

Ю.Ф. ЗАБАШТА, В.І. КОВАЛЬЧУК, Л.А. БУЛАВІН

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет  
(Вул. Володимирська, 64/13, Київ, 01601)

УДК 539

## ЛАМЕЛЯРНІ ГЕЛІ: ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ

*На основі топологічного підходу доведено можливість існування ламелярних гелів. Особливість структури цього типу гелів полягає в тому, що їхній каркас утворено з ламел. Запропоновано модель ідеального ламелярного гелю та розраховано параметри його структури. Визначено вид дефектів, які можуть виникати в реальному ламелярному гелі. Виведено формулу, що описує транспорт води крізь поверхню ламелярних гідрогелів. Можливість існування ламелярних гелів підтверджена експериментально за допомогою розсіяння світла водним розчином гідроксипропілцелюлози.*

**Ключові слова:** ламелярний гель, гідроксипропілцелюлоза, розсіяння світла.

### 1. Вступ

Як відомо [1], в полімерному розчині можуть існувати два типи структур: золь- та гель-структура. Різниця між ними полягає в тому, що в першому випадку взаємодія між ланцюгами носить короткочасний характер, а в другому – призводить до утворення в розчині довготривалого у часі каркасу, що складається з полімерних ланцюгів. Такий розчин називають гелем. У випадку, коли розчинником є вода, вживають також термін “гідрогель”.

Актуальність дослідження гелів впливає, в першу чергу, з потреб медицини [2–5]. Можливість впровадження отриманих результатів у медицині стимулювала інтенсивний розвиток дослідження гелів. Результати таких досліджень ([6–9] і посилання там) дозволяють сьогодні стверджувати про наявність нового наукового напрямку – фізики гелів.

Специфіка поведінки гелів визначається, в основному, структурними особливостями їх карка-

са. Одним із багатьох питань, що стосуються фізики гелів, є створення теоретичних моделей їх каркаса. Розгляду саме цього питання присвячено дану статтю.

Загальноприйнято вважати [1], що полімерний каркас – це сітка (див. рис. 1), яку утворюють ланцюги 1, з’єднуючись один з одним у вузлах 2. Ланцюг може проходити крізь декілька вузлів. Відрізок ланцюга, обмежений двома сусідніми вузлами, називають субланцюгом. Зображення ланцюгів на рис. 1 відповідає континуальній (персистентній) моделі ланцюга [10]. Згідно з цією моделлю ланцюг розглядається як пружний стрижень. Вважається, що діаметр такого стрижня за порядком величини дорівнює розміру полімерної ланки  $b$ . Згаданий стрижень на рис. 1 зображено лінією, що пов’язано з умовою

$$b \ll h, \quad (1)$$

де  $h$  – розмір вибраної просторової шкали. Іншими словами, за умови (1) ланцюг розглядається як одновимірний об’єкт.

Як уже згадувалось, вважається, що сітка – єдиний можливий тип гелевого каркаса. Натомість в даній статті буде показано, що в гелях має існувати і ще один тип каркаса, який принципово відрізняється від сітки.

Цитування: Забашта Ю.Ф., Ковальчук В.І., Булавін Л.А. Ламелярні гелі: особливості структури. *Укр. фіз. журн.* **70**, № 7, 475 (2025).

© Видавець ВД “Академперіодика” НАН України, 2025. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 2. Каркас гелю з точки зору топології

Називатимемо далі полімерні ланки частинками полімеру. Позначимо через  $b_s$  розмір частинки (молекули, іона) розчинника. Розміри частинок полімеру та розчинника, як правило, мають однаковий порядок, що дозволяє вважати виконаною рівність  $b \approx b_s$ .

Зважаючи на умову (1), розглядатимемо частинки полімеру та розчинника як точки – силові центри. Будемо позначати через  $M$  множину, елементами якої є частинки полімеру та розчинника. Слідуючи [11], введемо у просторі, зайнятому розчином, топологію, виконавши розбивку множини  $M$  на підмножини згідно з виразом

$$M = \bigcup_{j=0}^3 M_j, \quad (3)$$

де  $M_0$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  – підмножини, елементами яких є відповідно нульвимірні, одновимірні, двовимірні та тривимірні клітини.

За визначенням, нульвимірна клітина – це точка. Одновимірна, двовимірна та тривимірна клітини гомоморфні відповідно відкритим відрізку, колу та кулі. Іншими словами, внаслідок згаданої розбивки простір розпадається на тривимірні області. Поверхні, що відділяють ці області одну від одної – це двовимірні клітини. Лінії перетину вказаних поверхонь – одновимірні клітини. Такі лінії перетинаються в точках – одновимірних клітинах.

Каркасом прийнято називати частину системи, що не стосується областей, на які каркас поділяє систему. Згідно з цим твердженням множина  $M'$ ,

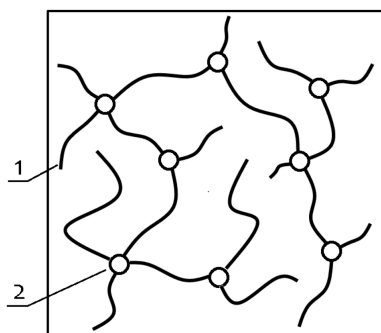


Рис. 1. Гелева сітка – модель полімерного каркаса: 1 – ланцюг, 2 – вузол

елементами якої є частинки каркаса (частинки полімеру), має визначатися виразом

$$M' = \bigcup_{j=0}^2 M_j. \quad (4)$$

Як уже згадувалось, сітка складається із субланцюгів, з'єднаних між собою вузлами. Останні виступають як нульвимірні клітини, субланцюги ж відіграють роль одновимірних. Таким чином, у випадку, коли каркас є сіткою, частинки каркаса є елементами множини

$$M'' = \bigcup_{j=0}^1 M_j. \quad (5)$$

Будемо називати далі сітку ланцюговим каркасом (скорочено: С-каркас), а гель з таким каркасом – ланцюговим гелем (скорочено: С-гель). Як видно із виразів (4) і (5), окрім ланцюгового, в полімерному гелі може існувати інший тип каркаса, до складу якого входять поверхні. В реальності кожна така поверхня є широкою тонкою пластиною. Будемо називати цю пластину ламелою, слідуючи прийнятій термінології [12], для опису зовнішнього вигляду кристалів. Відповідний каркас називатимемо ламелярним (скорочено: Л-каркас). Гель з таким каркасом також називатимемо ламелярним (скорочено: Л-гель).

## 3. Ідеальні гелі: ланцюговий та ламелярний

Як відомо [1], для структури гелів характерна значна неупорядкованість. Зрозуміло, що сам по собі останній термін залишається невизначеним доки не буде визначено термін “порядок”. Інакше кажучи, ведучи мову про неупорядкованість гелю, ми тим самим передбачаємо існування деякої ідеальної – повністю впорядкованої структури. Назвемо її ідеальним гелем.

Розглянемо можливий варіант такої структури.

При вирішенні цієї задачі матимемо на увазі ту обставину, що гелі, за своїми властивостями займають проміжне положення між рідиною та твердим тілом, і певні ознаки, притаманні твердому тілу, спостерігаються також у гелях [1]. Цей факт нашою думкою визначити структуру ідеального гелю по аналогії з тим, як питання про ідеальну структуру вирішується в фізиці твердого тіла.

В фізиці твердого тіла такою структурою є ідеальний кристал – ґратка [12, 13], якій вже за визначенням властивий дальній порядок. Отже, вибравши шлях аналогій із твердим тілом, ми за цією логікою мусимо припустити існування ґратки в ідеальному гелі. Таку ґратку може утворити лише каркас. Як було показано, існує два типи каркасів, тому і ґраток, утворених ними, має бути дві.

Одну з ґраток називатимемо ідеальним С-каркасом, іншу – ідеальним L-каркасом. Відповідні гелі з такими каркасами називатимемо: ідеальний С-гель та ідеальний L-гель. Елементарні комірки першого та другого гелів наведені відповідно на рис. 2, а та б.

На рис. 2, с зображено переріз елементарної комірки, наведеної на рис. 2, б, площиною Р. Частинки полімеру зображено незафарбованими, частинки розчинника – зафарбованими кружальцями.

Як видно з рис. 2, а, в ідеальному С-гелі ланцюги мають повністю випрямлену конфігурацію: вони направлені уздовж кристалографічних осей X, Y, Z.

Згідно з рис. 2, б та с, в ідеальному L-гелі частинки полімеру заповнюють грані елементарної комірки. Ланцюги, що складаються з цих частинок, направлені уздовж осей X, Y, Z (рис. 2, d). Як видно з рис. 2, б та с, частинки розчинника замкнені у межах елементарної комірки L-каркаса, не маючи змоги переміщуватись по своєму об'ємові, зайнятому ідеальним L-гелем.

Позначимо через  $a_C$  та  $a_L$  трансляційні періоди ґраток ідеального С- та L-гелю, через  $n$  – кількість частинок полімеру, через  $N$  – загальну кількість частинок в гелі. Концентрацію  $\phi$  полімеру в гелі визначатимемо рівністю

$$\phi = n/N. \quad (6)$$

Згідно з рівностями (6) та (2) величина  $\phi$  являє собою відносний об'єм, зайнятий в гелі полімером. Вважатимемо виконаною умову

$$\phi \ll 1. \quad (7)$$

Очевидними наслідками цієї умови є нерівності

$$a_C, a_L \gg b. \quad (8)$$

В моделях, зображених на рис. 2, субланцюг та ламела мають відповідно розміри  $a_C \times b \times b$  та

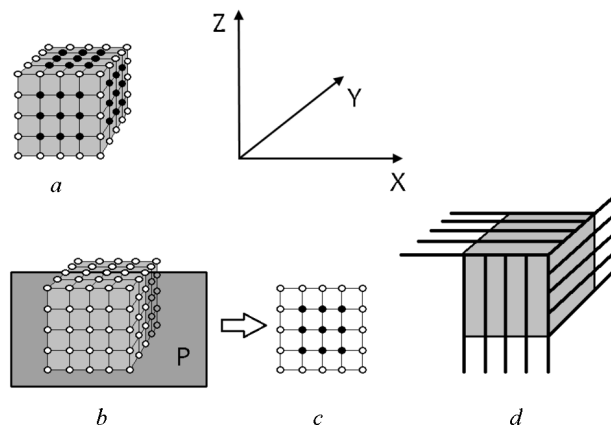


Рис. 2. Типи ідеального гелю: ланцюговий (а) та ламелярний (b, c, d)

$a_L \times a_L \times b$ . Виконавши елементарні геометричні розрахунки, для відносних об'ємів  $\theta_C$  та  $\theta_L$ , зайнятих полімером в ідеальних С- та L-гелях, отримаємо рівності

$$\theta_C = 3b^2/a_C^2, \quad (9)$$

$$\theta_L = 3b/a_L, \quad (10)$$

з яких випливають формули

$$a_C = b(3/\phi)^{1/2}, \quad (11)$$

$$a_L = 3b/\phi. \quad (12)$$

Відповідно для кількості субланцюгів  $n_C$  та  $n_L$  маємо формули

$$n_C = 3N(\phi/3)^{3/2}, \quad (13)$$

$$n_L = 3N(\phi/3)^3. \quad (14)$$

Формули (10)–(14) виражають характерну особливість ґраток ідеального гелю: параметри цих ґраток залежать від концентрації полімеру в гелі.

#### 4. Реальний ламелярний гель

Як відомо, в фізиці твердого тіла, поряд із моделлю ідеального кристала, для опису поведінки твердих тіл застосовують різноманітні моделі реальних кристалів. Утворення реального кристала розглядають як наслідок накопичення в ґратці дефектів [12]. Йдеться про дефекти різної розмірності: нульвимірні і т. д. До нульвимірних відносять вид дефектів, які називають дефектами заміщення. Такими дефектами є домішкова частинка та вакансія.

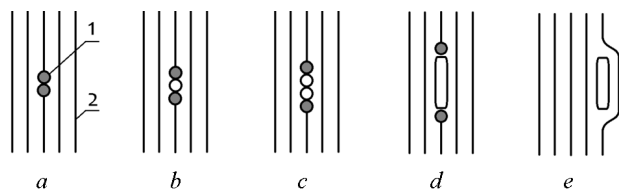


Рис. 3. Типи дефектів ламелярного каркаса: пара домішкових частинок (a), вакансія (b), бівакансія (c), комплекси вакансій (щілини) (d, e). Номерами позначено: 1 – ланцюг, 2 – кінцева ланка

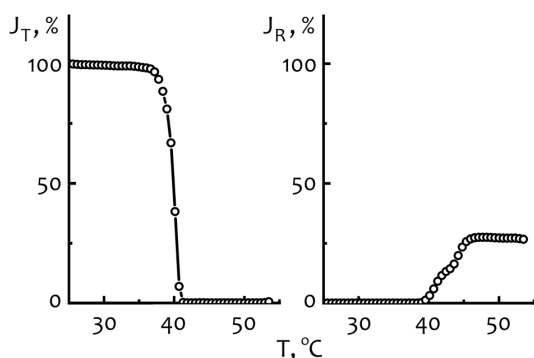


Рис. 4. Температурна залежність інтенсивностей прохідного ( $J_T$ ) та відбитого ( $J_R$ ) світлових пучків для 2% (мас.) водного розчину гідроксипропілцелюлози. Швидкість нагріву  $1,1\text{ }^{\circ}\text{C/хв}$ .

Продовжуючи притримуватись підходу, прийнятому в фізиці твердого тіла, перенесемо уявлення про дефекти структури в фізику гелів, маючи на увазі L-каркас та використовуючи терміни “реальний L-каркас” та “реальний L-гель”.

Прийнято розділяти внутрішні та кінцеві ланки полімерного ланцюга. Останні відрізняються від перших за своїм хімічним складом та характером взаємодії з сусідніми частинками. Кінцеві ланки порушують просторову періодичність ґратки гелевого каркаса. Відповідно ці ланки відіграють роль домішкових частинок (за термінологією, прийнятою в фізиці твердого тіла [13]).

На рис. 3, a наведений один з можливих варіантів розташування кінцевих ланок в ламелі. В цьому варіанті вказані ланки є найближчими сусідами, і їх, в принципі можна розглядати як єдиний нульвимірний дефект – пару домішкових частинок. Кінцеві ланки можуть розташовуватись уздовж напрямку ланцюгів на певній відстані одна від одної. Якщо ця відстань дорівнює  $b$ , то утворена пустота (рис. 3, b) являє собою вакансію (за

термінологією, прийнятою в фізиці твердого тіла), якщо відстань дорівнює  $2b$ , то йдеться про бівакансію (рис. 3, c) і т. д. При відстанях, які суттєво перевищують  $b$ , йдеться про виникнення одномірного дефекта – комплексу вакансій (щілини) (рис. 3, d). Щілина може виникнути також внаслідок вигину ланцюга (рис. 3, e).

Наявність в ламелах реального L-гелю пустот, зображених на рис. 3, дозволяє частинкам розчинника переміщуватись з однієї комірки в іншу, мандруючи у такий спосіб по всьому об'ємові, зайнятому гелем.

Вважатимемо, що вакансії та вакансійні комплекси утворюються за нефлуктуаційним механізмом [14], що має забезпечити в ламелах кількість пустот, необхідну для переміщення частинок в об'ємі гелю.

Відповідь на питання, чи існує в дійсності ламелярний гель, як те передбачає топологія, може дати вимірювання мутності полімерного розчину в процесі золь-гель переходу.

Дійсно, в золь-структурі в ролі розсіювачів світла виступають полімерні ланцюги. При утворенні С-гелю ця роль переходить до субланцюгів. Тому в розбавлених розчинах, коли кількість ланцюгів незначна, розсіяння світла, спричинене виникненням С-гелю, не може привести до помітного відбивання світла.

Як уже згадувалось, при виникненні ламелярного гелю полімерні ланцюги утворюють поверхні, складовими яких є ламели. Сукупність таких поверхонь є непроникною для світлових хвиль, тобто при утворенні ламелярного гелю має спостерігатись відбивання світла.

За допомогою методики, описаної в [15], досліджувалось розсіяння світла 2% (мас.) водним розчином гідроксипропілцелюлози. Результати експерименту наведені на рис. 4.

Аналіз рис. 4 показує, що інтенсивність світла, що проходить крізь полімерний розчин, практично обертається на нуль при температурі, вищій за  $41\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Цей факт свідчить про те, що в досліджених розчинах утворюється ламелярний гідрогель.

Згідно з літературними даними [16], розмір полімерної ланки гідроксипропілцелюлози  $b \simeq 0,8\text{ нм}$ . Розрахований за формулою (12) розмір ламели в гідрогелі, дослідженному в даному експерименті, дорівнює приблизно  $150\text{ нм}$ .

## 5. Транспорт води через поверхню гідрогелів

Як відомо [2–5], гідрогелі широко використовуються в медицині як компонент пов'язок для ран. Фактором, який прискорює процес загоєння ран, є підтримання вологості рани, отже гідрогель відіграє роль “донора вологості”. Гідрогель, призначений для цієї ролі, має відповідати, принаймні, двом вимогам:

- 1) утримувати воду в незмінній кількості протягом усього часу терапевтичної дії пов'язки;
- 2) мати можливість регулювання кількості води, яка надходить до рани.

Ламелярний гідрогель відповідає цим вимогам у більшій мірі, ніж ланцюговий. Дійсно, перша вимога забезпечується тим, що вода знаходиться у комірках з полімерними стінками. Друга вимога може бути виконана через зміну кількості порожнин у ламелах. Таких змін можна досягнути шляхом введення в гель іонів [17, 18].

В [19] було показано, що для рідин розмір фізичного нескінченно малого об'єму (області, де встановлюється локальна рівновага) за порядком величини становить 100 нм. Це означає, що комірка ламелярного гідрогелю, яка має розмір  $a_L \simeq 150$  нм, з термодинамічної точки зору є фізичним нескінченно малим об'ємом. Ця обставина дозволяє розглядати ламелярний гідрогель як певний континуум, на якому визначено скалярне поле  $C(\mathbf{r})$ , де  $C$  – концентрація молекул води,  $\mathbf{r}$  – радіус-вектор точок континууму (за фізичним змістом це радіус-вектор центра інерції комірки). Поведінку такого поля має визначати рівняння дифузії:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_e \Delta C, \quad (15)$$

де  $D_e$  – ефективний коефіцієнт дифузії.

Позначимо розмір отвору – вакансійного комплексу, що утворюється, через  $f \times g \times b$  (грані елементарної комірки). Визначимо залежність  $D_e$  від параметрів структури ламелярного кристала:  $f$ ,  $g$  та  $a_L$ .

Слідуючи [20], запишемо формулу для середньої швидкості  $v$  поступального дифузійного руху частинок у рідині

$$v = D/(bg), \quad (16)$$

де  $D$  – коефіцієнт самодифузії частинок.

В рамках мікроскопічної моделі, для кількості частинок (молекул води)  $Q$ , що в середньому проходять крізь отвір за одиницю часу, маємо вираз

$$Q = vCf g. \quad (17)$$

Відповідно потік частинок для континуальної моделі визначається формулою

$$J = Q/a_L^2 = vCf g/a_L^2. \quad (18)$$

Для цієї ж моделі потік крізь грань комірки визначається формулою

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x}. \quad (19)$$

Записуючи похідну у формулі (19) у наближеному вигляді

$$\partial C / \partial x \sim C/a_L \quad (20)$$

і порівнюючи вирази (18) та (19), одержуємо

$$D_e = D \frac{f g}{b_s a_L}, \quad (21)$$

що разом із формулою (15) визначає характер транспорту води крізь поверхню гідрогелю.

## 6. Висновки

На сьогодні у фізиці гелів загально прийнято, що каркас – це сітка, утворена полімерними ланцюгами, які з'єднуються один з одним у вузлах. В даній статті показано, що не лише сітка може служити моделлю каркаса. Існують гелі, в яких каркас утворено ламелами, що складаються із щільно прилягаючих один до одного полімерних ланцюгів. Такі гелі логічно називати ламелярними.

Каркас ідеального ламелярного гелю є ґраткою. В такій ґратці стінки елементарної комірки – це ламели з розміром порядку 100 нанометрів.

Каркас реального ламелярного гелю – це ґратка, ламели якої містять дефекти типу вакансійних комплексів. Останні є отворами в ламелах. Завдяки цим отворах частинки розчинника можуть переходити з одної комірки в іншу, переміщуючись по всьому об'ємові, зайнятому гелем.

Як відомо [2–5], гідрогелі широко застосовуються в тканинній інженерії. На сьогодні в цій галузі існує проблема створення штучних матеріалів,

які могли б замінити жорсткі біотканини – такі як м'язи, кровеносні судини та ін. Ламелярні гідрогелі з їхнім жорстким каркасом можуть допомогти вирішити цю проблему. Наприклад, в роботах [21, 22] показано, як на основі водорозчинних дериватів целюлози за певних температурних умов та присутності зв'язуючих агентів полімеризації будуються ламелярні полімерні матриці із заданими фізико-механічними властивостями.

Питанням, що має важливе прикладне значення, є також створення мікрогелів на основі розбавлених полімерних розчинів з іонними домішками [18]. Такі мікрогелі складаються з полімерних агрегатів (кластерів), які теж мають ламелярну структуру. Шляхом введення іонів у такі розчини можна змінювати розмір ламел та відповідну пористість кластерів, що дозволяє використовувати мікрогелі як носії активних речовин у сучасних технологіях виготовлення нанокомпозитних плівок, каталізаторів, бактерицидних полімерних плівок та систем доставки ліків [23–26]. Як впливає з одержаної вище формули (21), транспорт розчинника через поверхню гідрогелю визначається геометричними характеристиками елементарної комірки. Отже, швидкість вивільнення препарату визначатиметься пористістю гідрогелю, яка може бути створена шляхом спрямованої полімеризації з метою одержання ламелярного каркаса із заданою структурою [27].

*Робота була підтримана Міністерством освіти і науки України в рамках проекту “Молекулярні механізми фізичних процесів, які визначають застосування гідрогелів у військово-медичних технологіях” (№ 0123U101955).*

1. P.-G. Gennes. *Scaling Concepts in Polymer Physics* (Cornell University Press, 1979) [ISBN: 978-0801412035].
2. E. Caló, V.V. Khutoryanskiy. Biomedical applications of hydrogels: A review of patents and commercial products. *Eur. Polym. J.* **65**, 252 (2014).
3. R. Barbucci. *Hydrogels: Biological Properties and Applications* (Springer-Verlag Italia, 2009) [ISBN: 978-8847011038].
4. S. Rimmer. *Biomedical Hydrogels: Biochemistry, Manufacture and Medical Applications* (Woodhead Publ., 2016) [ISBN: 978-0081017418].
5. N.A. Peppas. *Hydrogels in Medicine and Pharmacy: Properties and Applications (Routledge Revivals)* (CRC Press Inc., 2019) [ISBN: 978-0367261115].
6. M. Karg, A. Pich, T. Hellweg, T. Hoare, L.A. Lyon, J.J. Crassous, D. Suzuki, R.A. Gumerov, S. Schneider, I.I. Potemkin, W. Richtering. Nanogels and microgels: From model colloids to applications, recent developments, and future trends. *Langmuir* **35**, 6231 (2019).
7. T. Okano. *Biorelated Polymers and Gels: Controlled Release and Applications in Biomedical Engineering (Polymers, Interfaces and Biomaterials)* (Academic Press: Cambridge, 1998) [ISBN: 978-0125250900].
8. K. Kamide. *Cellulose and Cellulose Derivatives: Molecular Characterization and Its Applications* (Elsevier Science, 2005) [ISBN: 978-0080454443].
9. S.M.F. Kabir, P.P. Sikdar, B. Haque, M.A.R. Bhuiyan, A. Ali, M.N. Islam. Cellulose-based hydrogel materials: Chemistry, properties and their prospective applications. *Prog. Biomater.* **7**, 153 (2018).
10. A.R. Khokhlov, A.Yu. Grosberg, V.S. Pande. *Statistical Physics of Macromolecules* (American Institute of Physics, 1994) [ISBN: 978-1563960710].
11. K. Kuratowski. *Introduction to Set Theory and Topology* (Pergamon Press, 1972) [ISBN: 978-0080161600].
12. J.M. Ziman. *Models of Disorder: The Theoretical Physics of Homogeneously Disordered Systems* (Cambridge University Press, 1979) [ISBN: 978-0521292801].
13. J.M. Ziman. *Principles of the Theory of Solids* (Manohar Publishers & Distributors, 2013) [ISBN: 978-1139644075].
14. L.A. Bulavin, O.Yu. Aktan, Y.F. Zabashta. Vacancies in oligomer crystals. *Polym. Sci. Ser. A* **51** 1023, (2009).
15. V.I. Kovalchuk, O.M. Alekseev, M.M. Lazarenko. Turbidimetric monitoring of phase separation in aqueous solutions of thermoresponsive polymers. *J. Nano- Electron. Phys.* **14**, 01004 (2022).
16. B. Wunderlich. *Macromolecular Physics* (Academic Press, 2013) [ISBN: 978-0127656038].
17. Yu.F. Zabashta, V.I. Kovalchuk, O.S. Svechnikova, L.A. Bulavin. Determination of the surface tension coefficient of polymer gel. *Ukr. J. Phys.* **67**, 365 (2022).
18. Yu.F. Zabashta, V.I. Kovalchuk, S.V. Gryn. Phase transition and microgel formation in polymer solutions with salt ions. *Ukr. J. Phys.* **70**, 200 (2025).
19. L.A. Bulavin, A.N. Alekseev, L.N. Garkusha, Yu.F. Zabashta, S.Yu. Tkachev. Application of viscosimetric method to study configurational transitions in glucose aqueous solutions. *Ukr. J. Phys.* **56**, 450 (2011).
20. J. Frenkel. *Kinetic Theory of Liquids* (Dover Publications, 1955) [ASIN: B000ELFWHG].
21. A. Tialiou, Z.H. Athab, R.T. Woodward, V. Biegler, B.K. Keppler, A.F. Halbus, M.R. Reithofer, J.M. Chin. Fabrication of graded porous structure of hydroxypropyl cellulose hydrogels via temperature-induced phase separation. *Carbohydr. Polym.* **315**, 120984 (2023).
22. R.S. Dezotti, L.M. Furtado, M. Yee, T.S. Valera, K. Balaji, R.A. Ando, D.F.S. Petri. Tuning the mechanical and thermal properties of hydroxypropyl methylcellulose cryogels with the aid of surfactants. *Gels* **7**, 118 (2021).
23. A.R. Khokhlov, E.E. Dormidontova. Self-organization in ion-containing polymer systems. *Phys.-Uspekhi* **40**, 109 (1997).

24. L.A. Bulavin, N.I. Lebovka, Yu.A. Kyslyi, S.V. Khrapatyi, A.I. Goncharuk, I.A. Mel'nyk, V.I. Koval'chuk. Microstructural, rheological, and conductometric studies of multi-walled carbon nanotube suspensions in glycerol. *Ukr. J. Phys.* **56**, 217 (2011).
25. M. Stoian, T. Maurer, S. Lamri, I. Fecete. Techniques of preparation of thin films: Catalytic combustion. *Catalysts* **11**, 1530 (2021).
26. C. Trinh, Y. Wei, A. Yadav, M. Muske, N. Grimm, Z. Li, L. Thum, D. Wallacher, R. Schlögl, K. Skorupska, R. Schlatmann, D. Amkreutz. Reactor design for thin film catalyst activity characterization. *Chem. Eng. J.* **477**, 146926 (2023).
27. X. Yao, H. Chen, H. Qin, Qi-Hang Wu, Huai-Ping Cong, Shu-Hong Yu. Solvent-adaptive hydrogels with lamellar confinement cellular structure for programmable multimodal locomotion. *Nat. Commun.* **15**, 9254 (2024).

Одержано 26.03.25

*Yu.F. Zabashta, V.I. Kovalchuk, L.A. Bulavin*

#### LAMELLAR GELS: STRUCTURAL PECULIARITIES

The possibility of the existence of lamellar gels has been formulated using the topological approach. The structural peculiarity of the gels of this type consists in that their framework is formed by lamellae. A model of an ideal lamellar gel has been proposed, and its structural parameters have been calculated. The type of defects that can emerge in a real lamellar gel has been determined. A formula has been derived that describes water transport through the surface of lamellar hydrogels. The possibility of the existence of lamellar gels has been confirmed experimentally via light scattering in the aqueous solution of hydroxypropyl cellulose.

*Keywords:* lamellar gel, hydroxypropylcellulose, light scattering.