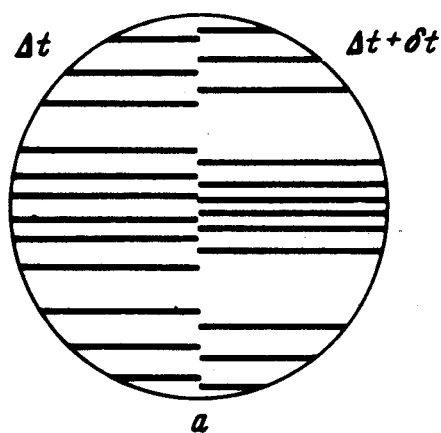


Рис. 3

В восстановленном действительном изображении кюветы интерференционная картина будет иметь вид, схематически представленный на рис. 3, а. Полосы, расположенные в области, где Δn увеличивается с ростом x , при возрастании интервала времени между экспозициями смещаются к центру картины. В области, где Δn уменьшается, смещение полос будет положительным. Это очевидно из рассмотрения рис. 2, б.

где жирными линиями обозначены положения двух полос при интервале времени Δt , а тонкими при $(\Delta t + \delta t)$.

Приближенный расчет коэффициента диффузии по сдвигу интерференционных полос можно произвести следующим образом. При расчете предполагается, что $\Delta t, \delta t \ll t$ и смещение полосы δx при увеличении интервала времени между экспозициями на δt удовлетворяет условию $\delta x \ll x$. Разность показателей преломления, соответствующая какой-либо полосе, полученной в результате двух экспозиций с интервалом времени между ними Δt , будет равна

$$\Delta n = \frac{\partial n}{\partial t} \Delta t. \quad (1)$$

Для полосы фиксированного порядка при ее сдвиге, очевидно, должно

$$\text{выполняться условие } d(\Delta n) = \frac{\partial \Delta n}{\partial t} dt + \frac{\partial \Delta n}{\partial x} dx = 0. \quad (2)$$

Используя (1), уравнение (2) можно переписать в виде

$$\frac{\partial n}{\partial t} \delta t + \frac{\partial^2 n}{\partial x \partial t} \Delta t \delta x = 0. \quad (3)$$

Значения, входящих в это уравнение производных, можно вычислить, воспользовавшись уравнением диффузии, которое для достаточно разбавленных растворов можно записать в виде

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}, \quad (4)$$

где D — коэффициент диффузии.

Решение этого уравнения, определяющее зависимость показателя преломления от координаты и времени, протекшего с момента начала диффузии, имеет вид

$$n(x, t) = \frac{n_2 - n_1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\xi} e^{-\xi^2} d\xi + n_1 \quad (5)$$

где $\xi = x^2 / 2\sqrt{Dt}$ (см. [1]).

Подставляя это решение в (3) получим

$$D = \frac{x^2 \Delta t \delta x}{2t(x\delta t + \Delta t \delta x)}. \quad (6)$$

Для расчета коэффициента диффузии используются только полосы, которые находятся далеко от первоначальной границы раздела жидкостей и для которых смещение от центра картины увеличивается с возрастанием интервала времени между последовательными экспозициями. Это связано прежде всего с тем, что зависимость показателей преломления от времени для областей далеких от границы раздела определяется, в основном, именно процессом диффузии, а не неиз-

бежным перемешиванием жидкостей вблизи границы их раздела во время сливания.

Вследствие рефракции в жидкости, расположение интерференционных полос относительно первоначальной границы раздела жидкостей не вполне симметрично. Поэтому для определения координаты какой-либо полосы измеряется расстояние между полосами одинакового порядка, находящимися по разные стороны от границы раздела. Эти полосы будут находиться в тех местах изображения кюветы, где рефракция одинаковы.

Описанный метод был применен для исследования диффузии хлористого натрия в воде.

На рис. 3, б представлена фотография восстановленного изображения кюветы. Получено значение коэффициента диффузии равное $D = (1,44 \pm 0,06) \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{сек}$ и хорошо согласующееся с табличными данными [2].

Московский
государственный университет
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию
18 ноября 1974 г.

Литература

- [1] А.Н.Тихонов, А.П.Самарский. Уравнения математической физики. М., изд. Наука, 1966.
 - [2] Handbook of Chemistry and Physics, 33rd Edition. Chem. Rubber Publ. Co., Cleveland, Ohio, 1951.
-