

Вниманию читателей предлагается продолжение подборки статей ведущих сотрудников кафедры физики им. В. А. Фабриканта, посвященных 80-летию Московского энергетического института. Основное внимание в них уделено применению лазеров для исследования потоков и плотности жидкостей, определению положения центра лазерного пучка, измерению изгиба металлической поверхности.

Начало подборки см. в журнале «Измерительная техника» № 9, 2010 г.

535.31:681.7.001

## Лазерный визуализатор неоднородности пристеночных слоев жидкости

И. Н. ПАВЛОВ, Б. С. РИНКЕВИЧЮС, А. В. ТОЛКАЧЕВ

Московский энергетический институт (технический университет), Москва, Россия, e-mail: rinkevbs@mail.ru

Описана лазерная рефрактографическая система визуализации пристеночных слоев смешения оптически неоднородных жидкостей. Рассмотрена теория метода визуализации неоднородности смеси, основанного на явлении полного внутреннего отражения. Оценена чувствительность метода. Приведены схема экспериментальной установки и примеры визуализации смешения капли глицерина с водой.

**Ключевые слова:** лазер, оптически неоднородная смесь жидкостей, лазерная рефрактография.

The laser refractographic system for near-wall mixing layers of optically inhomogeneous liquid visualization is described. The theory of inhomogeneous mixture visualization method based on total internal reflection effect is given. The sensitivity of this method is estimated. The scheme of experimental installation and the examples of glycerin drop with water mixing visualization also are shown.

**Key words:** laser, optically inhomogeneous liquid mixture, laser refractography.

Пристеночные явления в потоках жидкости играют важную роль во многих тепловых и химических аппаратах, где процессы тепло- и массопереноса развиваются в тонком приграничном слое толщиной меньше одного миллиметра. Это осложняет использование контактных методов исследования таких процессов, а классические оптические методы визуализации не обеспечивают достаточную разрешающую способность. Поэтому имеется необходимость разработки новых лазерных методов исследования пристеночных слоев потоков жидкости в микроканалах.

В настоящее время исследования пристеночных течений жидкости проводятся различными лазерными методами [1—3], которые позволяют измерять распределение скорости частиц в пристеночном слое потока микрометровой толщины. Однако скорость потока — только один из его параметров, не менее важны температура и концентрация смеси неоднородного потока, от которых зависит показатель преломления среды. Для визуализации распределения показателя преломления в пространственно неоднородных пристеночных течениях жидкости в [4—6] использовалось явление нарушенного полного внутреннего отражения (ПВО).

Эффект ПВО [3] широко применяется в оптической рефрактометрии для измерения показателя преломления оптически однородной жидкости. На нем основываются чувствительные методы измерения показателей преломления

различных сред [5]. Наиболее известен рефрактометр Аббе для измерения показателя преломления пространственно однородных жидкостей в кювете. Разработанные оптические рефрактометры предназначены в основном для лабораторных исследований малых количеств однородной жидкости и имеют погрешность измерения показателя преломления порядка  $10^{-4}$ .

**Теория метода визуализации пристеночного потока жидкости.** Рассмотрим случай распространения лазерного пучка из оптически более плотной среды в менее плотную. Для определенности будем считать, что лазерный пучок переходит из стекла в жидкость. Как известно [1], если угол падения лазерного пучка на границу раздела двух сред больше критического  $\theta_i > \theta_c$ , то во вторую среду пучок не проходит и наблюдается его полное отражение. Однако электромагнитное поле во второй среде не равно нулю, и вдоль поверхности раздела распространяется неоднородная электромагнитная волна вида

$$E(x, z, t) = E_0 \exp \left\{ -(\omega z / v_2) \sqrt{\sin^2 \theta_i / n^2 - 1} \right\} \times \exp \left\{ j\omega(t - x \sin \theta_i / nv_2) \right\},$$

где  $E_0$  — амплитуда неоднородной волны;  $z$  — расстояние от поверхности первой среды (стекла);  $\omega$  — круговая частота;

$v_2$  — скорость волны во второй среде (воде);  $\theta_i$  — угол падения пучка на границу раздела, отсчитываемый от нормали к поверхности;  $n = n_2/n_1$ ;  $n_1, n_2$  — показатели преломления стекла и воды.

Амплитуда этой волны изменяется экспоненциально, уменьшаясь в  $e$  раз на расстоянии от поверхности

$$z = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda}{\sqrt{\sin^2 \theta_i - n^2}},$$

т. е. на расстоянии порядка длины волны  $\lambda$  в воде. Это подтверждается и экспериментальными данными [7].

Энергетические коэффициенты отражения пучка для различных его поляризаций вычисляются по формулам

$$\rho_{\parallel} = \frac{\operatorname{tg}^2(\theta_i - \theta_t)}{\operatorname{tg}^2(\theta_i + \theta_t)}; \rho_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)}, \quad (1)$$

где  $\theta_t$  — угол преломления.

Анализ соотношений (1) показывает, что при одинаковом изменении показателя преломления жидкости более заметное изменение коэффициента отражения получается для пучка с поляризацией, параллельной плоскости падения; поэтому далее рассматривается именно этот случай. Из (1) следует, что коэффициент отражения уменьшается с 1,0 до 0,9 при изменении показателя преломления жидкости на  $\Delta n = 0,0001$ .

Для анализа закономерностей отражения удобно пользоваться формулой для коэффициента отражения, которая получается из (1) заменой угла преломления на угол падения в соответствии с законом Снелиуса:

$$\rho_{\parallel} = \operatorname{tg}^2 \left[ \theta_i - \arcsin \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right) \right] / \operatorname{tg}^2 \left[ \theta_i + \arcsin \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right) \right].$$

На рис. 1 показан график, рассчитанный по этой формуле при различных значениях показателя преломления стекла призмы, откуда следует, что лучше использовать стекло с наименьшим показателем преломления.

В эксперименте удобно измерять контраст рефракционной картины  $M$ , равный отношению разности интенсивности отраженного света при ПВО  $I_1$  и интенсивности отраженно-го света при нарушении ПВО  $I_2$  к  $I_1$ , т. е.

$$M = (I_1 - I_2) / I_1 = 1 - \rho_{\parallel},$$

и по его значению определять изменение показателя преломления. На практике можно пользоваться графической зависимостью  $M = f(n_1, n_2, \theta_i)$  (рис. 2) для локализации оптической неоднородности и определения ее размеров.

**Экспериментальная установка.** Схема установки для визуализации пристеночных течений жидкости в микроканале показана на рис. 3. В ней пучок излучения от полупроводникового лазера 1 с длиной волны 650 нм попадает в расширитель пучка 2, который представляет собой телескопическую систему из двух собирающих линз с разными фокусными расстояниями. Далее широкий коллимированный пучок направляется на внутреннее основание стеклянной призмы 3

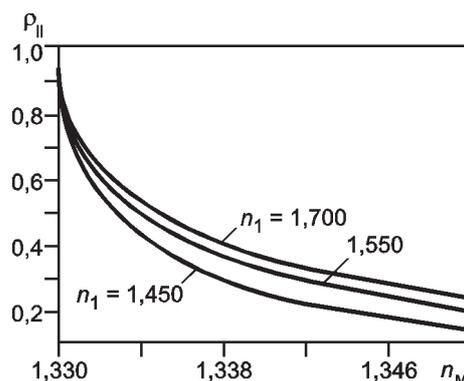


Рис. 1. График зависимости коэффициента отражения  $\rho_{\parallel}$  от показателя преломления микропотока жидкости  $n_m$  при различных показателях преломления  $n_1$  стекла призмы

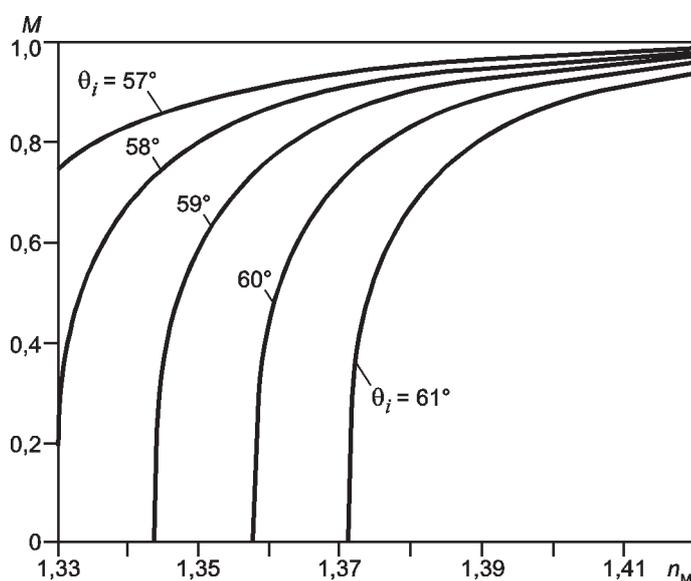


Рис. 2. График зависимости коэффициента  $M$  от показателя преломления микропотока жидкости  $n_m$  при различных углах падения  $\theta_i$  лазерного пучка на границу раздела двух сред;  $\theta_i = \theta_k = 58^\circ$  — критический угол

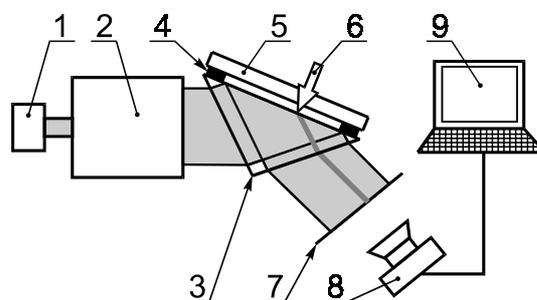


Рис. 3. Схема рефрактографической установки с микроканалом (вид сверху):

- 1 — лазер; 2 — расширитель пучка; 3 — стеклянная призма;
- 4 — металлические пластинки; 5 — зачерненная пластинка;
- 6 — вводимый микропоток жидкости; 7 — экран;
- 8 — цифровая видеокамера; 9 — компьютер

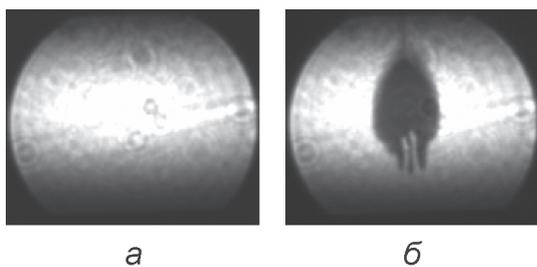


Рис. 4. Калибровочное (а) и рефрактографическое (б) изображения движения капли глицерина в воде через 5 с после начала процесса

под углом, равным критическому углу ПВО для границы раздела призма — жидкость. Претерпевая полное отражение, пучок попадает на экран 7. Если же в микроканале, образованном зачерненной стеклянной пластинкой 5, поверхностью призмы 3 и металлическими полосками 4 толщиной 80 мкм, протекает капля жидкости с показателем преломления, большим показателя преломления жидкости в канале, то в этом месте ПВО нарушается, и коэффициент отражения заметно уменьшается. Получаемое на экране 7 изображение регистрируется цифровой фото- или видеокamerой 8, а затем обрабатывается на компьютере 9 в соответствии с известными алгоритмами обработки оптических изображений [8].

В отличие от рефрактометра Аббе, где применяется сходящийся пучок некогерентного света, в данной системе используется широкий коллимированный пучок лазерного излучения, а измерительная призма 3 является одной из стенок микроканала.

Если происходит локальное изменение показателя преломления жидкости в канале, вызванное внесением жидкости с другим показателем преломления, то это приводит к нарушению ПВО и уменьшению освещенности в изображении потока. Таким образом, визуализируется как местоположение локального изменения свойств потока, так и отклонение показателя преломления жидкости в данной точке потока от показателя преломления основной жидкости. Как указывалось ранее, изменение свойств пристеночного слоя потока визуализируется на глубине этого слоя порядка длины волны лазерного излучения.

**Методика проведения эксперимента и обработки рефрактограмм.** В экспериментах с цветовой поток жидкости создавался с помощью шприца с иглками разных диаметров. Впрыск происходил под небольшим углом (20—30°) вблизи призмы. В экспериментах с микроканалом с помощью шприца меньшего объема создавалась капля жидкости, она помещалась сверху канала, далее ее движение происходило под действием капиллярных сил и силы тяжести, а также диффузии. Базовой жидкостью служила чистая вода при комнатной температуре ( $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $n_2 = 1,3318$ ). В качестве вводимой жидкости использовались водные растворы сахара и поваренной соли различных концентраций, глицерин, а также смеси глицерина с водой в различных пропорциях. Показатели преломления измеряли с помощью рефрактометра ИРФ-454 Б2М. Температуру контролировали лабораторным ртутным термометром с ценой деления 0,5 °С.

Методика обработки рефрактограмм состояла в следующем. Регистрировалось изображение исходного пучка, отраженного от границы раздела призма — однородная жидкость (вода). Это изображение служило калибровочным, так

как отражение происходило без нарушения ПВО. Далее регистрировалось изображение пучка, отраженного от границы раздела призма — локально неоднородная жидкость (смесь воды с глицерином). После вычитания первого изображения из второго и деления полученной разницы в каждой точке на значение интенсивности в калибровочном изображении в этой точке получался коэффициент контрастности  $M$ . На рис. 4 показан пример такого рефрактографического изображения.

Результаты обработки рефрактограмм представлены в таблице. Во втором столбце приведены показатели преломления вводимых жидкостей, измеренные с помощью рефрактометра Аббе типа ИРФ-454 Б2М, а в четвертом столбце — показатели преломления, полученные после обработки рефрактограмм. Из анализа результатов следует, что значения показателей преломления микропотока жидкостей, определенные по рефрактограммам, меньше измеренных рефрактометром Аббе:  $n_M^{\text{обр}} < n_M^{\text{изм}}$ . Это можно объяснить тем, что пристеночные слои имеют другой состав из-за смешения с водой, что представляет самостоятельный интерес.

Результаты обработки лазерных рефрактограмм

Смесь глицерина с водой	$n_M^{\text{изм}}$	$M$	$n_M^{\text{обр}}$
1:1	1,3949	0,84	1,379
1:2,5	1,3663	0,69	1,360
1:5	1,3534	0,25	1,353

**Заключение.** Созданная лазерная система визуализации неоднородных пристеночных слоев жидкости позволяет определять пространственные координаты оптической неоднородности и значение ее показателя преломления. Система применена для визуализации во времени процесса смешения капли глицерина в воде.

#### Л и т е р а т у р а

1. Ринкевичюс Б. С. Лазерная диагностика потоков. М.: Изд-во МЭИ, 1990.
2. Евтихиева О. А., Расковская И. Л., Ринкевичюс Б. С. Лазерная рефрактография. М.: Физматлит, 2008.
3. Евтихий Н. Н. и др. / Под ред. Н. Н. Евтихиева. Информационная оптика. М.: Изд-во МЭИ, 2000.
4. Лейкин М. В., Молочников Б. И. Отражательная рефрактометрия. Л.: Машиностроение, 1983.
5. Pavlov I. N., Rinkevichyus B. S. Near-Wall Liquid Flows Visualization on Frustrated Total Internal Reflection // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2009. V. 18. N 4. P. 322—327.
6. Павлов И. Н., Ринкевичюс Б. С. Визуализация потоков жидкости по нарушенному полному отражению // Оптические методы исследования потоков: Труды науч.-техн. конф. М.: Изд-во МЭИ, 2009. С. 546—549.
7. Afshar A. R., Thetford A. An experiment to measure frustrated total internal reflection // Europ. J. Phys. 1982. N 3. P. 72—74.
8. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В. А. Соифера. М.: Физматлит, 2001.

Дата принятия 08.07.2010 г.