

PACS numbers: 66.20.Ej, 68.03.Cd, 83.60.Np, 83.85.Jn, 87.15.N-, 87.50.-a, 87.85.gf

Влияние слабого электромагнитного излучения на конформационные характеристики молекулы NADH

Ю. М. Барабаш, М. А. Заболотный*, Э. Л. Мартынчук**,
В. Н. Соколов***, Л. Н. Киркилевская****, О. П. Дмитренко*,
Н. П. Кулиш*, Ю. И. Прилуцкий*, О. Я. Иванов*, М. Ю. Барабаш**

*Институт физики НАН Украины,
просп. Науки, 46,
03650 Киев, Украина*

**Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
ул. Владимирская, 64,
01601 Киев, Украина*

***Технический центр НАН Украины,
ул. Покровская, 13,
04070 Киев, Украина*

****Университет «Киево-Могилянская Академия»,
ул. Сковороды, 2,
04070 Киев, Украина*

*****Киевский медицинский институт УАНМ,
ул. Толстого, 6,
01601 Киев, Украина*

Експериментально досліджено вплив електромагнетного випромінення оптичного і міліметрового діапазона на в'язкість і коефіцієнт поверхностного натяження водного розчину NADH. Вимірювання параметрів розчинів проводились з допомогою вимірювання і аналізу спектрів капілярних хвиль на вільній поверхні. Встановлено, що в разі впливу електромагнетного випромінення потужністю 10^{-4} Вт/см², частотою 60 ГГц, тривалістю 20 хв на бидистиллят води спостерігається збільшення значень в'язкості і поверхностного натяження. При такому ж впливі на водний розчин NADH відбувається зменшення значень в'язкості і поверхностного натяження. Величина змін значень в'язкості і поверхностного натяження розчинів залежить від просторової частоти капілярних хвиль. Робиться висновок про можливу зміну конформації молекул NADH, що знаходяться в водному розчині, під впливом випромінення слабкої інтенсивності. В разі 3–5% концентрації NADH зміна в'язкості розчину досягала 10–15%.

Експериментально досліджено вплив електромагнетного випромінення

оптичного і міліметрового діапазону на в'язкість і коефіцієнт поверхневого натягу водного розчину NADH. Міряння параметрів розчинів виконувалося за допомогою міряння й аналізу спектрів капілярних хвиль на вільній поверхні. Встановлено, що у випадку впливу електромагнетного випромінення потужністю 10^{-4} Вт/см², частотою 60 ГГц, тривалістю 20 хв. на бідистиллят води спостерігається збільшення значення в'язкості і поверхневого натягу. За такої ж дії факторів на водний розчин NADH спостерігається зменшення в'язкості і поверхневого натягу. Величина зміни значень в'язкості і поверхневого натягу розчинів залежить від просторової частоти капілярних хвиль. Робиться висновок про можливі зміни конформації молекул NADH, які знаходяться у водному розчині під дією випромінення слабкої інтенсивності. У випадку 3–5% концентрації NADH зміни в'язкості розчину сягали 10–15%.

The influence of electromagnetic radiation of optical and millimetre-wave bands on the viscosity and the coefficient of surface tension of aqueous solution of NADH is studied experimentally. Measurements of solution parameters are carried out using the measurement and analysis of spectra of capillary waves on the free surface. As revealed, under the influence of electromagnetic radiation with the frequency of 60 GHz and power of 10^{-4} W/cm² during 20 min, viscosity and surface tension of water bidistillate are increased. The same impact on the aqueous solution of NADH decreases the values of viscosity and surface tension. The magnitudes of changes in viscosity and surface tension of solutions depend on the spatial frequencies of capillary waves. As concluded, the changes in conformation of molecules of NADH in aqueous solution under the influence of the radiation of weak intensity could take place. For the case of 3–5% NADH concentration, change in solution viscosity reaches 10–15%.

Ключевые слова: водный раствор NADH, биомолекула, конформация, электромагнитное излучение, кофермент.

(Получено 27 мая 2009 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что раннее диагностирование и лечение предраковых заболеваний является эффективной мерой для предотвращения инвазивного рака. В скандинавских странах была доказана эффективность использующегося скрининга, основанного на анализе рутинного мазка по Папаниколау. Разработка альтернативных методов ранней диагностики предраковых заболеваний является актуальной задачей. Особый интерес представляют экспрессные и инструментальные методы, на основе которых могут быть созданы высокочувствительные тест-системы. В настоящее время перспективными зарекомендовали себя методы, использующие флуоресцентные и иммунофлуоресцентные измерения [1]. Создание этих методов базируется на том, что при некоторых патологиях интенсив-

ность флуоресценции в области 440–475 нм связанной, как правило, с концентрацией и конформацией NADH, оказывается значительно выше, чем в норме, и отношение интенсивностей флуоресценции на длинах волн 350 и 450 нм может рассматриваться в качестве диагностического критерия [2]. Представляет интерес выяснить вопрос, в какой мере в диагностируемых образцах конформационные состояния молекул NADH обусловлены патологиями, а в какой мере лазерным излучением, используемым для стимулирования флуоресценции. В связи с этим, актуальными являются исследования закономерностей возможных фотостимулированных конформационных переходов молекул NADH с целью минимизации влияния электромагнитного излучения на исходное распределение NADH в образце по конформационным состояниям. Практический интерес может представлять также разработка методов устранения *in vivo* конформаций NADH, обусловленных патологическими процессами.

В нейтральных водных растворах NADH образует как минимум два конформационных состояния. Одна из конформаций молекулы является открытой, и в этом случае её скелет (рибоза — дифосфат-рибоза) вытянут, во втором, конформация является закрытой (скелет свернут, а два гетероцикла, адениновый и никотинамидный, расположены параллельно и взаимодействуют друг с другом) [3]. В настоящее время остается недостаточно изученным механизм управления константами скоростей конформационных переходов молекул, находящихся в водном окружении. Изучению этого вопроса посвящена настоящая работа, основанная на использовании зависимости реологических характеристик жидкой среды, содержащей растворенные в ней твердые наночастицы фиксированного объема, от формы бионаночастиц [4].

Экспериментальная информация об особенностях динамики реологических параметров водных растворов NADH была получена с помощью исследования зависимости частоты колебаний от значения волнового вектора капиллярных волн на свободной поверхности образца. Такой метод дает возможность определять значения вязкости и поверхностного натяжения при различных величинах эффективного объема (т.е. области локализации непрерывных линий тока частиц) [5] деформируемой среды. Частота колебаний капиллярных волн определялась с помощью метода оптического гетеродинамирования [6].

2. ВЗАИМОСВЯЗЬ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКОЙ СРЕДЫ И РЕЗУЛЬТАТОВ СВЕТОРАССЕЯНИЯ ЕЕ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Динамика свободной поверхности жидкости определяется флук-

туационно-диссипативными процессами [7]. Они приводят к возникновению тепловых гидродинамических флуктуаций формы свободной поверхности жидкости, которые зависят от свойств суспензии (в рассматриваемом случае — раствора наночастиц в однородной жидкости). Возникающие флуктуационные деформации свободной поверхности образца можно рассматривать [8] как результат суперпозиции распространяющихся по ней поверхностных капиллярных волн. Динамика волн достаточно хорошо [4] описывается системой уравнений Навье–Стокса и непрерывности, которую в случае малых и пологих деформаций свободной поверхности слоя жидкости (амплитуда деформаций (h) намного меньше пространственной длины волны (λ)) в случае двумерного движения, можно представить в виде:

$$\frac{\partial v_x(x, y, t)}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p(x, y, t)}{\partial x} + \frac{\eta}{\rho} \Delta v_x(x, y, t), \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_y(x, y, t)}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p(x, y, t)}{\partial y} + \frac{\eta}{\rho} \Delta v_y(x, y, t), \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_x(x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial v_y(x, y, t)}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

где $v_x(x, y, t)$, $v_y(x, y, t)$ — компоненты вектора скорости частиц жидкости в точке с координатами x , y в момент времени t ; $p(x, y, t)$ — гидродинамическое давление; η — динамическая вязкость; ρ — плотность. Ось OY направлена по нормали к свободной поверхности деформируемой среды. В уравнениях (1)–(3) учтено, что размеры пространственных неоднородностей, определяемые размерами молекул NADH, намного меньше λ . Это позволяет использовать для описания особенностей кинетики капиллярных волн усредненную локальную вязкость. Для решения уравнений (1)–(3) используются следующие граничные условия:

$$\frac{\partial v_x(x, y, t)}{\partial y} \Big|_{y=h(x, t)} + \frac{\partial v_y(x, y, t)}{\partial x} \Big|_{y=h(x, t)} = 0, \quad (4)$$

$$P(x, y, t) \Big|_{y=h(x, t)} - 2\eta \frac{\partial v_y(x, y, t)}{\partial y} \Big|_{y=h(x, t)} + T_M \frac{\partial^2 h(x, t)}{\partial x^2} = 0, \quad (5)$$

$$h(x, t) = \int_0^t v_y(x, y=0, t) dt; \quad (6)$$

здесь T_M — коэффициент поверхностного натяжения.

Данная задача является линейной и поэтому в рамках этой модели можно считать, что отдельные гармоники поверхностных

волн не взаимодействуют друг с другом. Рассматривая поведение одной из поверхностных гармоник с длиной волны λ , которая намного меньше толщины образца, а также учитывая, что компоненты скорости v_x, v_y экспоненциально убывают по мере удаления от свободной поверхности в глубь жидкости, решение системы (1)–(3) можем выбрать в виде, являющемся действительным вариантом известных комплексных соотношений [9]:

$$v_x(x, y, t) = \left(-\frac{k}{\rho\alpha} C_1 \exp(kz) + C_2 \beta \exp(k\beta z) \right) \cos(kx) \exp(\alpha t), \quad (7)$$

$$v_y(x, y, t) = \left(-\frac{k}{\rho\alpha} C_1 \exp(kz) + C_2 \exp(k\beta z) \right) \sin(kx) \exp(\alpha t), \quad (8)$$

$$p(x, y, t) = \rho C_1 \exp(kz) \sin(kx) \exp(\alpha t), \quad (9)$$

где $k = 2\pi/\lambda$, α — комплексная величина, мнимая часть которой определяет частоту колебаний, а действительная — их затухание;

$\beta = \sqrt{1 + \frac{\alpha\rho}{\eta k^2}}$; C_2 — константа, связанная с параметром C_1 соотношением (4), из которого следует, что

$$C_2 = \frac{2k}{\rho\alpha(1 + \beta^2)} C_1. \quad (10)$$

Неизвестная постоянная C_1 не может быть определена, что математически обусловлено однородным характером рассматриваемой задачи, а физически — некаузальным характером флуктуационных сил, которые являются причиной возникновения волновых возмущений свободной поверхности жидкости. Учет ранее неиспользованного граничного условия (5) позволяет получить дисперсионное уравнение, которое является аналогом известного соотношения [9], связывающего величины α и k :

$$\rho\alpha + \frac{2\eta k^2}{1 + \beta^2} - \frac{T_M k^3}{\alpha} \frac{1 - \beta^2}{1 + \beta^2} = 0. \quad (11)$$

Аналитическое решение уравнения (11) может быть найдено при использовании теории возмущений. В частности, в случае слабовязкой жидкости [9] его можно представить в виде

$$\alpha = \Gamma + i\zeta, \quad (12)$$

$$\Gamma = -\left(2\frac{\eta}{\rho} k^2 + \frac{2\eta^3 k^6}{\rho^3 \omega_0} \right), \quad (13)$$

$$\zeta = \omega_0 - \sqrt{\frac{2\eta^3 k^6}{\rho^3 \omega_0}}, \quad (14)$$

$$\omega_0^2 = \frac{T_M k^3}{\rho}. \quad (15)$$

При получении соотношений (13) и (14) был учтен вклад двух первых порядков малости. Необходимость учета второго порядка малости по сравнению с анализом, приведенным в работе [9], обуславливался предполагаемой незначительностью эффектов влияния электромагнитного облучения на реологические параметры жидкости. (Анализ свидетельствует, что дополнительные слагаемые в (13), (14) в исследуемом диапазоне η и T_M составляют $\sim 10\%$ от величины главных членов.) Измерения показали, что такого же порядка является и регистрируемый эффект действия электромагнитного излучения.

Соотношения (6), (8), (12) определяют функциональный вид амплитуды образующегося на свободной поверхности образца рельефа, которую можно записать следующим образом:

$$h(x, t) = \frac{2k(1 - \beta^2)}{\rho\alpha^2(1 + \beta^2)} C_1 \sin(kx) \exp(\Gamma t + i\zeta t). \quad (16)$$

Для определения величины C_1 и тем самым амплитуды волн можно использовать дополнительную информацию о механизме возбуждения поверхностных волн [9].

При экспериментальном исследовании динамики капиллярных волн на свободной поверхности жидкости учтем [10], что при освещении ее лазерным пучком интенсивность света, рассеянного в телесном угле Ω , определяется величиной среднеквадратичного смещения $\langle h^2 \rangle$ элемента колеблющейся поверхности жидкости:

$$\frac{dI}{d\Omega} = I_0 \frac{q^4}{(4\pi)^2} \langle h^2 \rangle(\omega, k) \cos^3(\theta), \quad (16)$$

где I_0 — интенсивность отраженного излучения, которая определяется для плоской поверхности с помощью формул Френеля; θ — угол падения света; q — волновое число падающего света; знак $\langle \dots \rangle$ обозначает проведение операции усреднения. Здесь величина $\langle h^2 \rangle(\omega, k)$, которая зависит от α и k является временным преобразованием Фурье автокорреляционной функции $\langle h(k, t)h(k, t + \tau) \rangle$ [10], которое с учетом соотношения (15) можно представить в следующем виде:

$$\langle h^2 \rangle(\omega, k) = \left(\frac{k(1-\beta^2)}{\rho\alpha^2(1+\beta^2)} \right)^2 \langle C_1^2 \rangle \frac{1}{(\omega - \zeta)^2 + \Gamma^2}. \quad (17)$$

В дальнейшем для упрощения $\langle h^2 \rangle$ называется квадратом амплитуды капиллярных волн. Величина $\langle C_1^2 \rangle$ обуславливается особенностями флуктуационной генерации капиллярных волн. Объединяя соотношения (16) и (17), получим:

$$\frac{dI}{d\Omega} = I_0 \frac{q^4}{(4\pi)^2} \left(\frac{k(1-\beta^2)}{\rho\alpha^2(1+\beta^2)} \right)^2 \langle C_1^2 \rangle \frac{1}{(\omega - \zeta)^2 + \Gamma^2} \cos^3(\theta). \quad (18)$$

Из соотношения (18) видно, что величина Γ определяет полуширину плотности спектральной мощности капиллярных волн свободной поверхности жидкости; ζ — положение максимума плотности спектральной мощности капиллярных волн на оси временных частот. Измеряя Γ , ζ и используя соотношения (13) и (14), определяют вязкость и поверхностное натяжение.

3. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерения параметров светорассеивания на свободной поверхности образца проводили с помощью метода оптического гетеродинамирования [6, 10, 11]. Блок-схема установки для их измерения представлена на рис. 1.

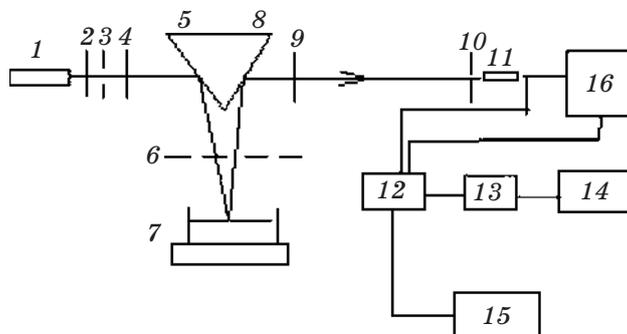


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения параметров светорассеивания на свободной поверхности образца: 1 — лазер ЛГ-79; 2, 4 — коллиматор; 3 — диафрагма; 5, 8 — отражающие зеркала; 6 — дифракционная решетка; 7 — ячейка с раствором; 9 — фурье-линза; 10 — диафрагма; 11 — фотоприемник; 12 — электронный делитель; 13 — спектроанализатор; 14 — графопостроитель; 15 — осциллограф; 16 — блок питания.

Исходный лазерный пучок разделяется на две части. Одним пучком освещается свободная поверхность жидкости. При этом происходит рассеяние лазерного пучка на капиллярных волнах свободной поверхности. Частота рассеянного света изменяется в соответствии с эффектом Доплера. Другой пучок света проходит мимо жидкости. Затем оба пучка света складываются между собой. Наиболее стабильные результаты сложения пучков света были получены с использованием дифракционных решеток. При этом пространственная частота решетки автоматически задает пространственную частоту капиллярных волн. В результате сложения пучков света образуется динамическая интерференционная картина, которая определяется разностью частот пучков света, рассеянного и не рассеянного поверхностью жидкости. С помощью данной установки измеряется амплитуда биений частот пучков света, значение частоты биений и их зависимость от угла рассеяния.

В качестве исследуемых образцов использовались свежий бидистиллят воды и водный раствор NADH. Концентрация NADH не превышала 5 вес.%. Это позволяло считать, что характеристики спектров капиллярных волн не зависят от концентрации NADH. Образцы предварительно выдерживались в темноте в установке в течение 2 часов. Оптическая схема собрана на голографическом столе с виброзащитным основанием. Мощность лазера составляла 7,5 мВт с длиной волны 630 нм, диаметр луча на поверхности жидкости равнялся $3 \cdot 10^{-3}$ м (на уровне 0,7 максимальной интенсивности). Фокусирующая линза имела фокус 1,00 м, диаметр луча в области перетяжки составлял $0,5 \cdot 10^{-3}$ м. Область перетяжки находилась на расстоянии 1,5 м от поверхности жидкости. Фотоприемное устройство было собрано на базе фотодиода ФД-256 и микросхемы КР544УД1А с апертурой $0,5 \cdot 10^{-3}$ м. Измерительная кювета представляла медный цилиндр высотой $15 \cdot 10^{-3}$ м, с внешним диаметром $35 \cdot 10^{-3}$ м. Схема термостатирования кюветы обеспечивала измерение абсолютного значения температуры с точностью $\pm 0,25^\circ\text{C}$ в диапазоне от 4 до 38°C . В качестве источника электромагнитного излучения (ЭМИ) использовали генератор Г-142 с гибким диэлектрическим волноводом и He-Ne лазер (ЛГ-79) с мощностью излучения 15 мВт. Мощность излучения ЭМИ на выходе волновода составляла 1 мВт на частоте 60 ГГц.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследовались спектры капиллярных волн, дистиллята воды и водного раствора NADH, их динамика под воздействием ЭМИ миллиметрового и оптического диапазонов. Результаты исследований приведены на рис. 2–7.

На рисунках 2, 3 представлены спектры капиллярных волн образцов дистиллята воды и водного раствора NADH до их облучения.

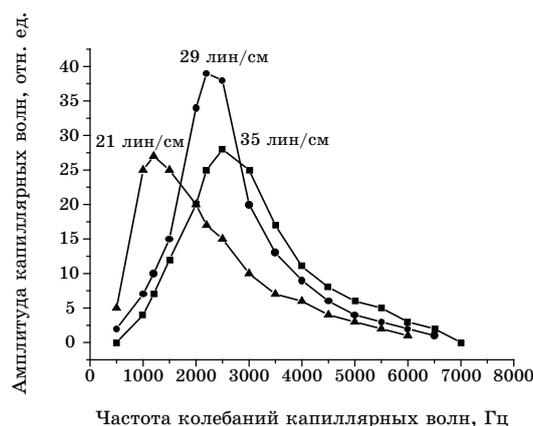


Рис. 2. Спектр капиллярных волн на поверхности дистиллята воды. Зависимость амплитуды капиллярных волн на поверхности дистиллята воды от частоты для трёх длин волн.

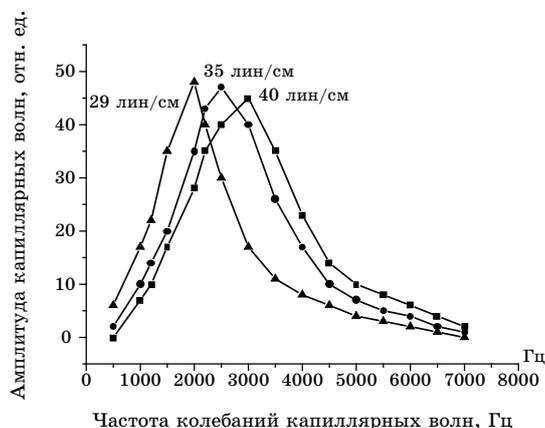


Рис. 3. Зависимость амплитуды капиллярных волн на поверхности водного раствора NADH от частоты для трёх пространственных частот капиллярных волн.

При обработке полученных экспериментальных данных использовались соотношения (13)–(15). Из представленных данных следует, что на поверхности исследуемых образцов в используемом диапазоне температур наибольшую амплитуду имеют капиллярные волны с пространственными длинами волн в диапазоне 0,25–0,5 мм.

Из рисунков 2, 3 и соотношений (13)–(15) также следует, что зависимость амплитуды капиллярных волн от частоты их колебаний (и полуширина соответствующих графиков) определяется пространственной длиной колебаний капиллярных волн.

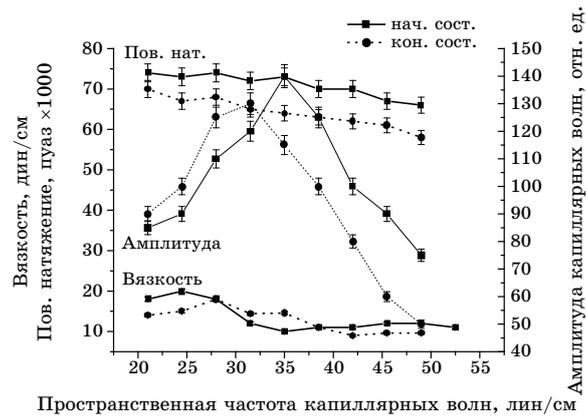


Рис. 4. Действие лазерного излучения на параметры дистиллята воды.



Рис. 5. Действие лазерного излучения на водный раствор NADH.

Данные, приведенные на рис. 4 и 5, получены после обработки экспериментальных данных, представленных на рис. 2 и 3, при использовании формул (13), (14), (17), (18). Приведенные на них данные иллюстрируют изменение вязкости и поверхностного натяжения образцов под воздействием лазерного излучения. Образцы выдерживались в темноте в течение 2 часов. Затем регистрировались спектры капиллярных волн до (начальное состояние) и после освещения в течение 20 минут лазером (конечное состояние). Видно, что под действием лазерного излучения вязкость воды изменяется незначительно, а поверхностное натяжение заметно уменьшается. Вязкость и поверхностное натяжение раствора NADH под действием лазерного излучения увеличиваются согласованным образом.

Такой характер изменений вязкости и поверхностного натяжения исключает возможность их объяснения тепловым действием

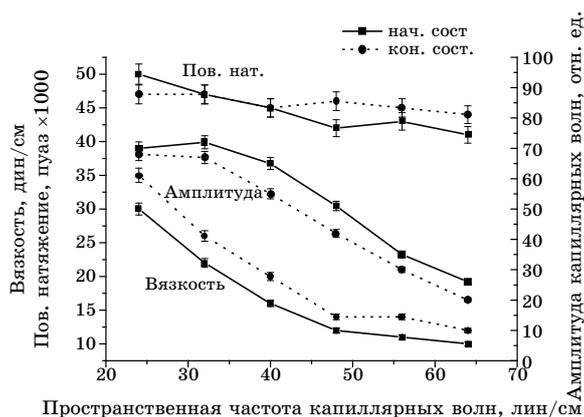


Рис. 6. Действие ЭМИ мм-диапазона на параметры дистиллята воды.

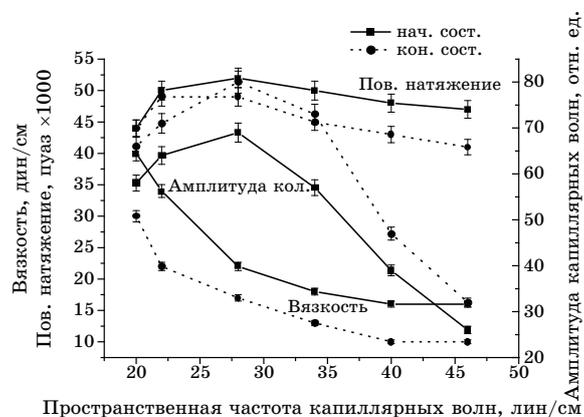


Рис. 7. Действие ЭМИ мм-диапазона на параметры 5% раствора NADH.

лазерного излучения. Наличие нетривиальной зависимости вязкости и поверхностного натяжения дистиллята воды от длительности воздействия и интенсивности лазерного излучения может свидетельствовать либо о влиянии излучения на флуктуационные процессы, определяющие свойства капиллярных волн, либо о возможном структурировании дистиллята воды, зависящем от свойств лазерного излучения.

Рисунки 6 и 7 иллюстрируют изменение вязкости и поверхностного натяжения образцов под воздействием миллиметрового излучения. Видно, что под действием ЭМИ вязкость воды увеличивается, а вязкость водного раствора NADH уменьшается. При этом можно считать, что поверхностное натяжение воды увеличивается, а у раствора NADH уменьшается. Такое поведение реологических

параметров образцов исключает возможность его объяснения только влиянием нагрева образцов миллиметровым излучением.

Анализ полученных результатов показал, что реологические параметры воды и водного раствора коэнзима NADH подвержены влиянию низкоинтенсивного ЭМИ оптического и мм-диапазона. Под действием излучения мм-диапазона вязкость водного раствора NADH уменьшается, а под действием излучения оптического диапазона возрастает. В качестве возможного объяснения этого факта можно предположить, что низкоэнергетическое мм-излучение вызывает свёртывание молекул NADH (форма молекулы становится ближе к сферической). В этом случае вязкость должна уменьшаться. Под действием высокоэнергетического излучения оптического диапазона происходит отрыв носителя электрического заряда от молекулы NADH. Носитель заряда переходит на соседние молекулы. Это приводит к образованию связанного кулоновскими силами ассоциата, геометрические размеры которого превышают размеры молекулы NADH, что приводит к наблюдаемому увеличению вязкости раствора.

5. ВЫВОДЫ

1. Воздействие ЭМИ (мощность 10^{-4} Вт/см², частота 60 ГГц, длительность 20 мин) на бидистиллят воды приводит к увеличению значений вязкости и поверхностного натяжения. Электромагнитное воздействие с теми же параметрами на водный раствор NADH приводит к уменьшению значений его вязкости и поверхностного натяжения. Изменения значений вязкости и поверхностного натяжения растворов зависит от пространственной частоты капиллярных волн. Это позволяет высказать предположение о возможном структурировании воды и изменении конформации молекул NADH, находящихся в водном растворе под воздействием ЭМИ слабой интенсивности. В случае 3–5% концентрации NADH изменение вязкости раствора достигало 10–15%.

2. Воздействие светового излучения ($\lambda = 0,63$ мкм, интенсивность $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ Вт/см²) в течение 20 мин на дистиллят воды приводит к уменьшению значений вязкости и поверхностного натяжения, а у водного раствора NADH вызывает увеличение этих реологических характеристик. Изменения значений вязкости и поверхностного натяжения растворов зависят от пространственной частоты капиллярных волн. Это позволяет допустить возможность структурирования воды и изменение конформационного состояния молекул NADH под нетепловым воздействием светового излучения.

3. Зарегистрированная при исследовании реологических характеристик возможность управления конформационным состоянием

молекул NADH, находящихся в водной среде, с помощью ЭМИ дает возможность изменять оптические и биологические характеристики молекул NADH.

4. В рамках модели слабовязкой несжимаемой ньютоновской жидкости с учетом двух порядков малости получены соотношения, определяющие связь между частотой капиллярных волн и их длиной волны.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Х. А. Аршакян, С. В. Пушкарев, Е. С. Половников, Ю. П. Мешалкин, *Бюллетень СО РАМН*, № 1 (2007).
2. R. A Lipson, E. J. Baldes, and A. M. Olsen, *J. Nat. Cancer Inst.*, **26** (1961).
3. А. П. Демченко, *Люминесценция и динамика структуры белков* (Киев: Наукова думка: 1988).
4. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Гидродинамика* (Москва: Наука: 1986).
5. М. А. Заболотный, А. Г. Загородний, *Регистрирующие среды на основе полимерных полупроводников и их применение* (Киев: Знание: 1989).
6. А. Л. Дмитриев, *Оптические системы передачи информации* (Санкт-Петербург: СПбГУИТМО: 2007).
7. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Физическая кинетика* (Москва: Наука: 1979).
8. В. Кляцкин, Д. Гурарий, *Успехи физ. наук*, **169**, № 2 (1999).
9. В. Г. Левич, *Физико-химическая гидродинамика* (Москва: Изд. АН СССР: 1952).
10. L. B. Shih, *Rev. Sei. Instrum.*, **55**, No. 5 (1984).
11. Ю. М. Барабаш, М. А. Заболотный, Т. Г. Заболотная, *Электроника и связь*, **8**, № 1 (2000).