

Л.А. БУЛАВІН, Л.Ю. ВЕРГУН, Ю.Ф. ЗАБАШТА, К.О. ОГОРОДНІК,  
Ф.Ф. ДЕМИДЮК

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет  
(Просп. Академіка Глушкова, 2/1, Київ 03127)

УДК 537.63

## ТУРБУЛЕНТНІСТЬ У ВОДНИХ РОЗЧИНАХ ГЛЮКОЗИ, ВИКЛИКАНА МАГНІТНИМ ПОЛЕМ

---

*Досліджується турбулентний рух у водному розчині глюкози, спричинений магнітним полем. Вивчаються зміни, що відбуваються із цим рухом, внаслідок зміни значень індукції магнітного поля та концентрації розчину. Встановлено, що залежність ступеня синхронізації турбулентного руху від магнітної індукції є немонотонною функцією. Наявність мінімуму у цієї функції пов'язується із виникненням нестійких коливних мод. Наступне зростання ступеня синхронізації пояснюється посиленням гідродинамічної взаємодії між анізотропними кластерами. Встановлено, що збільшення концентрації розчину зменшує ступінь синхронізації. Цей факт є наслідком взаємної компенсації збурень, які створені різними кластерами.*

*Ключові слова:* водний розчин глюкози, магнітне поле, турбулентність, ступінь синхронізації.

### 1. Вступ

У зв'язку з поширенням у медицині магнітних методів обстежень та лікувань, в фізиці рідин в останній час набуває актуальності проблема впливу магнітного поля на структуру і властивості рідин. На даний момент по цій проблемі накопичено значну кількість експериментальних даних [1], разом з тим фізична інтерпретація вказаних експериментальних даних практично відсутня.

У нашій попередній роботі [1] було встановлено, що під дією сталого магнітного поля виникає турбулентний рух у водному розчині. Дана стаття є продовженням згаданої роботи, і в ній ми будемо шукати відповідь на питання, як впливає концентрація розчину та індукція магнітного поля на характер турбулентного руху.

### 2. Експериментальні дані

Досліджувалось розсіяння світла розчинами глюкози, що знаходились під дією сталого магні-

тного поля. Експериментальна установка та методика експерименту детально описані в роботі [2].

Вимірювалась відносна інтенсивність розсіяння світла  $\xi = I/I_0$ ,  $I$  – інтенсивність розсіяння в момент часу  $t$ ,  $I_0$  – інтенсивність розсіяння в момент часу, за який було прийнято момент початку вимірювання  $t_0 = 0$ .

Досліджувались розчини з концентраціями  $C = 5\%$  та  $C = 40\%$  при значеннях магнітної індукції  $B = 0,13; 0,16; 0,25; 0,43; 3,2$  мТл.

Типову залежність  $\xi(t)$  наведено на рис. 1, *a*. На рис. 1, *b* наведена відповідна залежність  $B(t)$ .

Як видно із рис. 1, *a*, до включення поля інтенсивність розсіяння в межах похибки – стала величина, але після включення магнітного поля (див. рис. 1, *b*), інтенсивність розсіяння зазнає значних флуктуацій, значення яких суттєво перевищує похибку експерименту. Характер залежності  $\xi(t)$  в усіх інших досліджених випадках принципово не змінюється – на всіх залежностях спостерігалися значні флуктуації, що виникали в момент включення магнітного поля.

© Л.А. БУЛАВІН, Л.Ю. ВЕРГУН, Ю.Ф. ЗАБАШТА,  
К.О. ОГОРОДНІК, Ф.Ф. ДЕМИДЮК, 2016

### 3. Обговорення результатів

Що є причиною згаданих флуктуацій?

У роботі [1] показано, що магнітне поле впливає на поведінку розчину завдяки наявності в останньому анізотропних кластерів. Під дією магнітного поля кластери починають рухатись, намагаючись зорієнтуватись в напрямку магнітного поля. Такий рух приводить до появи потоків у рідині, що оточує кластер. Ці потоки впливають на рух інших кластерів, внаслідок чого між кластерами виникає взаємодія, яку називають гідродинамічною. Ця взаємодія стримує прагнення кластерів до орієнтації. Під дією двох факторів – орієнтуючої дії магнітного поля та гідродинамічної взаємодії – рух кластерів набуває характеру автоколивань.

Автоколивання кластерів – це той періодичний рух, втрата стійкості якого призводить до виникнення турбулентного руху. Така втрата стійкості, як відомо [3], може відбуватись двома шляхами.

Перший шлях – утворення коливальних нестійких мод із неспіврозмірними частотами. Внаслідок накладання цих мод виникає квазіперіодичний (багатоперіодичний) рух, який при певній кількості згаданих мод, набуває ознак хаотичності, властивих турбулентному рухові. Це – сценарій турбулізації, запропонований Л.Д. Ландау [3]. Його називають також теорією слабкої турбулентності, або теорією квазіперіодичної стохастичності [4].

Другий – виникнення коливальних мод за рахунок подвоєння періодів. Рух частинок, який виникає після включення магнітного поля, проявляється в нашому експерименті у вигляді флуктуації діелектричної проникливості. Спочатку, як уже згадувалось, виникає періодичний рух автоколивань кластерів. Тут ми маємо справу із флуктуаціями анізотропії. В подальшому, із народженням нових коливальних мод при їх накладанні приписати окремій моді певний тип флуктуації діелектричної проникливості неможливо – кожна з них дає внесок і в флуктуації анізотропії, і в флуктуації концентрації, і в флуктуації густини.

Кожний коливальний моді відповідає певна просторово-періодична залежність діелектричної проникливості. Таким чином, спостережене розсіяння світла є наслідком накладання декількох таких залежностей – “хвилі” діелектричної проникливості.

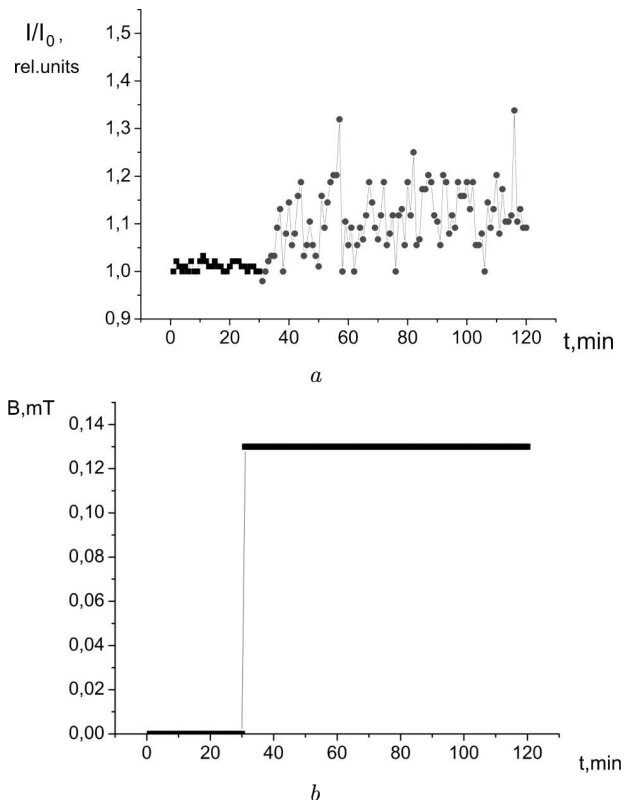


Рис. 1. Залежність відносної інтенсивності (а) та залежність магнітного поля індукцією 0,13 мТл (b) від часу

Вище йшлося про два шляхи виникнення турбулентності. Для встановлення того, який із шляхів реалізується в нашому випадку було виконано фур'є-перетворення залежностей  $\xi(t)$ . На рис. 2, а наведено фур'є-перетворення  $\xi_\omega(\omega)$  залежності  $\xi(t)$  рис. 1, а.

Для порівняння на рис. 2, б показано, який вигляд повинно було б мати фур'є-перетворення, якби турбулізація відбувалась за рахунок подвоєння періодів. Як видно з рис. 2, фур'є-перетворення залежності  $\xi(t)$ , отриманої в нашому експерименті, не має ніякої схожості із картиною подвоєння періодів, і нам не залишається нічого іншого, як зробити висновок, що в даному випадку має місце сценарій Л.Д. Ландау.

До того ж висновку ми приходимо, побудувавши фур'є-перетворення всіх інших отриманих нами залежностей  $\xi(t)$ .

Як уже згадувалось згідно з сценарієм Л.Д. Ландау, залежність  $\xi(t)$  є багатоперіодичною функцією, яка є сумою елементарних коливальних мод.

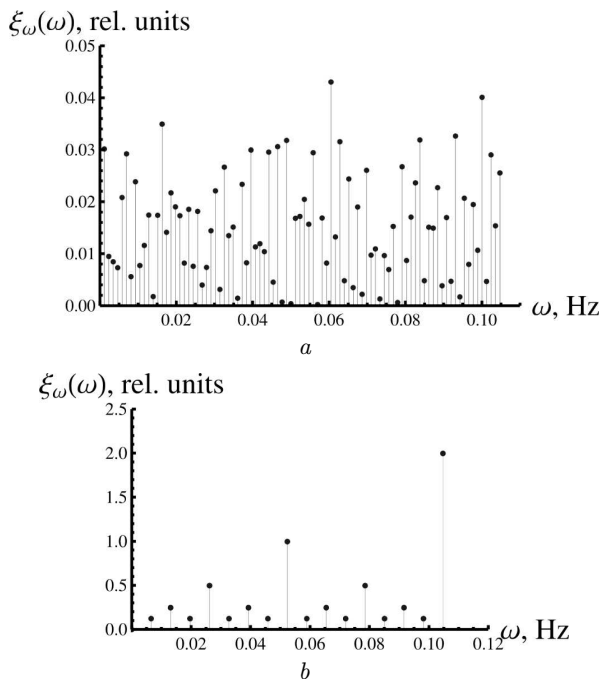


Рис. 2. Фур'є-перетворення залежності  $\xi(t)$  для магнітного поля індукцією 0,13 мТл (а) та загальний вид фур'є-перетворення шляхом реалізації подвоєння частот (б)

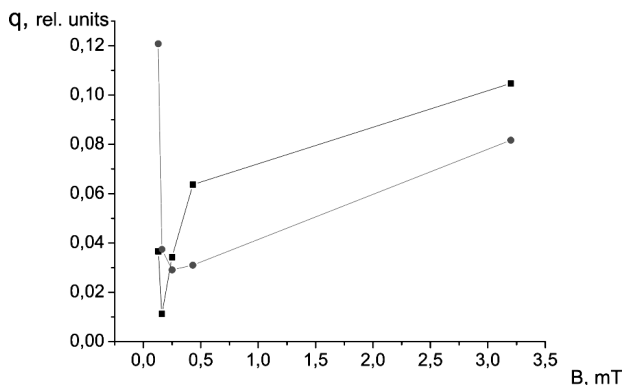


Рис. 3. Залежність ступеня синхронізації  $q$  для 5% (■) та 40% (●) розчину глюкози при різній індукції магнітного поля  $B$

Позначатимемо через  $m$  число таких мод. Для характеристики турбулентного руху вводиться, як відомо [4], термін “синхронізація”.

Стан повної синхронізації відповідає періодичному рухові, коли всі елементарні моди мають однакову частоту. Для цього стану  $m = 1$ .

Із збільшенням  $m$  в коливання окремих мод все менше узгодженості: як прийнято говорити [4],

зменшується ступінь їх синхронізації – відбувається їх поступова десинхронізація. При  $m \rightarrow \infty$  настає повна десинхронізація, коли між елементарними модами відсутній зв'язок.

Величина  $1/m$  відіграє роль ступеня синхронізації: при повній синхронізації ця величина дорівнює 1, при повній же десинхронізації вона набуває нульового значення.

Введемо в розгляд ефективну ступінь синхронізації  $q$  за формулою

$$q = \frac{\xi_{\omega m}}{\sum_i \xi_{\omega}(\omega_i)}, \quad (1)$$

де  $\xi_{\omega m}$  – найбільше значення  $\xi_{\omega}$ .

Можливість використання формули (1) впливає з того, що ця формула “працює” в обох граничних випадках, коли  $m = 1$  і  $m \rightarrow \infty$ : в обох випадках значення  $q$  збігається із значенням  $1/m$ .

Дійсно, в стані повної синхронізації, коли  $m = 1$ , сума в формулі (1) містить тільки один доданок – всі інші доданки дорівнюють нулеві, отже, в даному випадку  $q = 1$ .

В стані ж повної десинхронізації, коли  $m \rightarrow \infty$  (фактично при значеннях  $m \gg 1$ ), доданки суми в формулі (1) стають практично рівним один одному, і ми отримуємо рівність  $q = 1/m$ .

За допомогою формули (1) по залежностях  $\xi_{\omega}(\omega)$  було розраховано ступені синхронізації турбулентних рухів, що відповідають різним індукціям магнітного поля та концентраціям. Результати розрахунку наведено на рис. 3.

Відзначимо три особливості в поведінці ступеня синхронізації, яку описують графіки на рис. 3:

- 1) залежність  $q(H)$  має мінімум, при деякому значенні  $B = B_m$ ;
- 2) швидкість  $\frac{dq}{dB}$  при  $B > B_m$  зменшується при збільшенні концентрації розчину;
- 3) при синхронізації “виживають” моди з більшою частотою.

Як відомо [3], квазіперіодичний режим не є стійким. Внаслідок взаємодії між модами за певний час цей режим зникає, породжуючи новий періодичний рух. Така синхронізація не пов'язана, як ми бачимо, з дією зовнішніх факторів, а впливає із самої природи слабкої (квазіперіодичної) турбулентності.

Синхронізація ж, яка спостерігається в нашому експерименті, має іншу причину: вона якраз і ви-

кликана дією зовнішнього фактора – магнітного поля. Таку синхронізацію логічно назвати вимушеною, або стимульованою магнітним полем.

В моделі, запропонованій в статті [1], виникнення турбулентності пов'язується із гідродинамічною взаємодією – за її відсутності турбулентності не існувало, а тому при дії магнітного поля відбувалося лише обертання анізотропних кластерів, тобто їх орієнтація в напрямку поля. Саме завдяки гідродинамічній взаємодії рух кластерів набуває коливального характеру.

Чим менше частота коливань, тим ближче коливальний рух за своїм характером до обертального (для якого частоту можна вважати рівною нулю). Отож, коли в квазіперіодичному режимі починають переважати високочастотні моди, слід вважати, що в цьому випадку посилюється гідродинамічна взаємодія між анізотропними кластерами. Іншими словами, в рамках прийнятої моделі вимушену синхронізацію маємо розглядати як наслідок посилення гідродинамічної взаємодії.

Проаналізуємо згадані вище особливості поведінки ступеня синхронізації у зв'язку із можливими змінами гідродинамічної взаємодії.

З цієї точки зору, спостережене при  $B > B_m$  зростання  $q$  із збільшенням  $B$  свідчить про збільшення інтенсивності гідродинамічної взаємодії. Такий висновок, на нашу думку, виглядає цілком логічно: адже збільшення індукції  $B$  збільшує величину зовнішнього обертального моменту, що діє на кластер з боку поля, а отже, більше збурює рідину, яка оточує кластер.

Наявність мінімуму на залежності  $q(H)$  свідчить про послаблення гідродинамічної взаємодії. Якщо згадати, що водночас із синхронізацією протікає процес утворення нових нестійких мод, можна припустити, що саме переважання цього процесу спричиняє спостережене послаблення гідродинамічної взаємодії: поява нової моди послаблює первинне збурення середовища, викликане дією зовнішнього обертального моменту.

І нарешті, спостережене загальне падіння ступеня синхронізації  $q$  із збільшення концентрації, з точки зору прийнятої моделі, можна пояснити тим, що при цьому збільшується число кластерів, а збурення, спричинені рухом різних кластерів, накладаються. Ці збурення частково компенсуються. Разом з тим із збільшенням числа кластерів імо-

вірність такої компенсації збільшується, що й призводить до зменшення  $q$ .

#### 4. Висновки

1. Виникнення турбулентного руху в розчині глюкози під дією магнітного поля супроводжується його синхронізацією. Ця синхронізація є вимушеною: ступінь синхронізації залежить від індукції магнітного поля.

2. Залежність ступеня синхронізації  $q$  від магнітної індукції  $B$  має немотонний характер: при деякому значенні  $B = B_m$  спостерігається мінімум. Зростання ступеня синхронізації при  $B > B_m$  викликане збільшенням гідродинамічної взаємодії між кластерами. Наявність мінімуму є наслідком народження в розчині нестійких коливальних мод.

3. Ступінь синхронізації зменшується із збільшенням концентрації. Це пов'язано із компенсацією збурень, викликаних рухом різних кластерів.

1. Л.А. Булавін, Л.Ю. Вергун, Ю.Ф. Забашта, К.О. Огороднік, УФЖ **61**, 589 (2016).
2. L. Vergun, O. Zagorodnia, K. Teliman, J. Phys. Sci. Appl. A **3**, (2013).
3. Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц, *Гідродинаміка* (Наука, Москва, 1988).
4. Н.В. Бутенин, Ю.М. Нейман, А.Н. Фуфаев, *Введення в теорію нелінійних коливань* (Наука, Москва, 1976).

Одержано 31.01.16

*L.A. Bulavin, L.Yu. Vergun,  
Yu.F. Zabashta, K.O. Ogorodnik, F.F. Demydyuk*

#### TURBULENCE IN AQUEOUS GLUCOSE SOLUTIONS INDUCED BY MAGNETIC FIELD

#### S u m m a r y

The turbulent motion induced by a magnetic field in aqueous glucose solutions has been studied. Changes in the motion occurring owing to variations in the magnetic field induction and the solution concentration are analyzed. The dependence of the turbulent motion synchronization degree on the magnetic induction is found to be nonmonotonic. The minimum in this dependence is found to be connected with the emergence of unstable fluctuation modes. The following growth of the synchronization degree is explained by a strengthening of the hydrodynamic interaction between anisotropic clusters. Higher solution concentrations are found to reduce the synchronization degree. This fact is a consequence of the mutual compensation of perturbations created by different clusters.