

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДИФФУЗИИ В ТОНКИХ ПРОЗРАЧНЫХ СРЕДАХ МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

А.Ю. Абрамов¹, О.В. Диков¹, В.П. Рябухо^{1,2}, А.Б. Шиповская¹

¹ Саратовский государственный университет, Саратов, Россия,

² Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов, Россия

Аннотация

Рассматриваются методы лазерной интерферометрии и оптические интерферометры с цифровой системой регистрации изображений для изучения процессов взаимодиффузии в системах полимер-растворитель и низкомолекулярная жидкость I – низкомолекулярная жидкость II. Представлено описание оборудования и методики проведения экспериментов с использованием интерферометров Маха-Цендера, Майкельсона и многолучевого микроинтерферометра, определена кинетика пространственного распределения показателя преломления среды в процессе массопереноса, определены коэффициенты диффузии.

Ключевые слова: лазерная интерферометрия, оптические интерферометры, прозрачные среды, взаимная диффузия, массоперенос, показатель преломления, коэффициент диффузии.

Введение

Явление массопереноса и диффузионные процессы в различных средах имеют важное практическое значение для разработки регламентов технологических процессов, анализа и разделения веществ и т.п. Набухание и растворение, пленко- и волокнообразование, адгезия, ликвация и адресная доставка лекарственных препаратов – вот далеко не полный перечень процессов, в которых диффузия компонентов играет основополагающую роль.

Для изучения диффузионного транспорта применяют различные физико-химические методы. Особое место среди них занимают оптические методы [1,2], в частности, интерференционные, обладающие высокой чувствительностью и позволяющие следить за кинетикой массопереноса в режиме реального времени [1-4]. Для бинарных систем по данным интерференционного эксперимента определяют профили распределения показателя преломления, концентрации, рассчитывают коэффициенты взаимодиффузии компонентов в широкой области составов и температур, строят фазовые диаграммы, оценивают термодинамические параметры [5-8].

Применение результатов интерференционных исследований весьма обширно. Так, данные интерферометрии позволяют не только с высокой надежностью определять пограничные кривые, но и идентифицировать тип фазового разделения и, соответственно, прогнозировать структурно-морфологические особенности и кинетическую устойчивость получаемых материалов (пленок, покрытий, волокон, пластмасс и др.), а также их характеристики при эксплуатации в различных условиях [9-11]. Результаты интерферометрии применяют при моделировании процессов нанесения и сушки покрытий, деструкции полимеров в различных средах и др. [4,6]. В последнее время отмечается тенденция к расширению применения интерференционных методов исследования в таких областях, как биохимия и фармакология [12-14]. В [13] исследованы процессы массопереноса и растворимости лекарственных

препаратов в полимерных матрицах методом многолучевой интерферометрии, а в [14] показано, что интерферометрический метод может успешно применяться для изучения биодеградации полимеров.

В настоящей работе приведены результаты исследований методами лазерной интерферометрии процессов массопереноса в бинарных системах полимер + низкомолекулярная жидкость и низкомолекулярная жидкость I + низкомолекулярная жидкость II.

Оптическая интерферометрия фазовых объектов

Прозрачные среды с пространственными вариациями геометрической толщины $d(x, y, z)$ или/и показателя преломления $n(x, y, z)$ относятся к классу фазовых объектов, поскольку изменяют (пространственно модулируют) фазу прошедшей через них волны. Параметры зависимостей $d(x, y, z)$, $n(x, y, z)$ и, в целом, оптической толщины объекта $D(x, y, z) = d(x, y, z) \cdot n(x, y, z)$ можно определить с помощью оптического интерферометра [15-20].

Для исследования параметров фазовых объектов методом оптической интерферометрии используют как классические [15-19], так и голографические [20-23] интерференционные системы. Классические системы в основном базируются на двухлучевых интерферометрах Маха-Цендера и многолучевом интерферометре Фабри-Перо.

Для определения параметров фазового объекта методом классической оптической интерферометрии его помещают в пучок света в плечо интерферометра. Прошедшая через объект световая волна приобретает дополнительную пространственную фазовую модуляцию $\Delta\psi(x, y)$, определяемую пространственными вариациями оптической толщины объекта $D(x, y, z)$. В выходной ветви интерферометра объектная волна интерферирует с опорной волной, и образуется картина интерференционных

полос с пространственным распределением интенсивности $I(x, y)$ [16-18]:

$$I(x, y) = I_s + I_r + 2\sqrt{I_s I_r} \cos[\Delta\Psi_0(x, y) + \Delta\Psi(x, y)], \quad (1)$$

где I_s и I_r – интенсивности объектной и опорной волн, $\Delta\Psi_0(x, y)$ – начальная разность фаз объектной и опорной волн.

Форма интерференционных полос, их пространственное расположение и пространственный период определяются начальной разностью фаз $\Delta\Psi_0(x, y)$ и дополнительной фазовой модуляцией объектной волны $\Delta\Psi(x, y)$. Если начальная разность фаз постоянна по всему сечению выходного поля, $\Delta\Psi_0(x, y) = \Psi_0 = const$, то интерферометр работает в режиме полос бесконечной ширины. Для режима полос конечной ширины создают начальную разность фаз $\Delta\Psi_0(x, y)$, как правило, в виде линейной зависимости от координаты, $\Delta\Psi_0(x, y) = (2\pi/\lambda)\alpha x$, где λ – длина волны; α – угол взаимного наклона волновых фронтов полей. В этом случае на выходе интерферометра наблюдаются прямолинейные интерференционные полосы с периодом $\Lambda \approx \lambda/\alpha$, перпендикулярные оси Y , которые также называют опорными полосами.

В ряде случаев по картине интерференционных полос $I(x, y)$ можно непосредственно определить фазовую модуляцию $\Delta\Psi(x, y)$ объектной волны, а затем и оптическую толщину объекта $D(x, y, z)$. Следовательно, при известной зависимости $d(x, y, z)$ можно определить пространственное распределение показателя преломления $n(x, y, z)$ исследуемого объекта. Наиболее просто такая обратная задача решается для тонких квазиплоских фазовых объектов, для которых имеют место только зависимости $d(x, y)$ и $n(x, y)$. Для тонких объектов с известной постоянной толщиной $d = const$ распределение показателя преломления $n(x, y)$ определяется практически непосредственно по форме интерференционных полос.

Для несимметричных распределений показателя преломления в объемных фазовых объектах используют метод голографической интерферометрии с применением диффузного рассеивателя для обеспечения многонаправленного зондирования объемного объекта [20-23]. Кроме этого, голографический метод, как дифференциальный метод контроля, позволяет исследовать быстропротекающие процессы и среды со сложным распределением показателя преломления в резервуарах с окнами неоптического качества. Трехмерное распределение показателя преломления можно определить и с помощью методов оптической интерференционной томографии, в

которой также используется многонаправленное зондирование исследуемого объекта [24].

Интерферометр Маха-Цендера

Наиболее часто для исследования тонких фазовых объектов применяют интерферометр Маха-Цендера [16-18]. Фазовый объект располагается в одном из плеч интерферометра. На выходе интерферометра располагается объектив для формирования действительного изображения плоскости сечения объекта. Картина интерференции объектной и опорной волн наблюдается в плоскости изображения объекта IP (рис. 1).

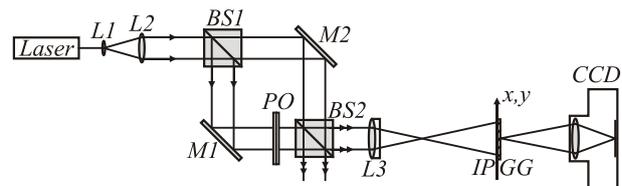


Рис. 1. Схема лазерного интерферометра Маха-Цендера для изучения фазового объекта: $L1$ и $L2$ – линзы, составляющие коллиматор; $BS1$ и $BS2$ – делители пучков света; $M1$ и $M2$ – поворотные зеркала; PO – фазовый объект; $L3$ – объектив; IP – плоскость изображения объекта; GG – матовое стекло; CCD – ПЗС-камера

В наших экспериментах с интерферометром Маха-Цендера в основном использовался He-Ne лазер с линейной поляризацией излучения. При использовании лазерного диода необходимо более точно выравнять оптические пути в плечах интерферометра, поскольку излучение диода имеет существенно меньшую длину временной когерентности $l_c \approx \lambda_0^2/\Delta\lambda$, чем излучение He-Ne лазера. В интерферометре Маха-Цендера это выравнивание оптических путей выполнить достаточно сложно и неудобно даже при использовании прецизионных механических устройств.

На рис.2 показана интерферограмма фазового объекта – смеси полимера с растворителем в тонкой кювете. Интерферометр был настроен на полосы конечной ширины. Это позволяет определять знак изменения показателя преломления $\Delta n(x, y)$.

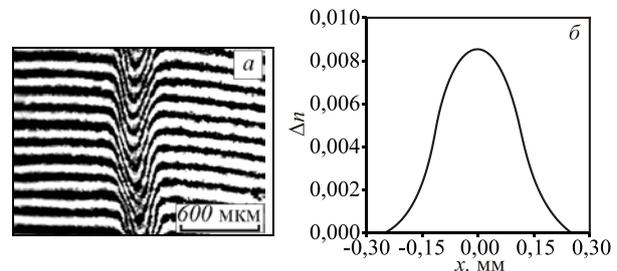


Рис. 2. (а) Интерферограмма процесса взаимодиффузии в системе ацетат целлюлозы-нитрометан в полосах конечной ширины (интерферограмма получена в интерферометре Маха-Цендера); (б) пространственное распределение изменения показателя преломления, реконструированное по интерферограмме

Для регистрации интерферограммы на выходе интерферометра использовался фотоаппарат NIKON Coolpix 4300. Цифровая интерферограмма подвергалась компьютерной обработке – контрастированию и сглаживанию спекл-модуляции изображения [25] для повышения точности определения положения центров интерференционных полос. Для расчета фазовой модуляции, вносимой объектом – полимером в среде растворителя, использовалось следующее выражение

$$\Delta\Psi(x) = \frac{2\pi}{\lambda} (n(x) - n_0) d, \quad (2)$$

где n_0 – показатель преломления растворителя без полимерного волокна; $n(x)$ – показатель преломления раствора полимера в растворителе; d – толщина плоского капилляра кюветы. Толщина капилляра $d = 0,22$ мм задавалась специальными металлическими спейсерами – калиброванной проволокой. Полагалось, что на прямолинейном участке каждой полосы $\Delta\Psi(x) = 0$ ($n(x) = n_0$). Значения $\Delta\Psi(x)$ определялись в точках x_j пересечения прямой $x = const$ с центрами светлых и темных интерференционных полос. Таким образом определялись дискретные значения $\Delta\Psi(x_j)$, кратные π рад.

Решение уравнения (2) относительно $n(x)$ при известных d , n_0 , λ и установленных в эксперименте значениях $\Delta\Psi(x_j)$ позволяет определить значения $n(x_j)$, по которым интерполяционным путем можно определить профиль показателя преломления $n(x)$ раствора полимера:

$$n(x_j) = n_0 + \frac{\lambda \Delta\Psi(x_j)}{2\pi d}. \quad (3)$$

Кривая изменения показателя преломления, реконструированная по интерферограмме, представлена на рис.2б. Абсолютная погрешность реконструкции изменения показателя преломления составила, по нашим оценкам, 0,0003.

Интерферометр Майкельсона

Процесс массопереноса в системе диацетат целлюлозы – нитрометан исследовали на лазерном интерферометре Майкельсона. Схема экспериментальной установки приведена на рис.3.

В одно из плеч интерферометра устанавливали кювету PO с исследуемой системой. Объективы L3 и L4 использовались для формирования на CCD матрице (использовалась цифровая система ввода изображения VS-СТТ-205) увеличенного изображения кюветы. В ходе эксперимента велась непрерывная запись кадров цифровых интерферограмм на жесткий диск компьютера. В качестве кюветы ис-

пользовали две плоскопараллельные стеклянные пластинки, скрепленные между собой специальным зажимом. Зазор между пластинками устанавливали при помощи двух металлических спейсеров диаметром 210 мкм. Диаметр спейсеров измеряли микрометром и дифракционным методом.

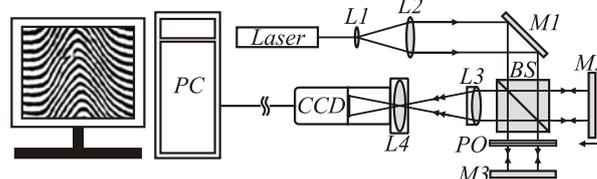


Рис.3. Схема экспериментальной установки на основе лазерного интерферометра Майкельсона, модифицированного для исследования малых фазовых объектов: L1 и L2 – коллиматор; BS – делитель пучка; PO – кювета с изучаемым фазовым объектом; M1 – поворотное зеркало; M2 и M3 – плоские зеркала интерферометра; L3 и L4 – объективы; CCD – камера; PC – компьютер

Методика экспериментов с использованием лазерного интерферометра Майкельсона состояла в следующем. Образец ацетатного волокна помещали вертикально в воздушный зазор кюветы. Интерферометр путем прецизионного наклона зеркал M2 и M3 (рис.3) настраивали на горизонтальные полосы конечной ширины. Затем в зазор кюветы с волокном заливали растворитель. По изменению формы интерференционных полос наблюдали процесс растворения ацетата целлюлозы в нитрометане. Изменяющуюся картину интерференционных полос фиксировали ПЗС-камерой и вели непрерывную запись изображений с частотой записи кадров $f = 0,5$ Гц. На рис.4 приведены интерферограммы, наблюдаемые на различных стадиях процесса растворения ацетатного волокна в нитрометане.

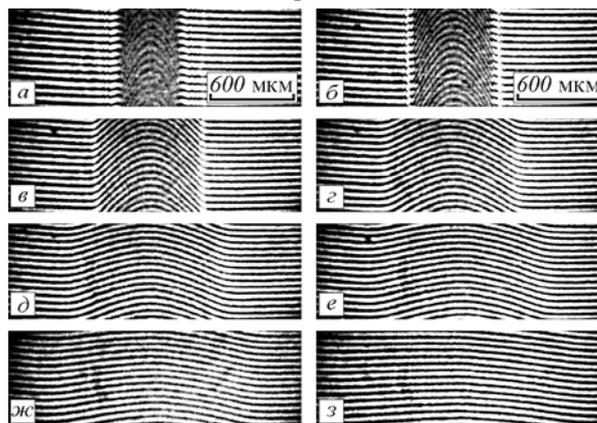


Рис.4. Эволюция интерференционной картины, наблюдаемой на выходе интерферометра Майкельсона в процессе взаимодиффузии компонентов системы ацетат целлюлозы-нитрометан: (а) $t=1$ мин, (б) $t=2$ мин, (в) $t=5$ мин, (г) $t=10$ мин, (д) $t=15$ мин, (е) $t=20$ мин, (ж) $t=30$ мин, (з) $t=50$ мин

На начальных стадиях процесса наблюдается резко очерченное изображение волокна с изогнутыми интерференционными полосами и горизон-

тальными полосами конечной ширины в области растворителя (рис. 4а). В волокне происходит достаточно интенсивное рассеяние света, поэтому его изображение выглядит темным с отчетливой пятнистостью (спекл-модуляцией), снижающей контраст полос в пределах изображения волокна (рис. 4а, б). Со временем в результате диффузии растворителя в полимер и массопереноса ацетата целлюлозы в растворитель, волокно становится более оптически однородным и в области его изображения контраст полос увеличивается (рис. 4б). В процессе дальнейшего диффузионного смещения в области изображения волокна формируются непрерывные полосы, претерпевающие характерный изгиб в зоне взаимодействия (рис. 4в-е). Ширина области изгиба полос со временем возрастает, что свидетельствует о расширении диффузионной зоны. Вместе с этим сглаживается пространственное распределение показателя преломления – уменьшается его градиент. В области локализации волокна показатель преломления со временем стремится к показателю преломления растворителя (рис. 4 ж-з).

Полученные цифровые интерференционные картины подвергались компьютерной обработке с целью увеличения контраста полос и сглаживания оптического шума – спекл-модуляции. Далее для каждой интерферограммы с учетом коэффициента увеличения β изображающей системы определялась пространственная фазовая модуляция объектного поля $\Delta\psi(x, t = const)$ в горизонтальном направлении X (перпендикулярно волокну), вносимая диффузионным процессом.

Дискретные значения этой фазовой модуляции $\Delta\psi_m(x_j, t_k) = m\pi$ определяли по точкам пересечения оси X с центрами светлых и темных полос. Поскольку в интерферометре Майкельсона световая волна дважды проходит через фазовый объект, то переменная в направлении оси X составляющая фазовой модуляции определяется выражением

$$\Delta\psi(x_j) = \frac{4\pi}{\lambda} [n(x_j) - n_0] d, \quad (4)$$

где $n(x_j)$ – значение показателя преломления среды в капилляре кюветы в дискретных точках x_j , n_0 – показатель преломления растворителя, d – толщина капилляра кюветы.

С использованием выражения (4) по значениям $\Delta\psi_m(x_j, t_k)$ для каждого момента времени t_k рассчитывались значения изменения показателя преломления среды $\Delta n(x_j, t_k) = n(x_j, t_k) - n_0$. На рис. 5 представлены зависимости изменения показателя преломления системы диацетат целлюлозы – нитрометан в процессе взаимодействия компонентов системы.

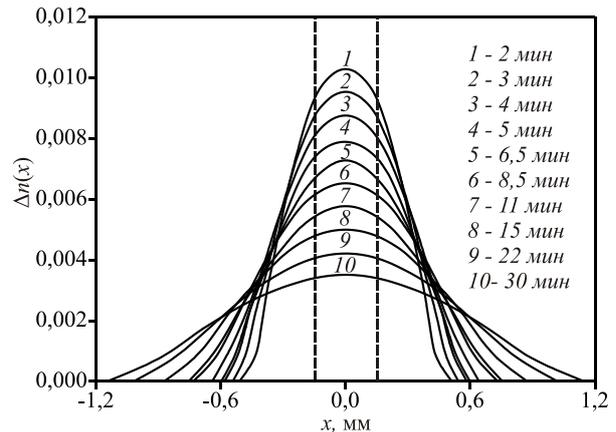


Рис. 5. Пространственные распределения изменения показателя преломления $\Delta n(x)$ в процессе взаимодействия компонентов системы диацетат целлюлозы – нитрометан. Вертикальными пунктирными линиями показаны первоначальные границы волокна

По кривым пространственного распределения изменения показателя преломления с использованием модели диффузии из бесконечно тонкого слоя в неограниченное тело [26] был рассчитан усредненный коэффициент диффузии диацетата целлюлозы в нитрометане, который составил $D = 7 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$. Погрешность определения коэффициента диффузии составила, по нашим оценкам, не более 10%.

Исследование массопереноса компонентов в модельной системе диацетат целлюлозы – нитрометан весьма перспективно, поскольку позволяет оценить возможность применения классических интерференционных схем для исследования взаимодействия высокомолекулярное вещество (полимер) – низкомолекулярная жидкость (растворитель). Кроме того, разработанные подходы (применение увеличительной оптики и др.) могут быть применены в исследовании влияния природы низкомолекулярного вещества, молекулярной массы, молекулярно-массового распределения и структурно-морфологических особенностей высокомолекулярного компонента на диффузионные характеристики других практически важных систем полимер – низкомолекулярная жидкость (растворитель, осадитель, пластификатор), широко используемых в технологии получения пленок, мембран, полых волокон, разнообразных фармацевтических форм пролонгированного лечебного действия и др.

Исследование процессов биодеградации полимера

Термические ожоги кожи являются одними из самых распространенных травм как на производстве, так и в быту. Одним из перспективных подходов к лечению термического поражения кожи является использование пленочных покрытий на основе биодеградирующих (рассасывающихся) полимеров. Преимущества таких покрытий заключаются в том, что, с одной стороны, они выполняют защитную функцию, закрывая рану от внешнего инфицирования, и обладают бактерицидными свойствами, а с

другой – могут выполнять лечебную роль, участвуя в развитии различных репарационных процессов [27]. В основе способности этих материалов к биодеградации лежит водо- и плазморастворимость, исследование которой *in vivo* классическими методами связано с рядом трудностей. В связи с этим разработка других методов и подходов к оценке сорбционно-диффузионных параметров процесса «биодеградации» полимера представляется актуальной задачей.

В рамках настоящей работы исследована возможность применения метода лазерной двулучевой интерферометрии для исследования процессов биодеградации пленочных материалов на основе природного полисахарида хитозана. Объектом исследования служили пленочные образцы, полученные из хитозана с молекулярной массой 87000 и степенью дезацетилирования 83,6%, производства ЗАО «Биопротекс». Пленки получали методом полива 3%-го раствора полимера в 2%-ой уксусной кислоте на горизонтальную полиэтиленовую подложку при комнатной температуре 48 часов. Характеристики свежесформованной пленки: солевая форма хитозана, средняя толщина – $62,7 \pm 3,6$ мкм, влажность – 17,6%.

Процесс биодеградации полимера проводили в кювете, представляющей собой две плоскопараллельные стеклянные пластинки размером 6×3 см с зазором $\approx 0,21$ мм, скрепленные между собой специальным зажимом. Капиллярный зазор между пластинками устанавливали с помощью калиброванных металлических спейсеров. Диаметр спейсеров измеряли дифракционным методом. Кинетику набухания и растворения пленок изучали на лазерном интерферометре Майкельсона (рис. 3). Образец хитозановой пленки длиной ≈ 20 мм и шириной $\approx 0,5$ мм помещали вертикально в кювету. Затем кювету с образцом заполняли дистиллированной водой. Кювету устанавливали в одно из плеч интерферометра, настраивая его на горизонтальные полосы конечной ширины. В ходе эксперимента в кювете протекали процессы диффузионного смешения компонентов, в результате которых происходило изменение концентрации полимера и, как следствие, изменение пространственного распределения показателя преломления контролируемой среды. В результате этого во времени изменялась пространственная фазовая модуляция объектной волны $\Delta\Psi(x, t)$ в соответствии с уравнением (4), что приводило к изменению формы опорных интерференционных полос.

Эксперименты проводили при температуре $37 \pm 1^\circ\text{C}$. На рис. 6 приведены интерферограммы, наблюдаемые на разных этапах набухания и растворения полимерной пленки в модельной жидкости.

На начальных стадиях процесса наблюдается изображение пленки и прямолинейные горизонтальные опорные полосы в области растворителя (рис. 6, 1 мин). В области изображения пленки наблюдается сложная, нерегулярная картина интерференции – фактически спекл-картина [25], обусловленная оп-

тической неоднородностью пленки. В процессе диффузионного смешения пленка становится оптически прозрачной и наблюдается непрерывное изменение показателя преломления по всему сечению кюветы (рис. 6, 6 мин). В результате градиента показателя преломления среды вдоль горизонтальной оси X , происходит изменение кривизны полос. Со временем область искривления полос увеличивается в направлении оси X , что свидетельствует о расширении зоны взаимодиффузии (рис. 6, 16 мин).

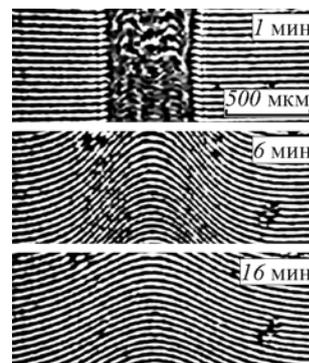


Рис. 6. Интерферограммы, полученные в процессе массопереноса в системе хитозан – вода

Полученные снимки интерферограмм подвергали компьютерной обработке в графическом редакторе с целью увеличения контрастности и сглаживания спекл-эффекта. Для каждой интерферограммы по точкам пересечения прямой $x = const$ с центрами светлых и темных полос, с учетом коэффициента увеличения β , определяли дискретные значения фазового сдвига $\Delta\Psi_m(x_j, t_k)$, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$.

По значениям $\Delta\Psi_m(x_j, t_k)$ с использованием формулы (4) рассчитывали дискретные величины изменения показателя преломления среды $\Delta n(x_j, t_k)$. Путем аппроксимации точек $\Delta n(x_j, t_k)$ функцией Гаусса получали непрерывные зависимости $\Delta n(x, t_k)$ на разных стадиях процесса диффузии. На рис. 7 приведены зависимости изменения показателя преломления системы в процессе набухания и растворения полимерной пленки в воде. Абсолютная погрешность реконструкции изменения показателя преломления составила 0,0002. Более высокая точность по сравнению с интерферометром Маха-Цендера обусловлена двукратным проходом излучения через кювету.

По кинетике изменения показателя преломления с использованием модели диффузии бесконечно тонкого слоя в неограниченном теле [26] были рассчитаны коэффициенты диффузии D хитозана.

Проведенные эксперименты показали, что метод лазерной интерферометрии с применением увеличительной оптики и специального программного обеспечения может быть успешно применен для моделирования и исследования процессов биодеградации полимеров и оценки их сорбционно-диффузионных параметров.

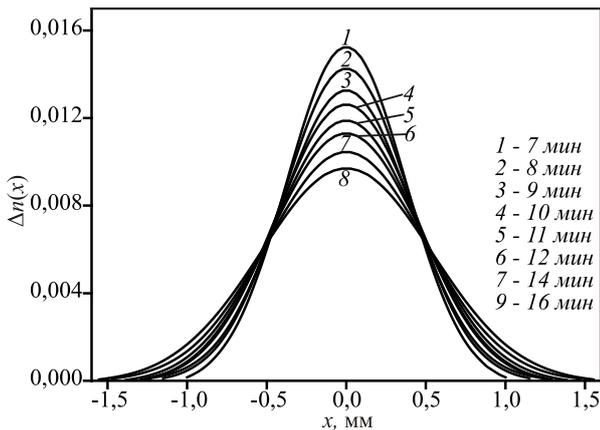


Рис.7. Пространственное распределение изменения показателя преломления системы хитозан – вода в процессе взаимодиффузии

Метод муаровых полос для обработки интерферограмм в полосах конечной ширины

В реальном интерферометре поверхности зеркал, делительных пластин, окон кюветы могут иметь отклонения от плоскости и параллельности. Стекло пластин также может быть неоднородным. Все эти погрешности оптических элементов интерферометра приводят к появлению паразитных интерференционных полос в режиме полос бесконечной ширины и к искривлению несущих интерференционных полос в режиме полос конечной ширины. Прямой анализ и обработка таких интерференционных полос усложняется и сопровождается существенными ошибками. Ниже описывается метод обработки интерферограмм в полосах конечной ширины, который позволяет получить так называемые муаровые полосы, совпадающие по форме с интерференционными полосами, которые получились бы в режиме полос бесконечной ширины в интерферометре с идеальными оптическими элементами.

Муаровый метод заключается в вычитании картины несущих интерференционных полос из картины возмущенных объектом полос и в наблюдении образующейся картины муаровых полос. Вычитание картины невозмущенных несущих полос, какой бы они формы не были, приводит к формированию равномерного темного поля в разностном изображении. Возмущенные объектом области с искривленными и смещенными полосами полностью не вычитаются, и в этих областях образуются муаровые полосы. Форма и период муаровых полос качественно и количественно отражают оптические параметры фазового объекта.

Для реализации процедуры вычитания изображений интерференционных картин наиболее эффективным является метод цифровой записи изображений и их численное вычитание с использованием соответствующей программы. Именно такая методика использовалась в настоящей работе. Обратим внимание, что рассматриваемый метод муаровых полос по своей сути полностью совпадает с методом цифровой корреляционной интерферометрии [28,29].

Рассмотрим математические основы муарового метода. Распределение интенсивностей в записываемых интерференционных картинах можно представить в следующем виде:

$$I_1(x, y) = 2I(x, y)\{1 + V \cos[\Delta\Psi_0(x, y)]\}, \quad (5)$$

$$I_2(x, y) = 2I(x, y)\{1 + V \cos[\Delta\Psi_0(x, y) + \Delta\Psi(x, y)]\}, \quad (6)$$

где $I_1(x, y)$ и $I_2(x, y)$ - распределения интенсивностей в невозмущенной и возмущенной интерференционных картинах, $\Delta\Psi_0(x, y)$ - разность фаз, создающая систему несущих полос конечной ширины, V - коэффициент модуляции (контраст) интерферограммы.

Распределение интенсивности в разностном изображении $\Delta I(x, y)$ можно записать в виде:

$$\Delta I(x, y) = 4I(x, y)V \sin(\Delta\Psi_0 + \Delta\Psi/2) \sin(\Delta\Psi/2). \quad (7)$$

Численное пространственное распределение $\Delta I(x, y)$ необходимо преобразовать в изображение - визуализировать. Однако прежде необходимо взять модуль этого выражения, поскольку оно может быть знакопеременным

$$|\Delta I(x, y)| = 4I(x, y)V \cdot \left| \sin(\Delta\Psi_0(x, y) + \Delta\Psi(x, y)/2) \right| \times \left| \sin(\Delta\Psi(x, y)/2) \right|. \quad (8)$$

Если созданная в интерферометре исходная разность фаз $\Delta\Psi_0(x, y)$ существенно более быстро изменяется в пространстве x, y по сравнению с объектной фазовой модуляцией $\Delta\Psi(x, y)$, то период функции $|\sin(\Delta\Psi_0 + \Delta\Psi/2)|$ в уравнении (8) будет существенно меньше периода другой функции $|\sin(\Delta\Psi/2)|$. Пространственное изменение разности фаз $\Delta\Psi_0(x, y)$, фактически, определяет несущие (опорные) полосы интерферограммы. Если период несущих полос столь мал, что они практически неразличимы глазом, то это означает, что глаз усредняет эти полосы. Формально, такое усреднение можно ввести в уравнение (8) в виде усреднения по площади S , на которой функция $\Delta\Psi_0(x, y)$ успевает измениться на 2π радиан, а более медленная функция $\Delta\Psi(x, y)$ практически остается неизменной. Тогда для наблюдаемого разностного изображения с усредненным распределением интенсивности получаем выражение

$$\langle |\Delta I(x, y)| \rangle \approx 2 \langle I(x, y) \rangle V \left| \sin(\Delta\Psi(x, y)/2) \right|, \quad (9)$$

где угловые скобки означают пространственное усреднение $\langle \dots \rangle = S^{-1} \iint_S \dots dx dy$.

Таким образом получили, что разностное изображение интерференционных картин в полосах конечной ширины промодулировано модулем синусоидальной функции. Эта пространственная модуляция и называется картиной муаровых полос. В цифровой корреляционной спекл-интерферометрии [28-30] эти полосы называют полосами корреляции и декорреляции спекл-картин. Период модуля синуса равен π радиан, следовательно, в разностном изображении имеем картину светлых и темных муаровых полос, форма и положение которых определяется уравнениями:

$$\Delta\psi(x, y) = 2m\pi \quad (10)$$

для темных полос,

$$\Delta\psi(x, y) = (2m + 1)\pi \quad (11)$$

для светлых полос.

Уравнение для темных муаровых полос в точности совпадает с уравнением для светлых интерференционных полос для того же фазового возмущения $\Delta\psi(x, y)$, наблюдаемых в режиме полос бесконечной ширины. Это необходимо учитывать при обработке муаровых полос в разностном изображении.

На рис.8 показаны смоделированные интерференционные картины в полосах конечной ширины – невозмущенные и возмущенные объектом, а также показано разностное изображение с системой муаровых полос. Вышеописанный процесс усреднения интерференционных полос можно пронаблюдать, рассматривая разностные картины с различного расстояния.

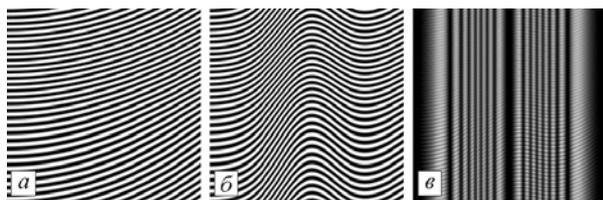


Рис.8. Смоделированные интерференционные картины в полосах конечной ширины (а, б) и разностное изображение (в) с муаровыми полосами: а – несущие интерференционные полосы; б – полосы, возмущенные фазовым объектом

Для эффективной реализации муарового метода необходимо иметь несущие полосы как можно меньшего периода Λ . Однако при этом система полос должна разрешаться используемой ПЗС-матрицей и должна четко проявляться в цифровых изображениях.

Метод муаровых полос мы использовали, в частности, для исследования процессов биодegradации полимера. На рис. 9 приведены фотографии интерферограмм в полосах конечной ширины на различных стадиях процесса растворения пленки хитозана в дистиллированной воде и соответствующие раз-

ностные изображения с муаровыми полосами, отчетливо характеризующими процесс изменения показателя преломления в изучаемой среде.

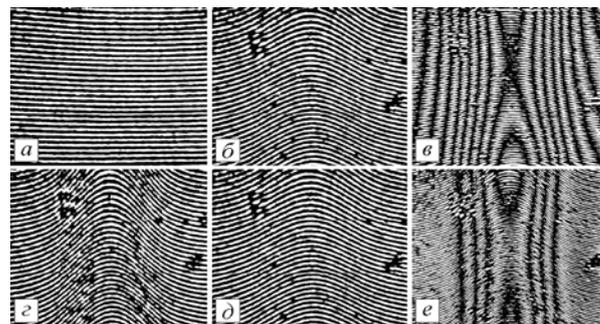


Рис.9. Реализация метода муаровых полос: интерференционные полосы конечной ширины невозмущенной (а) и возмущенной интерферограмм (б, г, д) и результаты их попарного численного вычитания (в, е)

Лазерная многолучевая интерференционная микроскопия

В случаях, когда необходимо высокое пространственное разрешение для наблюдения пространственной структуры фазового объекта, применяется метод интерференционной микроскопии [1,3-5]. В основе этого метода лежит явление многолучевой интерференции света в капилляре клинообразной кюветы с высокоотражающими внутренними поверхностями. При прохождении пучка монохроматического света через такую кювету вследствие разности хода прошедшего и отраженного лучей в области клина возникает многолучевая интерференционная картина в виде системы параллельных светлых и темных полос.

Кинетику взаимодиффузии в системе глицерин – вода исследовали на лазерном многолучевом микроинтерферометре на основе микроскопа с цифровой записью изображения [3,5]. Необходимость использования микроскопа с достаточно большим увеличением, а значит и высоким пространственным разрешением, обусловлена большим градиентом показателя преломления и, следовательно, высокой пространственной частотой интерференционных полос, возникающих в области контакта глицерина с водой. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 10.

Кювету с исследуемой системой помещали на предметный столик микроскопа. Объектив микроскопа МО формировал увеличенное изображение зазора кюветы на ПЗС матрице (DMC-300). В экспериментах велась непрерывная запись кадров цифровых интерферограмм на жесткий диск компьютера. Вращающееся матовое стекло в освещающем пучке использовали для подавления спекл-модуляции в изображении. В экспериментах использовали клинообразные кюветы, составленные из стеклянных пластин, внутренние стороны которых покрыты слоем металла с достаточно высоким коэффициентом отражения $R \approx 0,6-0,7$. Воздушный клин между пластинами устанавливали с помощью ка-

либрованного металлического спейсера толщиной 100 мкм, угол клина составлял $\alpha \approx 0,5^\circ$. Источником света служил He-Ne лазер.

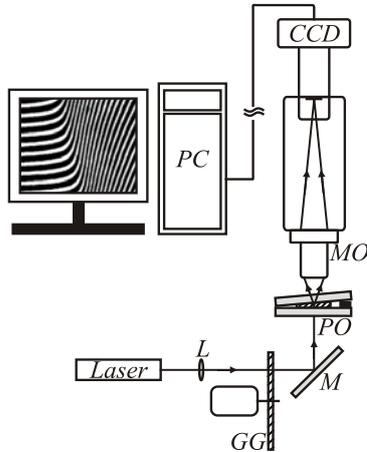


Рис. 10. Схема многолучевого микроинтерферометра: L – расширитель пучка; PO – кювета с изучаемым фазовым объектом; M – поворотное зеркало; MO – микрообъектив; GG – вращающееся матовое стекло; CCD – ПЗС-камера; PC – компьютер

Методика эксперимента на многолучевом микроинтерферометре состояла в следующем. На металлизированную поверхность одной из стеклянных пластин наносили небольшой объем глицерина, затем устанавливали калиброванный спейсер, накрывали второй пластиной и закрепляли специальным фиксатором. Кювету помещали на предметный столик микроскопа и настраивали изображение на границу раздела глицерин-воздух перпендикулярно интерференционным полосам (рис. 11, а). Затем клинообразный воздушный зазор кюветы заполняли дистиллированной водой. По изменению интерференционной картины наблюдали процесс взаимосмещения жидкостей. Изменяющуюся картину интерференционных полос фиксировали ПЗС – камерой через определенные интервалы времени. На рис. 11 приведены интерферограммы, наблюдаемые в процессе массопереноса в системе глицерин – вода.

Горизонтальные, практически параллельные друг другу и без взаимных искажений опорные интерференционные полосы в областях глицерина и воздуха свидетельствуют о постоянном показателе преломления этих сред (рис. 11а). При введении в кювету воды в области соприкосновения жидкостей имеет место резкий скачок показателя преломления и, соответственно, наблюдается резкий изгиб интерференционных полос (рис. 11б). Анализ картины показывает, что в области взаимодиффузии имеет место непрерывное изменение показателя преломления (рис. 11б-з), что свидетельствует о формировании молекулярных растворов компонентов смеси. С течением времени наблюдается расширение области искривления интерференционных полос, что свидетельствует о расширении зоны взаимодиффузии (рис. 11б-з). Поэтому по интерференционным картинам возможно определение

концентрационного профиля системы глицерин – вода в процессе массопереноса.

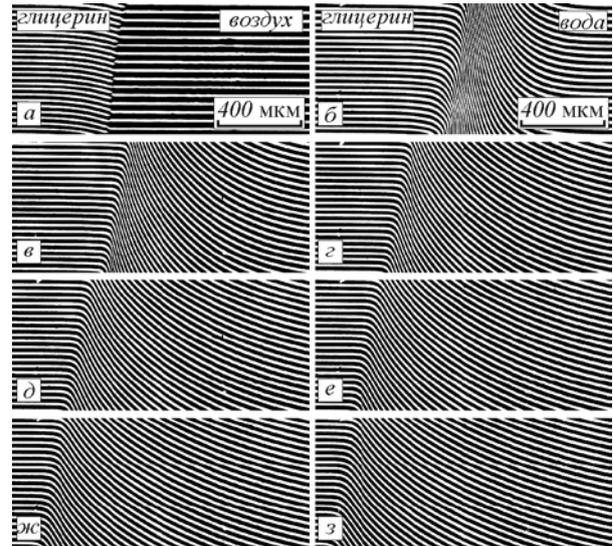


Рис. 11. Интерференционные картины, полученные в процессе массопереноса в системе глицерин – вода: (а) $t=0$ мин, (б) $t=8$ сек, (в) $t=1$ мин 50 сек, (г) $t=3$ мин 32 сек, (д) $t=5$ мин 14 сек, (е) $t=6$ мин 56 сек, (ж) $t=8$ мин 38 сек, (з) $t=10$ мин 20 сек

Количественная обработка многолучевых интерферограмм основывалась на следующем теоретическом анализе. В отличие от интерферометров Маха-Цендера и Майкельсона, где наблюдается двулучевая интерференция, в данном методе формирования интерференционной картины участвует множество лучей, испытавших различное число отражений внутри кюветы, как это происходит в интерферометре Фабри-Перо, в котором интерференционная картина наблюдается в бесконечности – в задней фокальной плоскости линзы [18,19]. В рассматриваемом методе локализованная интерференционная картина наблюдается в изображении клина, где также имеет место многолучевая интерференция света, что обуславливается, как мы полагаем, конечной разрешающей способностью микроскопа, собирающего лучи света в каждую точку изображения от достаточно протяженной области клина, определяемой областью разрешения микроскопа. При многолучевой интерференции для распределения интенсивности в интерференционной картине приближенно можно использовать формулу Эйри [18,19], полученную для конечного числа отражений $2N$ в клине в пределах области разрешения микроскопа, без учета поглощения и возможных фазовых сдвигов при отражении от металлических поверхностей клина

$$I(x, y) = I_0 (1 - R^2) \times \frac{[1 + R^{2N} - 2R^N \cos N\Delta\Psi(x, y)]}{1 + R^2 - 2R \cos \Delta\Psi(x, y)}, \quad (12)$$

где I_0 – интенсивность оптического поля, освещающего кювету, R – коэффициент отражения света от поверхностей клина, $\Delta\Psi(x, y)$ – разность фаз

между лучами света 3-х и 1-норатно, 5-ти и 3-хкратно и т.д., прошедшими через клинообразную кювету

$$\Delta\Psi(x, y) \approx \frac{2\pi}{\lambda} 2d(y)n(x) \approx \frac{2\pi}{\lambda} 2\alpha y n(x), \quad (13)$$

где $d(y) \approx \alpha y$ – локальная толщина клина, линейно изменяющаяся в направлении оси Y , перпендикулярной ребру клина, α – угол клина, $n(x)$ – локальное значение показателя преломления среды внутри кюветы, которое изменяется в направлении оси X (вдоль ребра клина) при переходе от одной полосы к другой (рис. 12а).

В пространственном распределении интенсивности $I(x, y)$, определяемой уравнением (12), при достаточно большом коэффициенте отражения $R \approx 0,7 - 0,8$ и не очень большом числе интерферирующих лучей N имеют место относительно острые локальные максимумы – светлые интерференционные полосы при $\Delta\Psi(x, y) = 2\pi m$ и более широкие минимумы – темные полосы при $\Delta\Psi(x, y) = (2m + 1)\pi$ (см. интерферограммы на рис.11).

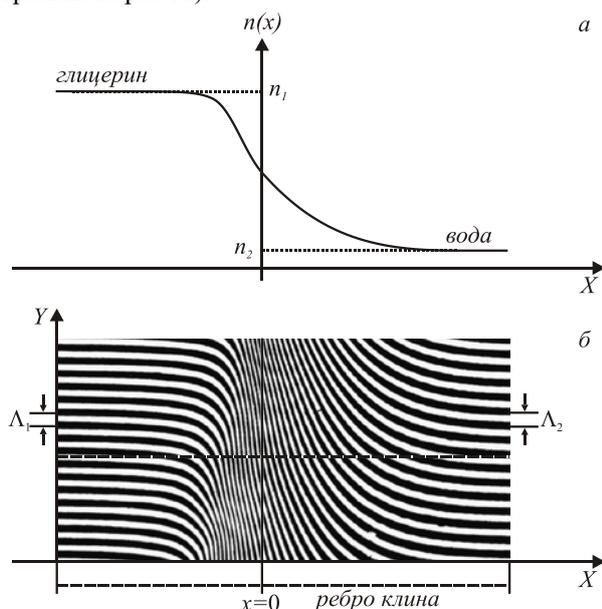


Рис. 12. Пространственное изменение показателя преломления в области взаимодействия в системе глицерин – вода (а) и соответствующая картина интерференционных полос, наблюдаемая в клинообразной кювете с жидкостями (б)

Пространственный период интерференционных полос вдоль оси Y определяется выражением

$$\Lambda_y(x) \approx \frac{\lambda}{2\alpha n(x)}. \quad (14)$$

В области глицерина он равен $\Lambda_{y1} \approx \lambda/2\alpha n_1$, а в области воды – $\Lambda_{y2} \approx \lambda/2\alpha n_2$. В области взаимодействия период Λ_y изменяется от значения Λ_1 до Λ_2 .

Пространственный период полос вдоль оси X обратно пропорционален пространственной скорости изменения показателя преломления $\Delta n(x)/\Delta x$ и определяется выражением

$$\Lambda_x(x, y) \approx \frac{\lambda}{2\alpha y} \left(\frac{\Delta n(x)}{\Delta x} \right)^{-1}. \quad (15)$$

В области чистого глицерина и чистой воды $n = const$ и период полос $\Lambda_x = \infty$ при горизонтальных опорных полосах.

Уравнение (13) позволяет определить профиль показателя преломления $n(x)$ по наблюдаемой интерференционной картине при известных значениях n_1 и n_2 . Согласно (13) разность фаз $\Delta\Psi(x, y)$ вдоль оси X изменяется от значения $\Delta\Psi_1 = 4\pi\alpha y n_1/\lambda$ в области глицерина до значения $\Delta\Psi_2 \approx 4\pi\alpha y n_2/\lambda$ в области воды. Если это изменение равно $2\pi M$, где M – целое, то прямая $y = const$ (рис. 12б) пересекает M светлых или темных интерференционных полос, количество которых определяется разностью показателей преломления $n_1 - n_2$. Следуя работе [5], можно ввести относительную величину – инкремент показателя преломления

$$N(y) = \frac{n_1 - n_2}{M} \approx \frac{\lambda}{2\alpha y}, \quad (16)$$

зависящую от α и y , которая позволяет определять по интерференционной картине кривую изменения показателя преломления $n(x)$. Действительно, разность фаз $\Delta\Psi(x)$ можно представить в виде $\Delta\Psi(x) = \Delta\Psi_1 - 2\pi m(x)$, где $m(x)$ – число интерференционных полос, пересекаемых прямой $y = const$ в направлении от области с чистым глицерином до точки с определенной координатой X . Тогда для $n(x)$ из уравнения (13) получим выражение

$$n(x) \approx n_1 - m(x)N(y), \quad (17)$$

где число $m(x)$ может быть и дробным, если отсчет пересечений прямой и интерференционных полос ведется с точностью до долей их периода Λ_x .

Методика обработки интерферограмм заключалась в следующем. Для линии равной толщины клина кюветы $y = const$, перпендикулярной границе раздела жидкостей в кювете (рис. 11), определялся инкремент показателя преломления $N(y)$ с использованием (16). Значения n_1 и n_2 определяли на рефрактометре ИРФ-22. В наших экспериментах эти значения оказались равными $n_1 = 1,4729$, $n_2 = 1,3300$. Для каждой интерферограммы, зарегистрированной в определенный момент времени t_k , в процессе взаимодействия глицерина и воды опре-

деляли $m(x)$ – число пересечений прямой $y = const$ темных и светлых интерференционных полос между областью чистого глицерина до данной точки интерферограммы. Фактически, определяли координаты центров светлых и темных интерференционных полос x_j и соответствующие им числа $m(x_j)$. С использованием уравнения (17) определяли дискретные значения профиля показателя преломления $n(x_j) = n_1 - m(x_j, t_k)N(y)$ для каждого выбранного момента времени t_k процесса взаимодиффузии.

На рис.13 представлены рассчитанные по интерференционным картинам профили пространственного распределения показателя преломления $n(x)$ в различные моменты времени в процессе самопроизвольного смешения компонентов системы глицерин–вода. Абсолютная погрешность реконструкции показателя преломления составила по нашим оценкам 0,0001.

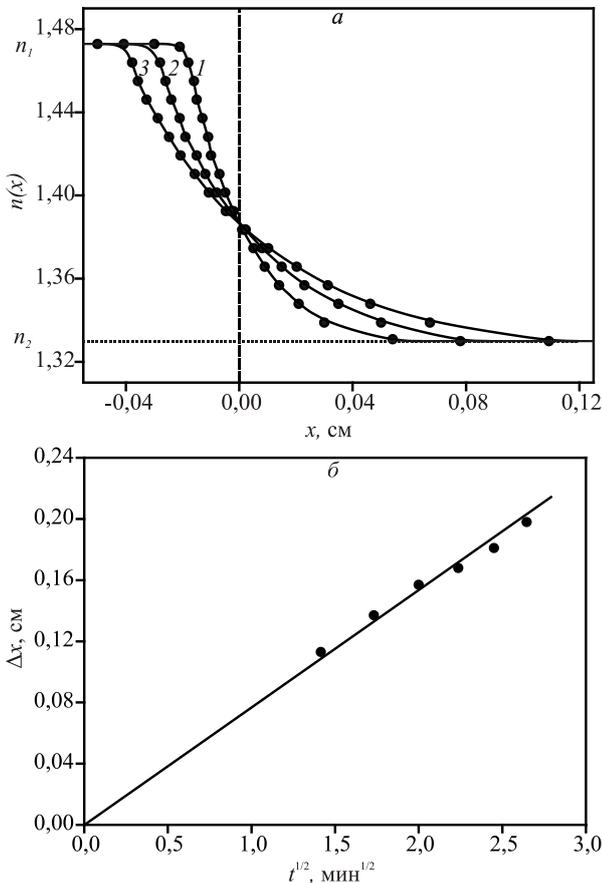


Рис.13. а) Пространственное распределение показателя преломления в системе глицерин – вода в различные моменты времени процесса взаимодиффузии: 40 сек (1), 2 мин (2) и 4 мин (3). б) Временная зависимость размера диффузионной зоны

Из рис. 13а видно, что в зоне взаимодиффузии компонентов наблюдается формирование концентрационного профиля с непрерывным изменением состава от одного компонента к другому. С течением времени размеры профиля пространственно-

го распределения показателя преломления $n(x)$ и, соответственно, концентрации $c(x)$ увеличиваются, а перемещение координат $x_i(c_i)$ изоконцентрационных плоскостей (сечений) относительно любой системы отсчета подчиняется диффузионной закономерности $\Delta x \sim t^{1/2}$ (рис. 13б).

Поскольку в данной системе показатель преломления линейно зависит от концентрации, то он фактически определяет концентрационный профиль вещества в изучаемой среде. Данные по концентрационному профилю $c(x)$ и его изменению во времени позволяют получить концентрационную зависимость коэффициентов взаимодиффузии. Коэффициенты массопереноса компонентов в системе глицерин–вода рассчитывали по теории Матано–Больцмана [5], согласно которой рассматривается второй закон Фика для одномерной диффузии вещества (18) при следующих начальных (19) и граничных (20) условиях:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right), \tag{18}$$

$$t = 0: c = 1 \text{ при } x < 0 \text{ и } c = 0 \text{ при } x > 0, \tag{19}$$

$$\frac{dc}{dx} = 0 \text{ при } x = \pm\infty. \tag{20}$$

На рис. 14 представлена полученная концентрационная зависимость коэффициентов взаимодиффузии. Погрешность определения коэффициентов диффузии составила, по нашим оценкам, не более 8%.

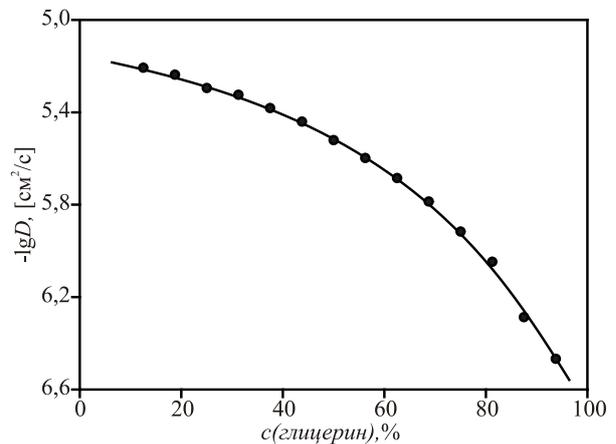


Рис. 14. Концентрационная зависимость коэффициента диффузии глицерина, рассчитанная по профилям пространственного распределения концентрации в процессе самопроизвольного смешения компонентов в системе глицерин–вода

Как видно из рис. 14, зависимость $-lg D = f(c)$ описывается плавной выпуклой кривой. С увеличением концентрации глицерина в смеси (например, с 10% до 90%) величина коэффициента

диффузии этого компонента в водной среде уменьшается более, чем на порядок.

Известно, что глицерин широко используется в технологии синтеза органических веществ и производства пластических масс, в лакокрасочной, текстильной, пищевой и косметической промышленности, в сельском хозяйстве и др. Хорошая смешиваемость с водой (высокая гигроскопичность) открывает широкие возможности применения глицерина в медицине и фармакологии, в частности, в качестве лекарственных средств, наполнителя и растворителя фармацевтических препаратов, смягчителя тканей, компонента формовочных растворов для капсулирования биологически активных веществ. Значительное снижение температуры кристаллизации смесей глицерин–вода в сравнении с безводным глицерином предопределяет перспективность их использования для замораживания эритроцитов, роговицы глаза и других живых тканей.

Заключение

Как показали эксперименты, методы лазерной интерферометрии могут эффективно использоваться для изучения процессов взаимодиффузии (смешения и растворения) компонентов бинарных систем, определения профилей распределения показателей преломления и концентрации, расчета коэффициентов взаимодиффузии в широкой области составов.

Лазерные интерферометры Маха-Цендера и Майкельсона могут достаточно эффективно использоваться для исследования кинетики процессов взаимодиффузии в системе полимер–растворитель. Применение достаточно простых оптических компонентов, средств настройки интерферометра и защиты от внешних вибраций позволяет получать стабильные и высококонтрастные интерференционные картины, отражающие пространственные распределения показателя преломления тонкого фазового объекта. Использование цифровой фоторегистрации с последующей численной обработкой изображений позволяет с достаточно высокой точностью контролировать кинетику процесса диффузии полимера. Погрешность определения коэффициентов диффузии в этих измерениях составляет менее 10% при точности измерения изменения показателя преломления $\approx 0,0003$.

Для достижения более высокого пространственного разрешения интерференционной картины при больших градиентах показателя преломления требуется применение высококачественных объективов с достаточно малым фокусным расстоянием и высокой числовой апертурой. Спекл-модуляция интерференционных картин в лазерном свете частично ограничивает точность измерений и разрешающую способность.

В этих условиях предпочтительнее применение метода многолучевой интерференционной лазерной микроскопии с использованием специальной клиновидной кюветы, вращающегося матового стекла для подавления спекл-модуляции и микроскопа с диф-

ровой регистрацией кадров изображений. Использование данной системы позволяет получать высокое пространственное разрешение интерференционной картины при одновременном сглаживании спекл-модуляции подвижным рассеивателем и снижении влияния внешних вибраций на наблюдаемую картину интерференционных полос. Точность реконструкции показателя преломления составляет $\approx 0,0001$, что обеспечивает возможность определения коэффициентов диффузии с погрешностью 5-8% в зависимости от концентрационной области. К преимуществам многолучевого микроинтерферометра следует также отнести компактность установки, к недостаткам – необходимость изготовления стекол с металлическим напылением, разрушающимся в процессе экспериментов.

Исследование кинетики и динамики массопереноса веществ в бинарных средах методами лазерной интерферометрии позволяет, с одной стороны, использовать результаты интерференционных измерений для изучения диффузионных характеристик систем механизма набухания и растворения компонентов, с другой - решать целый ряд практических задач. Например, прогнозировать диффузионную подвижность компонентов, оценивать молекулярные, фазовые, термодинамические и другие характеристики систем и материалов на их основе, что имеет важное практическое значение для целого ряда современных промышленных и медицинских технологий.

Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Президента для поддержки ведущих научных школ РФ НШ-208-2008.2 и гранта аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы (2006-2008)”, код проекта РНП 2.1.1.4473.

Литература

1. **Чалых, А.Е.** Оптические методы изучения диффузии / А.Е. Чалых, Р.М. Васенин // М.: Научные труды МТИЛП, 1964. Т. 30. - С. 192-199.
2. **Июффе, Б.В.** Рефрактометрические методы в химии / Б.В. Ююффе // Л.: Химия, 1983. - 352 с.
3. **Чалых, А.Е.** Интерференционный микрометод исследования диффузии в системе полимер – растворитель / А.Е. Чалых, Р.М. Васенин // М. Научные труды МТИЛП, 1964. Т. 30. - С. 200-206.
4. **Хасбиуллин, Р.Р.** Микроинтерференция в исследовании взаимодиффузии в полимерных системах / Р.Р. Хасбиуллин, А.Е. Бухтеев// Структура и динамика молекулярных систем. -Казань: Изд-во Казанского гос. ун-та, 2004. В. XI. Ч. 1. - С. 81-86.
5. **Малкин, А.Я.** Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерения / А.Я. Малкин, А.Е. Чалых // М.: Химия, 1979. -303 с.
6. **Чалых, А.Е.** Диаграммы фазового состояния полимерных систем / А.Е. Чалых, В.К. Герасимов, Ю.Н. Михайлов // М.: Янус-К, 1998. -216 с.
7. **Abramov, A.** Laser interferometry for study of mutual diffusion in polymer–solvent system / A. Abramov, [and other] // Proc. SPIE, 2006. Vol.6165. P. 61650F-1-61650F-8.

8. **Абрамов, А.Ю.** Исследование процессов растворимости и диффузии полимера методом лазерной интерферометрии / А.Ю. Абрамов, В.П. Рябухо, А.Б. Шиповская // Журнал технической физики, 2007. Т. 77. В. 12. - С. 45-50.
9. Диффузия низкомолекулярных веществ в области стеклования полимеров / Ю.М. Михайлов [и др.] // Высокомолек. соед., 1999. Т.41 Б. №5. - С. 881-885.
10. **Чалых, А.Е.** Диффузия в эпоксидных олигомерах / А.Е. Чалых, О.Н. Шмалий, А.Е. Бухтеев // Высокомолек. соед., 2002. Т. 44 А. № 11. С. 1985-1991.
11. **Чалых, А.Е.** Диффузия в системах с жидкокристаллическим равновесием / А.Е. Чалых, В.К. Герасимов, Ф.А.Авгонова // Высокомолек. соед. 2001., Т. 43 А. № 7. С. 1134-1139.
12. **Ганжерли, Н.М.** Исследование массопереноса белков методом голографической интерферометрии реального времени / Н.М. Ганжерли, И.А. Маурер, П.В. Гранский // Журнал технической физики, 2004. Т. 74. В. 1. С. 68-71.
13. **Протасов, И.Г.** Применение метода оптической интерферометрии для определения диффузии и растворимости лекарственных препаратов в полимерах / И.Г. Протасов, А.Е. Чалых, Р.Р. Хасбиуллин // Тезисы IV Всерос. Каргинской конф. М.: изд-во МГУ, 2007. Т. 3. С. 207.
14. Исследование биодеградации полимера методом лазерной интерферометрии / А.Ю. Абрамов [и др.] // Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине 2007: Материалы ежегодной Всероссийской научной школы-семинара. Саратов.: Изд-во Саратов. ун-та, 2007. - С. 129-133.
15. Физические измерения в газовой динамике и при горении / под ред. Р.У. Ладенбурга, - М.: Иностранная Литература, 1957. 484 с.
16. **Коломийцов, Ю.В.** Интерферометры. Основы инженерной теории, применение / Ю.В. Коломийцов. - Л.: Машиностроение, 1976. - 296 с.
17. Оптический производственный контроль. / под ред. Д. Малакары, Пер с англ. - М.: Машиностроение, 1985. - 400 с.
18. **Борн, Э.** Основы оптики / Э. Борн, Э. Вольф. - М.: Наука, 1973. - 760 с.
19. **Скоков, И.В.** Многолучевые интерферометры в измерительной технике / И.В. Скоков. // -М.: Машиностроение, 1989. -256 с.
20. Голография. Методы и аппаратура / Под ред. В.М. Гинсбург и Б.М. Степанова. -М.: Сов. Радио, 1974. -376 с.
21. Голографическая интерферометрия фазовых объектов / А.К. Бекетова [и др.] - Л.: Наука, 1979. -232 с.
22. **Вест, Ч.** Голографическая интерферометрия; / Ч. Вест, пер. с англ.// - М.: Мир, 1982. -504 с.
23. **Зейликович, И.С.,** Голографическая диагностика прозрачных сред / И.С. Зейликович, Н.М. Спорник // Минск: Университетское, 1988. -208 с.
24. **Левин, Г.Г.** Оптическая томография / Г.Г. Левин, Г.Н. Вишняков // М.: Радио и связь, 1989. -224 с.
25. **Франсон, М.** Оптика спеклов. / М. Франсон, пер. с англ.// М.: Мир, 1980. -171 с.
26. **Малкович, Р.Ш.** Математика диффузии в полупроводниках / Р.Ш. Малкович // СПб.: Наука, 1999. -389 с.
27. **Шаповалов, С.Г.** Современные раневые покрытия в комбустиологии / С.Г. Шаповалов // ФАР Миндекс-Практик, 2005. В. 8. С. 38-46.
28. **Schnars, U.** Digital Holography / U. Schnars, W. Jueptner // Springer Berlin Heidelberg, 2005. -169 p.
29. **Журавлев, О.А.** Разработка автоматизированного метода исследования вибрационных характеристик энергоустановок / О.А. Журавлев [и др.] // Компьютерная Оптика, 2001. В. 21. -С. 143-149.
30. Автоматизированная виброметрия механических конструкций на основе помехоустойчивого цифрового спекл-интерферометра: лабораторный практикум / О.А. Журавлев [и др.]; под ред. В.П. Шорина Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. -124 с.

RESEARCH OF MUTUAL DIFFUSION PROCESSES IN THIN TRANSPARENT MEDIA BY METHODS OF LASER INTERFEROMETRY

A.Yu. Abramov¹, O.V. Dikov¹, V.P. Ryabukho^{1,2}, A.B. Shipovskaya¹

¹ Saratov State University, Saratov, Russia,

² Institute of Problems of the Precision Mechanics and Control of the Russian Academy of Science, Saratov, Russia

Abstract

Methods of laser interferometry and optical interferometers with digital system of registration of images for studying processes of mutual diffusion in systems polymer - solvent and low-molecular liquid I - low-molecular liquid II are considered. The description of the equipment and a technique of realization of experiments with use the Mach-Zehnder and Michelson interferometers, and multibeam micro interferometer is presented. Kinetics of spatial distribution of refraction index of a medium in mass transport process is determined; diffusion factors are calculated.

Key words: laser interferometry, optical interferometers, transparent media, mutual diffusion, mass transport, refraction index, diffusion factor.

Citation: Abramov AYu, Dikov OV, Ryabukho VP, Shipovskaya AB. Research of mutual diffusion processes in thin transparent media by methods of laser interferometry. *Computer Optics* 2008; 32(3): 253-64.

Acknowledgements: This work was partially supported by a grant of the President for the support of leading scientific-Schools of RF-NSH 208-2008.2 and grant-tion analytical departmental target program "Development of Scientific Potential of Higher Education (2006-2008)", project code RNP 2.1.1.4473.

References

- [1] Chalykh AE, Vasenin RM. Optical methods of diffusion study [In Russian]. Moscow, Proceedings of MTILI (Moscow Institute of Technology of Light Industry) 1964; 30: 192-199.
- [2] Ioffe BV. Refractometric methods of chemistry [In Russian]. Leningrad: Himia (Chemistry) Publisher 1983; 307 p.
- [3] Chalykh AE, Vasenin RM. Interference micromethod of diffusion investigation in the polymer-solvent system [In Russian]. Moscow: Proceedings of MTILI (Moscow Institute of Technology of Light Industry) 1964; 30: 200-206.
- [4] Khasbiullin RR, Bukhteev AE. Microinterference in studying microdiffusion in polymer systems [In Russian]. Structure and dynamics of molecular systems. Kazan: Kazan State University 2004; XI(1): 81-86.
- [5] Malkin AYa, Chalykh AE. Diffusion and viscosity of polymers [In Russian]. Moscow: Khimiya (Chemistry) Publisher 1979; 303 p.
- [6] Chalykh AE, Gerasimov VK, Mikhailov YuN. Phase state diagrams of polymer systems [In Russian]. Moscow: Janus-K 1998; 216 p.
- [7] Abramov A. Laser interferometry for study of mutual diffusion in polymer-solvent system. *Proc. SPIE* 2006; 6165: 61650F-1-61650F-8.
- [8] Abramov AYu, Ryabukho VP, Shipovskaya AB. Study of solubility processes and polymer diffusion by laser interferometry [In Russian]. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics* 2007; 77(12): 45-50.
- [9] Mikhailov YuM, et al. Diffusion of low-molecular substances in polymer glass-transition domains [In Russian]. *Polymer Science U.S.S.R.* 1999; 41 B(5): 881-885.
- [10] Chalykh AE, Shmalyi ON, Bukhteev AE. Diffusion in epoxy oligomers [In Russian]. *Polymer Science U.S.S.R.* 2002; 44 A(11): 1985-1991.
- [11] Chalykh AE, Gerasimov VK, Avgonova FA. Diffusion in equilibrium liquid crystalline systems [In Russian]. *Polymer Science U.S.S.R.* 2001; 43 A(7): 1134-1139.
- [12] Ganzherly NM, Maurer IA, Granskiy PV. Study of protein mass transfer using live fringes holographic interferometry [In Russian]. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics* 2004; 74(1): 68-71.
- [13] Protasov IG, Chalykh AE, Khasbiullin RR. Application of optical interferometry method for the determination of diffusion and solubility of medications in polymers [In Russian]. IV All-Russian Kargin Conference Abstracts. Moscow: Lomonosov Moscow State University Publisher 2007; 3: 207.
- [14] Abramov AYu, et al. Study of polymer biodegradation using laser interferometry. *Methods of Computerized Diagnostics in Biology and Medicine* 2007. Proceedings of annual All-Russian Scientific School-Seminar. Saratov: Saratov State University Publisher 2007; 129-133.
- [15] Ladenburg RW, ed. *Physical measurements in gas dynamics and combustion*. Moscow: Russian Studies in Literature 1957; 484 p.
- [16] Kolomiitsov YuV. *Interferometers. Fundamentals of Engineering Theory* [In Russian]. Leningrad: "Mashinostroenie" (Mechanical Engineering) Publisher 1976; 296 p.
- [17] Malacara D, ed. *Optical Shop Testing* [Russian translation]. Moscow: "Mashinostroenie" (Mechanical Engineering Industry) Publisher 1985; 400 p.
- [18] Born M, Wolf E. *Principles of Optics* [Russian translation]. Moscow: "Nauka" (Science) Publisher 1973; 760 p.
- [19] Skokov IV. *Multibeam interferometers in measuring equipment* [In Russian]. Moscow: "Mashinostroenie" (Mechanical Engineering) Publisher 1989; 256 p.
- [20] Ginsburg VM, Stepanov BM, eds. *Holography. Methods and Instruments* [In Russian]. Moscow: Sov Radio 1974; 376 p.

- [21] Beketova AK, Belozarov AF, Berezkin AN, Zeilikovich IS, Mustafina LT, Razumovskaia AI, Spornik NM, Chernykh VT. Holographic interferometry of phase objects [In Russian]. Leningrad: "Nauka" (Science) Publisher 1979; 232 p.
- [22] West Ch. Holographic Interferometry [Russian translation]. Moscow: "Mir" Publisher 1982; 504 p.
- [23] Zeilekovich IS, Spornik NM. Holographic diagnostics of transparent media [In Russian]. Minsk: "Universitetskoye" (University) Publisher 1988; 208 p.
- [24] Levin GG, Vishnyakov GN. Optical tomography [In Russian]. Moscow: "Radio i svyaz' " Publisher 1989; 224 p.
- [25] Franson M. Speckle optics [Russian translation]. Moscow: "Mir" Publisher 1980; 171 p.
- [26] Malkovich RSh. Mathematics of diffusion in semiconductors [In Russian]. St.Petersburg: "Nauka" (Science) Publisher 1999; 389 p.
- [27] Shapovalov SG. Modern wound dressings in combustiology [In Russian]. PHARMindexPractic 2005; 8: 38-46.
- [28] Schnars U, Jueptner W. Digital Holography. Springer Berlin Heidelberg, 2005; 169 p.
- [29] Zhuravlyov OA, Komarov SYu, Popov KN, Prokofev AB. Development of a computer-aided technique for power-plant vibration characteristics study [In Russian]. Computer Optics 2001; 21: 143-149.
- [30] Zhuravlyov OA, Ivchenko AV, Komarov SYu, Shaposhnikov YuN, Shcheglov YuD. Edited by Shorin VP. Computer-aided vibrometry of mechanical structures based on noise-free digital speckle-interferometer: laboratory course [In Russian]. Samara: Samara State Aerospace University 2007; 124 p.