

03;07;12

Динамооптический эффект в гомогенных ньютоновских жидкостях

© С.В. Стебновский

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: root@hydro.nsc.ru

(Поступило в Редакцию 15 марта 2002 г.)

Экспериментально установлено, что гомогенные полярные жидкости (вода, глицерин, этиловый спирт и др.) в зоне сдвигового деформирования приобретают оптическую анизотропию, а следовательно, и анизотропию диэлектрической проницаемости, являющуюся макроскопической характеристикой структуры жидкости. Полученные результаты указывают на наличие у полярных жидкостей в состоянии покоя признаков упорядоченности структуры, которая легко разрушается при слабых сдвиговых нагрузках, а затем за несколько часов (в зависимости от температуры жидкости) релаксирует к первоначальному состоянию.

Введение

Целесообразность проведенных в данной работе исследований обусловлена следующим обстоятельством. Ранее в работах [1–3], выполненных в рамках исследования проблемы устойчивости структуры жидкодисперсных сред в силовых полях произвольной интенсивности, была установлена неравновесность дисперсных систем (эмульсий, суспензий) в случае, когда в системах отсутствуют градиентные температурные или концентрационные поля и системы изолированы от влияния внешних силовых полей (в том числе гравитационного). Показано, что если исходные расстояния между дисперсными элементами порядка их размеров, то независимо от масштаба системы происходит взаимное сближение частиц до полного их контакта (размеры частиц 0.1–1 см, характерная скорость сближения $\sim 10^{-4}$ см/с). При этом установлено, что закон взаимодействия частиц такой же, как и в классической задаче теории упругости о взаимодействии двух сферических полостей в нагруженном упругом пространстве. Отсюда можно предположить, что взаимное сближение дисперсных элементов обусловлено наличием слабой структурной прочности (сдвиговой упругости) жидкой матрицы при очень слабом и медленном ее деформировании. Последний аргумент подтверждается результатом экспериментальных исследований [4], где установлено, что при низких скоростях сдвиговой деформации вода ведет себя как среда, обладающая модулем сдвига порядка 10^{-6} Па. (В опытах производилась медленная закрутка цилиндрического водяного объема вокруг его оси симметрии в цилиндрическом сосуде; жидкий объем некоторое время вращался по инерции, а затем совершал слабые упругие крутильные затухающие колебания, что указывало на наличие у воды признаков сдвиговой прочности).

Поскольку речь идет об одном из фундаментальных свойств жидкости: наличии у нее в квазистационарном состоянии, хотя и очень слабой, но все же не нулевой структурной прочности, то представляется целесообразным провести исследование признаков упорядоченности структуры жидкостей с помощью какого-то другого

экспериментального метода, отличного от [4]. Решению этой задачи и посвящена настоящая работа.

Обоснование метода исследования

Известно [5,6], что диэлектрическая проницаемость конденсированной среды является макроскопической характеристикой ее молекулярной структуры. Вследствие этого, если среда обладает упорядоченной структурой ее изменение при воздействии механической нагрузки должно проявляться через изменение (по крайней мере локальное) диэлектрической проницаемости ϵ . Поскольку показатель преломления света в прозрачной среде связан с диэлектрической проницаемостью выражением $n = \epsilon^{1/2}$, то упругие деформации через изменение тензора ϵ_{ik} должны оказывать влияние на оптические свойства структурированных прозрачных сред: в результате деформирования оптически изотропное тело становится анизотропным. На использовании этого эффекта основан метод фотоупругости, который нашел широкое применение при исследовании характера распределения упругих напряжений в деформируемом прозрачном твердом теле. Наряду с этим оптическая анизотропия возникает и в движущихся неньютоновских жидких средах — суспензиях и коллоидных растворах с несферическими по форме частицами, если поток среды обладает градиентом скорости [7]. В этом случае в области течения с градиентом скорости вследствие сдвигового деформирования среды изменяется ориентация несферических дисперсных элементов, что приводит к нарушению структуры среды, а следовательно к изменению ϵ , и в результате этого — показателя преломления, т.е. оптической изотропности среды. Такое явление называется динамооптическим эффектом, или эффектом Максвелла.

Возникает вопрос, обладают ли динамооптическим эффектом гомогенные ньютоновские жидкости. Ответ на этот вопрос позволит получить важную информацию о структурных особенностях жидких сред. Действительно, если исследуемая жидкость имеет упорядоченную структуру, то ее диэлектрическая проницаемость [8] $\epsilon = 1 + 4\pi Np$ (N — число молекул или их групп в

единице объема; p — коэффициент поляризуемости, характеризующий строение молекул или их групп, если молекулы образуют агрегатные соединения) изменится при макроскопическом сдвиговом деформировании, а следовательно, изменится в зоне деформирования и значение n .

Постановка эксперимента и его результаты

1. В настоящей работе экспериментально исследуется наличие динамооптического эффекта у гомогенных ньютоновских жидкостей, обладающих различной степенью поляризуемости молекул. Для проведения экспериментов использовалась установка, схема которой приведена на рис. 1. Здесь 1 — прозрачный термостатированный сосуд $6 \times 8 \times 3.5$ см, заполненный исследуемой жидкостью 2; вибратор — стержень 3 с закрепленными на нем пластинами 4, которые приводятся в вибрирующий режим соленоидом 5. Оптическая неоднородность жидкости регистрируется с помощью теневой установки (Schlieren-Aufnahmegegerat-80) 6 и цифровой видеокамеры (CCD-TR780E) 7.

Опыты проводились на следующих жидкостях: L1 — трансформаторное масло (диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 2.3$, сдвиговая вязкость $\mu = 0.16$ Па·с при $T = 17^\circ\text{C}$); L2 — глицерин ($\epsilon = 42.4$, $\mu = 1.48$ Па·с, $T = 18^\circ\text{C}$); L3 — эпоксидная смола ЭД-20 ($\epsilon = 3.7$, $\mu = 28$ Па·с, $T = 17^\circ\text{C}$); L4 — вода дистиллированная ($\epsilon = 81$, $\mu = 10^{-3}$ Па·с, $T = 17^\circ\text{C}$); L5 — этиловый спирт ($\epsilon = 25.7$, $\mu = 1.3 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $T = 17^\circ\text{C}$); L6 — фреон-10 ($\epsilon = 2.23$, $\mu = 0.97 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $T = 16^\circ\text{C}$).

При включении вибратора 5 в окрестности кромок пластин 4 в жидкой среде 2 формируется трехмерное течение с градиентом скорости (частота вибратора ω и амплитуда колебания пластинок δ варьируются). Если в градиентном потоке жидкости образуются зоны

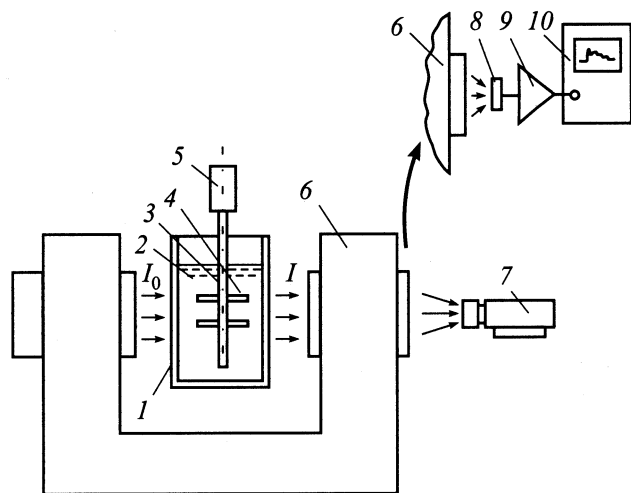


Рис. 1. Схема эксперимента по исследованию динамооптического эффекта в жидкости.

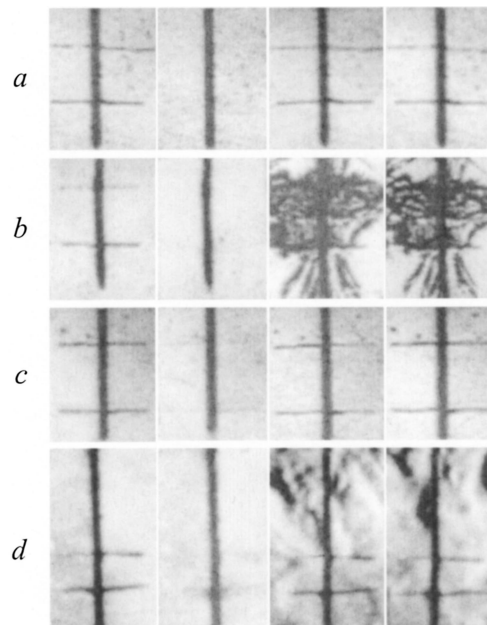


Рис. 2. Видеogramмы поведения структуры жидких сред в процессе сдвигового деформирования: a — трансформаторное масло, b — глицерин, c — эпоксидная смола, d — вода.

с оптической анизотропией (свилей), то с помощью теневой установки 6, работающей по схеме Теплера, этот процесс регистрируется на видеокамеру 7.

На рис. 2 приведены видеogramмы исследуемого процесса при условиях: $\omega = 60.5$ Hz, $\delta \approx 0.1-0.2$ см, $T = 17^\circ\text{C}$, продолжительность работы вибратора $\Delta t = 5$ с. На рис. 2: a — среда L1, b — L2, c — L3, d — L4. Первый кадр на каждой видеogramме фиксирует состояние покоящейся среды до начала работы вибратора; второй кадр соответствует началу работы вибратора, возбуждающего в жидкости трехмерное течение с градиентами скорости, и началу отсчета времени $t = 0$; третий кадр соответствует состоянию среды через 3 с после начала работы вибратора; четвертый кадр — состоянию среды в момент остановки вибратора ($t = \Delta t$).

Анализ видеogramм позволяет сделать следующие выводы. В случае среды L1 формирование течения с градиентным полем скоростей не приводит к видимому нарушению оптической изотропности жидкости (динамооптическому явлению): образование в среде свилей — неоднородностей поля значений показателя преломления n , а следовательно, и ϵ не наблюдается (рис. 2, a). В среде L2 (рис. 2, b) в градиентном потоке образуются зоны с высоким уровнем оптической анизотропии; при этом „заживление“ видимых свилей при $T = 17^\circ\text{C}$, $\Delta t = 5$ с происходит через 15–16 h. В среде L3 (рис. 2, c) в процессе формирования градиентного потока образования видимых свилей не наблюдается. В среде L4 (рис. 2, d) в зоне градиентного течения формируются области оптической неоднородности, которые вследствие очень малой вязкости жидкости уносятся потоком в

направлении свободной поверхности жидкого объема (такой характер течения обусловлен влиянием жесткого дна сосуда 1). Видимое „заживление“ оптических неоднородностей в среде L4 происходит через 3–4 с после их образования. В среде L5 также наблюдается динамооптический эффект; в среде L6 свили не наблюдаются. Все опыты проводились при фиксированной чувствительности теневой установки к оптическим неоднородностям исследуемых жидкостей.

Из полученных результатов следует, что формирование зоны с видимой оптической анизотропией происходит в жидкостях с высоким уровнем диэлектрической проницаемости и не зависит от вязкости: у высоковязкой жидкости L1 $\varepsilon = 3.2$ и свили отсутствуют, у высоковязкой жидкости L2 $\varepsilon = 42.4$ и свили наблюдаются, у высоковязкой жидкости L3 $\varepsilon = 3.7$, свили отсутствуют, у маловязкой жидкости L4 $\varepsilon = 81$, свили наблюдаются, у маловязкой жидкости L5 $\varepsilon = 25.7$, свили наблюдаются, у маловязкой жидкости L6 $\varepsilon = 2.3$, свили отсутствуют. (Следует отметить, что в средах с низким уровнем ε некоторое нарушение оптической однородности в зоне градиентного течения, по-видимому, имеет место, но этот эффект незначителен и находится за пределом чувствительности теневой установки б). Поскольку ε является макроскопической характеристикой молекулярной структуры среды, то можно считать, что в зонах, где под действием сдвигового течения возникает оптическая неоднородность, а следовательно, в соответствии с $\varepsilon = n^2$ и неоднородностью поля диэлектрической проницаемости в среде происходит изменение структуры. Таким образом, жидкости L2, L4 и L5 в состоянии покоя обладают упорядоченной структурой, которая затем нарушается в поле градиентного течения.

Из проведенной серии опытов следует, что, если продолжительность работы вибратора в водяном образце увеличить до $\widetilde{\Delta t} = 15\text{--}20$ с, образование свилей в градиентном потоке прекращается. При этом если вибратор, проработавший 15–20 с, выключить, а затем после временной паузы Δt^* снова включить, повторно формируя в воде сдвиговое нагружение, то при $\Delta t^* < 15\text{--}25$ min динамооптический эффект не наблюдается. С увеличением Δt^* начинается слабое образование свилей, и лишь при $\Delta t^* > 2\text{--}3$ h (в зависимости от температуры жидкости) динамооптический эффект полностью восстанавливается: в градиентном потоке формируются зоны с оптической анизотропией (свилами) такой же интенсивности, как и при первоначальном включении вибратора. Отсюда можно предположить, что вода при сдвиговом нагружении из состояния покоя обладает свойством тиксотропности, т.е. упорядоченность структуры в состоянии покоя, которая нарушается в поле слабых сдвиговых нагрузок, а затем через некоторое время ($\Delta t^{**} \simeq 2\text{--}3$ h) снова восстанавливается.

Время восстановления динамооптического эффекта Δt^{**} в глицерине составляет несколько суток (значение Δt^{**} существенно зависит от температуры и для точной его оценки необходим термостат, способный в

течение нескольких суток поддерживать температуру жидкости постоянной).

Как уже отмечалось, время „заживления“ свилей в глицерине (при $T = 15\text{--}17^\circ\text{C}$) порядка 15–16 h, в то время как у воды и этилового спирта продолжительность этого процесса не превышает 4–5 с. Таким образом, если интенсивность свилей определяется уровнем диэлектрической проницаемости жидкости, то время восстановления ее структуры зависит от вязкости.

2. В рамках проведенных в данной работе экспериментальных исследований рассматривалось также изменение во времени суммарного светового потока $I(t)$, прошедшего через водяной образец, подвергнутый вибрационному воздействию. Основная идея этих опытов заключается в следующем. Ослабление монохроматического светового потока в оптически прозрачной гомогенной жидкости определяется в первом приближении законом Бугера–Ламберта–Бера $I = I_0 \exp(-\beta_\lambda l)$, где $\beta_\lambda = \alpha_\lambda + \xi_\lambda$ — показатель ослабления светового потока от уровня I_0 до I слоем жидкости толщиной l ; α_λ — показатель поглощения света жидкостью; ξ_λ — показатель рассеяния света; λ — длина волны монохроматического светового потока (в опытах использовался монохроматический световой поток $\lambda = 540$ nm). Поскольку значение α_λ у прозрачных жидкостей очень мало, то можно полагать, что $\beta_\lambda \simeq \xi_\lambda$. Известно [8], что молекулярное рассеяние света чистой без примесей жидкостью определяется коллективным характером флуктуаций показателя преломления n , т.е. с учетом того, что $n = \varepsilon^{1/2}$ — флуктуациями значений ε . Это согласуется с формулой Эйнштейна

$$I = I_0 \frac{\pi^2}{2\lambda^4 x^2} V^* V (\overline{\Delta \varepsilon})^2 (1 + \cos^2 \Theta),$$

согласно которой интенсивность рассеяния светового потока под углом Θ к его направлению пропорционально $(\overline{\Delta \varepsilon})^2$. Здесь $\Delta \varepsilon$ — флуктуация диэлектрической проницаемости в объеме V^* , размеры которого малы по сравнению с λ , но в объеме содержится много молекул; x — расстояние от рассеивающего объема V до точки наблюдения. Таким образом, показатель рассеяния света в жидкой среде тем меньше, чем однороднее ее структура. Например, если бы структура среды представляла собой идеально однородное распределение молекул по объему так, чтобы во всем объеме ε принимало одинаковое значение, т.е. отсутствовала его флуктуация ($\Delta \varepsilon \rightarrow 0$), то в этом случае показатель рассеяния света устремлялся бы к нулевому значению. Другими словами, у жидкости с однородной структурой показатель рассеяния света должен быть ниже и соответственно ослабление света этой средой меньше, чем у жидкости, состоящей из образованных полярными молекулами агрегатов и других упорядоченных мезоструктур.

Для регистрации уровня светового потока $I(t)$ после его прохождения через исследуемый водяной образец вместо видеокамеры 7 (рис. 1) на выходе теневой установки б помещался фотодиод 8, с которого сигнал

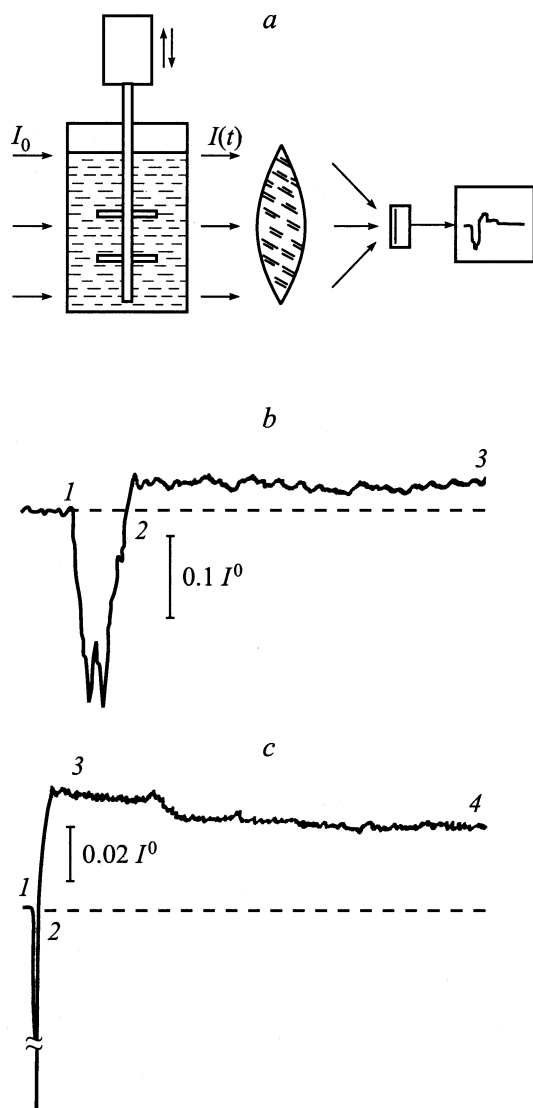


Рис. 3. Регистрация изменения уровня светового потока после его прохождения через водяной образец, подвергнутый сдвиговому нагружению. *a* — схема регистрации светового потока $I(t) = I^0 + \Delta I(t)$; *b* — осциллограмма изменения уровня светового потока $\Delta I(t)$ на начальной стадии исследуемого процесса при длительности развертки осциллографа $t_p = 1 \text{ min}$; *c* — осциллограмма $\Delta I(t)$ при $t_p = 6.6 \text{ min}$.

(соответствующий интенсивности светового потока $I(t)$ после усилителя 9 регистрировался осциллографом (С9-16) I_0 , работающим в низкочастотном режиме. На рис. 3 приведены осциллограммы, соответствующие изменению уровня светового потока $I(t) = I^0 + \Delta I(t)$ на выходе водяного образца, структура которого нарушается вследствие вибрационного нагружения (при $T = 17^\circ\text{C}$). Здесь I^0 — исходный уровень светового потока на выходе водяного образца до его нагружения; $\Delta I(t)$ — изменение уровня светового потока, соответствующее изменению характера рассеяния света в нагружаемом образце. На обеих осциллограммах нулевой уровень луча осциллографа соответствует постоянной

составляющей светового потока I^0 ; отклонение луча вниз на участках осциллограмм 1–2 соответствует формированию свилей в водяном образце (вследствие возбуждения вибратором градиентных потоков), т.е. более интенсивному рассеянию на них света; участки осциллограмм 2–3 на рис. 3, *b* и 2–4 на рис. 3, *c* соответствуют „просветлению“ образца после разрушения упорядоченных мезоструктур и соответственно уменьшения показателя рассеяния света в более однородной по структуре жидкости. Уровень $\Delta I(t)$ медленно снижается, стремясь к нулевому значению за время $\Delta t^{**} \simeq 2.5 \text{ h}$. Отсюда следует, что структурные характеристики воды полностью восстанавливаются за время Δt^{**} , которое должно зависеть от температуры T , частоты ω и амплитуды колебания пластинок вибратора δ , т.е. от интенсивности возбуждаемого в жидкости градиентного течения, влияющего на степень разрушения ее структуры (определение этих зависимостей является предметом отдельных исследований). Установлено, что динамооптический эффект в воде проявляется при температуре ниже $18.5\text{--}18.6^\circ\text{C}$, а при $T \geq 19^\circ\text{C}$ эффект практически полностью отсутствует, т.е. отсутствует упорядоченность структуры воды.

Заключение

Серия экспериментов, проведенных с помощью специально разработанной методики, принципиально отличной от методики, использованной в работе [4], позволила установить наличие у гомогенных полярных жидкостей динамооптического эффекта: эти жидкости в состоянии покоя обладают по крайней мере высокой степенью упорядоченности структуры, что согласуется с результатами работ [1–4]. На примере воды (представляющей наибольший интерес, связанный с ее ролью в биохимических и биофизических процессах) показано, что после интенсивного разрушения структуры жидкости происходит ее восстановление в течение нескольких часов (точное время релаксации зависит от температуры жидкости).

Список литературы

- [1] Стебновский С.В. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 10. С. 2177–2179.
- [2] Стебновский С.В. // ПМТФ. 1999. Т. 40. № 3. С. 53–58.
- [3] Стебновский С.В. // ПМТФ. 1999. Т. 40. № 4. С. 156–161.
- [4] Апакашев Р.А., Павлов В.В. // Изв. РАН. МЖГ. 1997. № 1. С. 3–7.
- [5] Debye P. Polare Molekeln. Leipzig: Verlag von S. Hirzel, 1929. S. 123.
- [6] Wolf K.L. Theoretische Chemie. Leipzig: J.A. Barth Verlag, 1943. S. 374.
- [7] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Физматгиз, 1959. С. 532.
- [8] Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976. С. 926.