

03

## Светорассеяние в воде и водных растворах, находящихся под действием слабого магнитного поля

© Л.А. Булавин, Л.Ю. Вэргун, Ю.Ф. Забашта, О.С. Свечникова, Е.О. Огородник

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, физический факультет, 01601 Киев, Украина

e-mail: verlen73@ukr.net

Поступила в редакцию 19.09.2018 г.

В окончательной редакции 01.02.2019 г.

Принята к публикации 05.02.2019 г.

Исследовано светорассеяние в воде и водных растворах NaCl и глюкозы, находящихся под действием магнитного поля с индукцией 0.43 мТ. Установлено, что магнитное поле не влияет на светорассеяние в воде и водном растворе NaCl. Для водного раствора глюкозы включение поля приводит к возникновению больших флуктуаций интенсивности рассеяния. Показано, что эти флуктуации обусловлены турбулизацией раствора, которая вызвана магнитным полем.

DOI: 10.21883/OS.2019.06.47763.277-18

### Введение

Влияние магнитного поля на свойства воды и водных растворов исследовалось в многочисленных работах с использованием различных методов (см., например, [1–4]). Авторам не удалось обнаружить в литературе работ, в которых для этой цели использовался метод светорассеяния.

### Эксперимент

Методика эксперимента детально изложена в нашей работе [5]. Результаты эксперимента представлены на рисунке.

Магнитное поле включалось через 30 min после начала измерений (*a*). Магнитная индукция составляла 0.43 мТ. Измерения проведены при температуре 293 К. Погрешность величины  $\xi$  составляла 5%.

Как видно из рисунка, магнитное поле не влияет на светорассеяние в воде (*b*) и растворе NaCl (*c*) — после включения поля флуктуации относительной интенсивности светорассеяния остаются такими же, как и до включения, не превышая погрешности изменений.

Для водного раствора глюкозы (*d*) включение магнитного поля приводит к появлению больших флуктуаций, существенно превышающих погрешность измерений.

Характерно, что пока действует магнитное поле эти флуктуации не затухают. В дополнение к эксперименту, результаты которого представлены на рисунке, нами был выполнен эксперимент, в котором измерения интенсивности светорассеяния в водном растворе глюкозы, находящемся под действием магнитного поля, производились в течение 12 h. Признаков затухания обнаружено не было.

### Обсуждение результатов эксперимента

Основным результатом проведенного эксперимента следует считать обнаружение того факта, что в растворе глюкозы, находящемся в слабом магнитном поле, возникают большие незатухающие флуктуации интенсивности.

Возможность возникновения таких флуктуаций вытекает уже из общих термодинамических соображений. Действительно, и интенсивность светорассеяния  $I$ , и магнитную индукцию  $B$  можно рассматривать как параметры, характеризующие внешнее воздействие и отклик системы на это воздействие. Обозначим их значения в некотором исходном состоянии через  $B_0$  и  $I_0$ . Пусть, как это происходит в нашем случае, в некоторый нулевой момент времени значение магнитной индукции скачком становится равным  $B$ . При этом в отношении величины  $I$  термодинамика предусматривает две возможности.

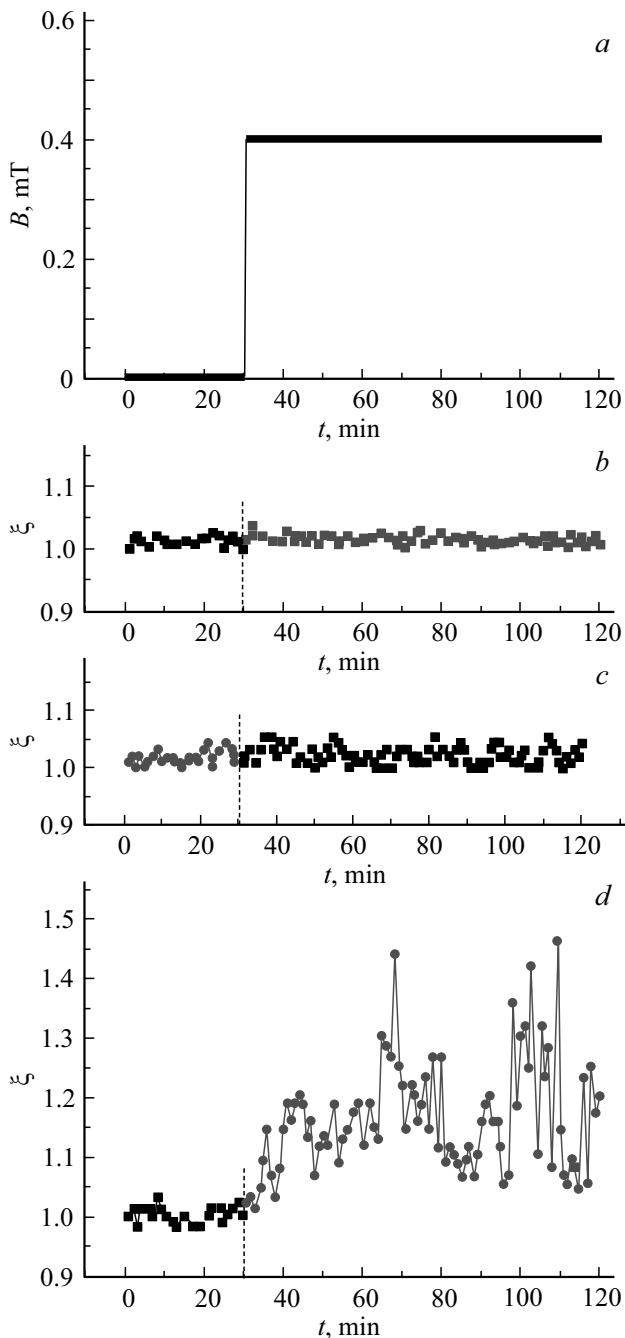
Первая возможность реализуется в рамках линейной термодинамики — система в течение некоторого времени переходит в новое равновесное состояние, характеризующееся некоторым значением  $I_1$ .

Вторая возможность появляется, когда применение линейной термодинамики становится некорректным и вступает в силу нелинейная термодинамика.

В этом случае вместо перехода в новое равновесное состояние в системе может возникнуть автоколебательный процесс (см., например, [6]), который именуется также предельным циклом временной диссипативной структуры.

Со временем образовавшийся предельный цикл теряет устойчивость, что приводит к появлению большого числа колебаний с разными частотами — процесс становится турбулентным [7]. Происходит турбулизация системы.

Как известно (см., например, [6]), автоколебания обладают двумя характерными свойствами: они возбуждаются неперiodическим источником и являются незату-



Влияние магнитного поля на светорассеяние: (a) — временная зависимость приложенного магнитного поля, (b) — временные зависимости относительной интенсивности светорассеяния для воды (бидистиллята), (c) — водного раствора NaCl с концентрацией 0.9%, (d) — водного раствора глюкозы с концентрацией 5%.  $t$  — время ( $t = 0$  — момент времени, соответствующий началу измерений),  $B$  — индукция приложенного магнитного поля,  $\xi = I/I_0$  — относительная интенсивность рассеяния, где  $I$  и  $I_0$  — интенсивности рассеяния в момент  $t$  и  $t = 0$ ).

хающими, используя для своего поддержания энергию источника.

Именно эти свойства характерны и для обнаруженных нами больших флуктуаций интенсивности: они возника-

ют вследствие действия постоянного магнитного поля и являются незатухающими. Указанное обстоятельство позволяет считать, что наблюдаемые большие флуктуации представляют собой турбулентный процесс, возникающий по сценарию, описанному в [7].

Как известно, светорассеяние обусловлено флуктуациями диэлектрической проницаемости. Причиной последних является движение структурных элементов, входящих в состав системы. В отсутствие магнитного поля — это тепловые движения молекул.

Возникновение под действием магнитного поля флуктуаций интенсивности светорассеяния означает, что такое поле вызывает движение структурных элементов дополнительно к тепловому.

Наблюдаемый в эксперименте турбулентный характер больших флуктуаций является следствием того, что указанное движение является турбулентным — под действием магнитного поля происходит турбулизация жидкости.

Логично при этом задаться вопросом, почему указанные флуктуации наблюдаются для водного раствора глюкозы, но отсутствуют для воды и водного раствора NaCl. Ответ на этот вопрос, по крайней мере, на качественном уровне можно получить, оставаясь по-прежнему в рамках термодинамики, в которой, как известно, вещество рассматривается как некоторый континуум. Поэтому при изучении влияния магнитного поля на систему последнюю можно представить как поле  $\chi(\mathbf{r})$  магнитной восприимчивости. По своему смыслу локальная магнитная восприимчивость  $\chi(\mathbf{r})$  — это магнитная восприимчивость бесконечно малого объема  $d\mathbf{r}$ , который является окрестностью точки с радиусом-вектором  $\mathbf{r}$ .

В общем случае для вещества характерна локальная анизотропия, соответственно  $\chi(\mathbf{r})$  является тензором.

Обозначим через  $\mathbf{H}$  напряженность магнитного поля. Это поле создает в точке  $\mathbf{r}$  намагниченность, которая определяется формулой (см., например, [8])

$$\mathbf{P} = \chi \bullet \mathbf{H}. \quad (1)$$

При этом возникает механический момент  $\mathbf{m}$ , действующий на единицу объема окрестности точки  $\mathbf{r}$ , равный

$$\mathbf{m} = \mathbf{P} \times \mathbf{H}. \quad (2)$$

После подстановки равенства (1) в формулу (2) имеем

$$\mathbf{m} = (\chi \bullet \mathbf{H}) \times \mathbf{H}. \quad (3)$$

На участок с объемом  $d\mathbf{r}$  действует момент  $\mathbf{m}d\mathbf{r}$ . Он приводит в движение этот участок, который в континуальной модели вещества играет роль структурного элемента.

В случае, когда  $\chi$  является скаляром, формула (3) приобретает вид

$$\mathbf{m} = \chi \mathbf{H} \times \mathbf{H}, \quad (4)$$

и, поскольку  $\mathbf{H} \times \mathbf{H} = 0$ , приходим к выводу, что в этом случае  $\mathbf{m} = 0$ .

Таким образом, в случае, когда система обладает локальной изотропией, магнитное поле не в состоянии вызвать движение структурных элементов системы. Естественно поэтому предположить, что магнитное поле не вызывает больших флуктуаций интенсивности светорассеяния в воде и водном растворе NaCl в отличие от локально анизотропного водного раствора глюкозы.

Предположение о локальной анизотропии водного раствора глюкозы может быть подкреплено следующими соображениями. Очевидно, что математический бесконечно малый объем  $d\mathbf{r}$  континуальной теории является некоторой идеализацией. В действительности этот участок имеет некоторый конечный размер  $l$ . Его принято называть физическим бесконечно малым объемом (см., например, [7]). Это участок, в котором устанавливается локальное равновесие. Именно по этой причине мы получаем возможность характеризовать его макроскопическими параметрами, к которым относится локальная магнитная восприимчивость.

Установление локального равновесия сопровождается локальным упорядочением. При этом плоская форма глюкозных колец способствует образованию структуры, в которой упомянутые плоскости стремятся расположиться параллельно друг другу. В такой структуре свойства в направлениях, перпендикулярном и параллельном указанным плоскостям, естественно, оказываются разными.

Как уже упоминалось, возникновение больших флуктуаций интенсивности светорассеяния означает, что отклонение системы от исходного состояния под действием магнитного поля оказалось значительным — таким, что линейная термодинамика уже не в состоянии описать такое отклонение. Между тем магнитное поле достаточно слабое, и главное: исследуемая система (водный раствор глюкозы) — диамагнетик, так что магнитная восприимчивость  $\chi$  чрезвычайно мала. Соответственно малыми оказываются и механические моменты, действующие со стороны магнитного поля на структурные элементы системы.

Такие моменты, казалось бы, не в состоянии изменить взаимное расположение структурных элементов. И тем не менее, как показывает проведенный эксперимент, такие изменения в упомянутой системе могут происходить.

Можно дать этому факту следующее объяснение: как уже упоминалось, на математически бесконечно малый объем действует момент  $d\mathbf{r}$ . Фактически речь идет о моменте

$$\mathbf{M} = \mathbf{m}, \quad (5)$$

приложенном в точке  $\mathbf{r} \equiv (x_1, x_2, x_3)$ . Этот момент создает в окружающей среде поле упругих смещений  $\mathbf{u} \equiv (u_1, u_2, u_3)$ .

Пусть указанный момент приложен в начале координат и направлен вдоль оси  $x_3$ . Такой момент вызывает вращение в плоскости  $(0x_1x_2)$ , чему соответствуют, как

это показано в [9], компоненты вектора смещения  $\mathbf{u}$ , определяемые формулой

$$u_1 = -\frac{M}{8\pi G} \frac{x_2}{R^3}, \quad (6)$$

$$u_2 = \frac{M}{8\pi G} \frac{x_1}{R^3}, \quad (7)$$

$$u_3 = 0, \quad (8)$$

где  $R$  — расстояние от начала координат до точки, в которой определяются смещения,  $G$  — модуль сдвига.

С учетом равенства (5) формулы (6) и (7) приобретают вид

$$u_1 = -\frac{1}{8\pi} \frac{m}{G} \frac{3}{R^3} x_2, \quad (9)$$

$$u_2 = \frac{1}{8\pi} \frac{m}{G} \frac{3}{R^3} x_1. \quad (10)$$

Решающим аргументом в проводимом объяснении является малость модуля сдвига для жидкости: несмотря на малое значение  $m$ , отношение  $\frac{m}{G}$  оказывается уже не малым, что обеспечивает заметное значение вращательного смещения  $\mathbf{u} \equiv (u_1, u_2, u_3)$ .

Из формул (6)–(10) следует, что автоколебания, о которых речь шла ранее, представляют собой крутильные колебания. Именно по отношению к этому типу движения оказывается неустойчивой исследуемая система. В отсутствие магнитного поля крутильные колебания в принципе также могут возбуждаться как одна из составляющих теплового движения. Однако в этом случае указанные колебания быстро затухают. И только при возбуждении крутильных колебаний магнитным полем, которое обеспечивает их постоянную подпитку, становится возможным возникновение крутильных автоколебаний, что в дальнейшем приводит к потере системой устойчивости и ее турбулизации.

## Выводы

Результаты эксперимента, изложенные в настоящей работе, позволяют утверждать, что при некоторых условиях действия слабого, порядка десятых долей мТ, магнитного поля приводит к турбулизации жидкостной системы. Возникновение турбулентности сопровождается большими флуктуациями интенсивности светорассеяния. Турбулизация вызвана неустойчивостью системы по отношению к движению структурных элементов — крутильных колебаний, вызванных магнитным полем.

## Список литературы

- [1] Božić M., Crepinsek Lipus L., Kokol V. // *Croatica Chemica Acta CCASAA*. 2008. V. 81. N 3. P. 413.
- [2] Schenck J.F. // *J. Magnetic Resonance Imaging*. 2000. N 12. P. 2.
- [3] Horikoshi S., Sumi T., Serpone N. // *J. Microwave Power and Electromagnetic Energy*. 2012. V. 46. N 4. P. 215.

- [4] *Ерин К.В.* // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 9. С. 94.
- [5] *Bulavin L.A., Vergun L.Yu., Zabashta Yu.F., Ogorodnik K.O.* // Ukr. J. Phys. 2016. V. 61. N 7. P. 583.
- [6] *Климонтович Ю.Л.* Статистическая физика. М.: Наука, 1982. 608 с.
- [7] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 736 с.
- [8] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 621 с.
- [9] *Кеч В., Теодореску П.* Введение в теорию обобщенных функций с приложениями в технике. М.: Мир, 1978. 520 с.