



## ХІМІЯ

УДК 544.773.43+664

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.14>

### КІНЕТИКА ВИРОЩУВАННЯ КІЛЕЦЬ ЛІЗЕНГАНГА В ЕЛАСТИЧНИХ ЖЕЛАТИНОВИХ ГЕЛЯХ

**О. М. Камінський<sup>1</sup>, Р. О. Денисюк<sup>2</sup>, М. В. Чайка<sup>3</sup>, С. В. Писаренко<sup>4</sup>,  
О. С. Євдоченко<sup>5</sup>, Д. Ю. Панасюк<sup>6</sup>**

*Гелі широко використовуються в харчовій, фармацевтичній та косметичній промисловості. Гелями також є деякі побутові (рідке мило, миючий засіб, гелеві кульки для прання, гель-лаки тощо) та харчові (холодець, фруктове желе) речовини, які людина використовує повсякчас. Прикладами гелів можуть служити застигли розчини желатину, агару, пектину, силікатної кислоти; целулоїд, клей, текстильні волокна тощо.*

<sup>1</sup> кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії  
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)  
e-mail: alexkamin@ukr.net  
ORCID: 0000-0003-1971-8437

<sup>2</sup> кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії  
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)  
e-mail: denisuknet@ukr.net  
ORCID: 0000-0003-3077-3795

<sup>3</sup> кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії  
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)  
e-mail: laridae92@gmail.com  
ORCID: 0000-0001-5356-9856

<sup>4</sup> доктор філософії з галузі знань Хімічна та біоінженерія,  
асистент кафедри хімії  
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)  
e-mail: snezhunka1107@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-5978-487X

<sup>5</sup> доктор філософії з галузі знань 01 Освіта/Педагогіка, доцент кафедри хімії  
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)  
e-mail: evdochenko\_lena@ukr.net  
ORCID: 0000-0001-6338-5372

<sup>6</sup> заступник завідувача відділу досліджень матеріалів, речовин і виробів,  
завідувач сектору фізико-хімічних досліджень  
(Житомирський НДЕКЦ МВС України, м. Житомир),  
асистент кафедри хімії  
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)  
e-mail: dima.panasuk261195@gmail.com  
ORCID: 0009-0005-9490-1823

Особливо широко гелі представлені в рослинних і тваринних організмах, наприклад, м'язова, нервова і сполучна тканини, склоподібне тіло ока, різного виду біологічні мембрани є прикладами складних гелів. Вивчення фізико – хімічних властивостей гелів, можливості протікання реакції у гелях є актуальною задачею.

У роботі досліджено кінетику вирощування кілець Лізенганга в еластичних желатинових гелях.

Показано, що однією з умов утворення чітких кілець Лізенганга в гелі є те, що перший розчин електроліту, який змішується з розчином желатину, повинен бути низької концентрації (до 1 %), а другий – максимально високої (до 90 %).

Встановлено, що протягом першої доби у гелі з  $Ag_2Cr_2O_7$  утворилось 14 кілець Лізенганга, відстань між кільцями становила 0,1 см, а сумарний діаметр становив 6-7 см. Протягом наступних днів ніяких змін не спостерігалось, окрім того, що гель висох і став твердим. Такий сухий гель не зазнавав ніяких змін навіть, протягом декількох місяців.

Показано, що протягом 3-12 годин утворилось два кільця з  $Cu(OH)_2$ , проте, на відміну від кілець  $Ag_2Cr_2O_7$ , вони були не чітко виражені. За добу сумарний діаметр плями на гелі подвоївся, проте кількість кілець не змінилася. Єдина помітна зміна, яка відбулася за 5 днів, це те, що цей сухий гель у чашці Петрі потрескався і став крихким. Це можливо пов'язано з утворенням солей калію з гідролізатом білкових молекул желатину.

Визначено, що протягом восьми годин на весь діаметр чашки Петрі (12 см) вирости кільця  $BaSO_4$ , проте чіткої межі між кільцями не вдалося зафіксувати. Протягом 1 доби змін у цьому гелі не спостерігалось. За 2-3 доби гель почав засихати, оскільки почав випаровуватись розчинник (вода).

Процес утворення тріщин не спостерігався.

Показано, що найбільше утворюється кілець з  $Ag_2Cr_2O_7$ , а найменше – з  $BaSO_4$ . Таку залежність можна пояснити різною розчинністю утворених солей у гелях та їх можливістю впливати на стійкість гелевої сітки у об'ємі гелю.

**Ключові слова:** гелі, хімічні реакції у гелях, кільця Лізенганга, реакції осаження, хімія поверхні, фізична та колоїдна хімія, харчова хімія.

## KINETICS OF GROWTH OF LYZENGANG RING IN ELASTIC GELATIN GELS

**O. M. Kaminskiy, R. O. Denysiuk, M. V. Chayka, S. V. Pysarenko,  
O. S. Yevdochenko, D. U. Panasiuk**

Gels are widely used in the food, pharmaceutical and cosmetic industries. Gels are also some household (liquid soap, detergent, gel balls for washing, gel nail polishes) and food (jelly, fruit jelly) substances that people use all the time.

Examples of gels can be solidified solutions of gelatin, agar, pectin, silicic acid; celluloid, glue, textile fibers, etc.

Gels are especially widely represented in plant and animal organisms, for example, muscle, nerve and connective tissue, the vitreous body of the eye, various types of biological membranes are examples of complex gels. Studying the physics and chemical properties of gels, the possibility of reactions in gels is an urgent task.

The work investigates the kinetics of Lysengang ring growth in elastic gelatin gels. It is shown that one of the conditions for the formation of clear Lisengang rings in the gel is that the first electrolyte solution, which is mixed with the gelatin solution, should be of low concentration (up to 1%), and the second should be as high as possible (up to 90%).

It was found that during the first day, 14 Lisengang rings were formed in the  $Ag_2Cr_2O_7$  gel, the distance between the rings was 0.1 cm, and the total diameter was 6-7 cm. During the following days, no changes were observed, except that the gel dried and became solid. Such a dry gel did not undergo any changes even for several months.

It was shown that two rings of  $Cu(OH)_2$  were formed within 3-12 hours, however, unlike  $Ag_2Cr_2O_7$  rings, they were not clearly defined. During the day, the total diameter of the spot on the gel doubled, but the number of rings did not change. The only noticeable change that occurred after 5 days was that this dry gel in the Petri dish cracked and became brittle. This is possibly due to the formation of potassium salts with the hydrolyzate of gelatin protein molecules.

It was determined that  $BaSO_4$  rings grew over the entire diameter of the Petri dish (12 cm) within eight hours, but a clear boundary between the rings could not be recorded. No changes were observed in this gel within 1 day. In 2-3 days, the gel began to dry, as the solvent began to evaporate. The process of formation of cracks was not observed.

It is shown that the largest ring is formed from  $Ag_2Cr_2O_7$ , and the least from  $BaSO_4$ . This dependence can be explained by the different solubility of the formed salts in gels and their ability to influence the stability of the gel network in the gel volume.

**Key words:** gels, chemical reactions in gels, Lisegang rings, precipitation reactions, surface chemistry, physical and colloidal chemistry, food chemistry.

### Вступ

Гелі широко застосовуються в мікробіологічних, санітарно-гігієнічних і клінічних лабораторіях для приготування поживних середовищ, для проведення деяких видів електрофорезу, імуноелектрофорезу і для гелі-фільтрації. Поліакріламідний, агаровий і крохмальний гелі використовуються в якості носіїв при електрофорезі в лабораторній діагностиці таких захворювань, як ревматизм, інфаркт міокарда, пневмонії, шизофренія, таласемія та ін. (COU 24.5-37-103:2004 Гелі косметичні. Загальні технічні умови, 2004, Гелі, їх виникнення, будова і властивості).

Процес желатинування (гелеутворення) речовин та розчинів також відіграє велику роль у технології виробництва штучного волокна, деяких вибухових речовин, кондитерській справі тощо (Баранова, 2010).

Як відомо, хімічні процеси в гелях протікають без перемішування, оскільки дифузія речовин виражена слабо і відсутні турбулентні потоки. Завдяки таким властивостям гелів, в середовищі ліогелів та ксерогелів вдається вирощувати кристали малорозчинних сполук досить значних розмірів, концентричні кільця в гелі (кільця Лізенганга) тощо. Також сучасна хімія нанорозмірних частинок не обходиться без використання золь – гелі методів одержання речовин (Камінський та ін., 2013; Petranovska et al., 2015; Abramov et al., 2017).

Гелі також знаходять широке застосування у процесах адсорбції забруднювачів навколишнього середовища, таких як іони важких металів, промислові барвники, залишки продуктів органічного та фармацевтичного синтезу тощо. Використання гелевих адсорбентів вважається екологічно чистим завдяки низькій вартості вихідних матеріалів, а також можливості їх одержання з біоматеріалів (Belala et al., 2011; Abdolali et al., 2014). Наприклад, натрій альгінат є природним полісахаридом, який складається з великої кількості гідроксильних і карбоксильних груп, тому він використовується як сировина для адсорбції іонів важких металів із водних розчинів. Шляхом поверхневого прищеплення та зшивання адсорбенти, синтезовані з натрій альгінату, характеризуються високими адсорбційно-десорбційними показниками щодо

іонів важких металів. Однак низька фізична міцність і звичайна термостабільність значно обмежили використання матеріалів на основі натрій альгінату в промислових цілях. Крім того, у деяких дослідженнях спостерігалось відновлення певних іонів металу, механізм якого не з'ясований.

У роботі авторами (Gao et al., 2020) підсумовано розробку адсорбентів на основі натрій альгінату, включаючи фізико-хімічні властивості полімеру, модифікацію натрій альгінату, композиційних матеріалів на основі цього полімеру, адсорбційну здатність, а також механізми адсорбції. Хелатування, електростатична взаємодія, іонний обмін, відновлення та фотокаталітичне відновлення розглянуто як основні механізми процесу адсорбції.

Досліджено адсорбцію та розділення шестивалентного хрому за допомогою зшитого конденсованого танінового гелю у роботі (Nakano et al., 2001). Хром (VI) окислює танін за допомогою окисно-відновної реакції з утворенням карбоксильної групи на таніновому гелі. Cr було відновлено з Cr(VI) до Cr(III) за допомогою таніну та адсорбовано на карбоксильних і гідроксильних групах танінового гелю за допомогою іонообмінного методу.

Авторами (Камасі & Камасі, 2024) проведено синтез біoadсорбентів на основі натрій альгінату та наночастинок насіння айви методом іотропного гелеутворення. Дані сорбенти використано для адсорбції метиленового синього. Структуру біoadсорбентів і наночастинок досліджено за допомогою інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є (FT-IR), скануючої електронної мікроскопії (SEM), дифракції рентгенівських променів (XRD), термогравіметрії (TG) і Брунауера-Еммета-Теллера (БЕТ) аналізів. Визначено умови адсорбції, зокрема: вплив рН розчину, температури, час контакту, початкової концентрації барвника та дози адсорбенту. Для аналізу результатів експерименту використано моделі кінетики псевдопершого та другого порядку, ізо-терми Ленгмюра та Фрейндліха. Показано, що експериментальні результати можна описати кінетичною моделлю псевдодругого порядку та ізотермою Ленгмюра. Найвища адсорбційна ємність барвника метиленового синього 192,3 мг/г спостерігається за темпе-

ратури 60 °C у присутності натрій альгінату, що містить 5,0% наночастинок насіння айви при рН 7. Також розраховано термодинамічні параметри адсорбції ( $\Delta G^\circ$ ,  $\Delta H^\circ$  та  $\Delta S^\circ$ ).

У дослідженні (Grigoraş et al., 2022) одержано адсорбент на основі гідрогелю (гелевих кульок), синтезованого шляхом захоплення порошку вишневих кісточок на хітозані. Порошок, одержаний із висушених вишневих кісточок, обережно змішували протягом 24 год з розчином хітозану в оцтовій кислоті. Потім суспензію додавали краплинами в суміш метанолу з натрій гідроксидом і залишали за 4 °C ще на 24 години. Потім гідрогелеві кульки нагрівали зі зворотним холодильником у суміші метанол-глутаровий альдегід протягом 6 годин за 70 °C, щоб забезпечити хорошу стабільність у кислому середовищі. Синтезований матеріал охарактеризовано методами скануючої електронної мікроскопії, інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є та визначено точки нульового заряду. Досліджено адсорбційну здатність видаляти дві моделі азобарвників (кислотний червоний 66 і реактивний чорний 5), що існують в одній формі та в бінарній суміші. Однак, на думку авторів даної роботи, дослідження хімічних процесів, які протікають у об'ємній матриці гелів та можливості взаємодії хімічних речовин між собою у середовищі гелю також залишаються актуальними завданнями. Метою дослідження є вивчення кінетики процесів росту кілець Лізенганга у середовищі еластичного гелю желатини.

#### Матеріал і методи

У якості вихідних матеріалів використано такі вихідні реактиви та посуд: желатин швидко розчинний ТМ «Мрія»;  $K_2Cr_2O_7$  (ч.д.а.);  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$  (ч.);  $BaCl_2 \cdot 2H_2O$  (ч.);  $AgNO_3$  (ч.д.а.);  $KOH$  (ч.);  $H_2SO_4$  конц. (ч.д.а.); хімічні склянки на 250 мл; скляні чашки Петрі та штативи з лапками.

Відомо, що однією з умов утворення чітких кілець Лізенганга в гелі є те, що перший розчин електроліту, який змішується з розчином желатини, повинен бути низької концентрації (до 1%), а другий – максимально високої (до 90%).

В якості об'єктів для дослідження було використано солі сульфати, дихромати, хлориди та нітрати, оскільки дані аніони сприяють процесам гелеутворення (займають початкові ланки ліотропних рядів).

Враховуючи те, що розчинність зазначених вище речовин у воді різна (І. О. Усков та ін., 1995), нами було обрано  $K_2Cr_2O_7$ ,

$CuSO_4 \cdot 5H_2O$  та  $BaCl_2 \cdot 2H_2O$  в якості розчинів електролітів низької концентрації, а  $AgNO_3$ ,  $H_2SO_4$  та  $KOH$  відповідно, як розчини високої концентрації.

Вихідний водний розчин желатину готували відважуючи на електронних вагах 7,5 г желатину, переносили його в хімічну склянку, доводили до мітки 50 мл гарячою дистильованою водою (температура 90–95 °C) та інтенсивно перемішували розчин до повного розчинення желатину. Одержаний розчин гелю ще гарячим фільтрували через ватяний фільтр.

Розчини низької концентрації (0,5%) солей по 50 мл кожен готували відповідно з врахуванням молярних мас кристалогідратів. На електронних вагах відважували 0,5 г  $K_2Cr_2O_7$ ; 0,39 г  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$  та 0,29 г  $BaCl_2 \cdot 2H_2O$  відповідно; переносили їх у окремі мірні колби та доводили до мітки 50 мл дистильованою водою. Кожен з розчинів добре перемішували до повного розчинення солей.

Розчини високої концентрації (90%) готували у хімічних склянках шляхом відважування кристалічних речовин  $AgNO_3$  та  $KOH$  відповідної маси та доведенням до мітки 10 мл дистильованою водою кожен. Розчин сульфатної кислоти готували шляхом покрупельного додавання 9 мл конц.  $H_2SO_4$  (98%) до 1,5 мл дистильованої води. Відповідні розчини електролітів готували безпосередньо перед проведенням експерименту, попередньо охолодивши розчини  $KOH$  та  $H_2SO_4$  до кімнатної температури.

У хімічній склянці ретельно змішували 50 мл 15% свіжо виготовленого гарячого розчину желатину та 50 мл 0,5% розчину відповідного електроліту низької концентрації (1:1 за об'ємом). Утворений теплий розчин желатину з електролітом обережно розливали у чашки Петрі шаром на 1/2 об'єму посудини та залишали на 2 години для повного застигання гелю.

Далі у центр утвореного гелю піпеткою капали по 10 краплин 90% розчину іншого електроліту (Терещук та ін., 2020; Чуян та ін., 2023). Реакційну суміш поміщали у затемнене місце і фіксувати утворення кілець протягом 1 год; 3 год; 6 год; 12 год; 1 доби; 2 доби та 3 доби.

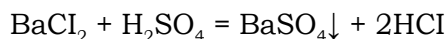
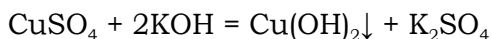
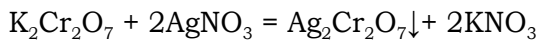
#### Результати та обговорення

В основі вирощування кілець Лізенганга в гелі лежать реакції обміну між двома електролітами з утворенням осаду.

Слід відмітити, що важливою особливістю протікання таких реакцій є те, що

у середовищі гелей вони відбуваються без перемішування, оскільки дифузія речовин одна в іншу майже відсутня.

Рівняння хімічних реакцій, які відбуваються між електролітами, можна представити у вигляді:



Відповідно, має утворюватись осад (а в гелі – кільця)  $\text{Ag}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  коричнево – чорного кольору,  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  – синього кольору, а  $\text{BaSO}_4$  – білого кольору.

Утворені кільця Лізенганга нагадують шарову структуру полосатих агатів.

На рис. 1 показано фотографії першого етапу желатинізації зразків розчинів у чашках Петрі до вирощування кілець Лізенганга.

Як видно з одержаних фотографій в чашках Петрі, гелі з розчином  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  рис. 1 а та гелі з розчином  $\text{CuSO}_4$  рис. 1 б абсолютно прозорі, а гелі, що містять  $\text{BaCl}_2$  рис. 1 в матовий, що, можливо, пов'язано з присутністю нерозчинних домішок у вихідному препараті  $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

На рис. 2 показано фотографії кілець Лізенганга, які утворилися в першу годину після додавання розчину високої концентрації електроліту.

Показано, що протягом першої години після додавання відповідного концентрованого розчину до гелю в усіх випадках колір цієї рідкої плями в центрі гелю змінювався на колір відповідного осаду.

Встановлено, що за першу годину утворення коричневого осаду  $\text{Ag}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  (рис. 2(а)) утворилось одне чітке кільце Лізенганга, а у випадку синього осаду  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  та білого осаду  $\text{BaSO}_4$  рис 2 б, 2 в кільця утворились не чіткі.

За допомогою лінійки встановлено, що діаметр перших кілець  $\text{Ag}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  та  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  становив приблизно 3,5 см, а діаметр кільця осаду  $\text{BaSO}_4$  становив 5,5 см, що майже в два рази більше від кілець а та б. Можливо це пов'язано з рідким станом сульфатної кислоти як вихідного прекурсора, а також можливо, що у сильнокислому середовищі рухливість іонів в об'ємі гелю зростає.

В ході експерименту встановлено, що насичений розчин електроліту, який додавали до відповідного гелю, спочатку утворював пляму розчину на поверхні (розчин розтікався, проте видно було його опуклу форму на поверхні), потім ніби поглинався в товщину гелю, а коли досягав дна посудини, розширювався в ширину гелю, утворюючи кільця. Такий механізм проникання розчину в гелі частково пов'язаний з процесами набухання гелю, утвореним

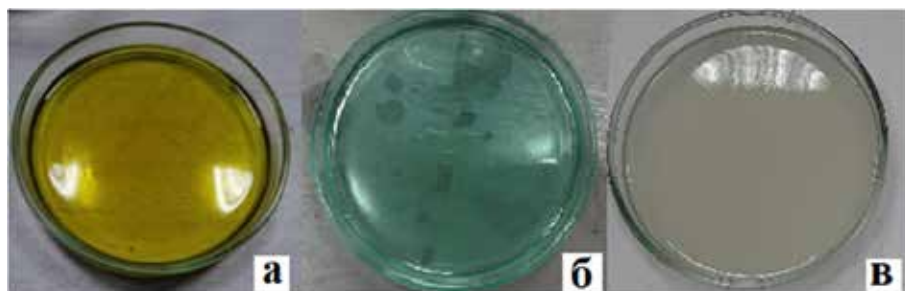


Рис. 1. Гелі розчину желатину з 0,5 % розчином  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  (а),  $\text{CuSO}_4$  (б) та  $\text{BaCl}_2$  (в) відповідно



Рис. 2. Кільця Лізенганга за першу годину контакту гелю з електролітом високої концентрації

такою високомолекулярною сполукою, як желатин.

Відомо, що при утворенні гелю втрачається агрегативна стійкість, тобто частинки (міцели) фази гелю не здатні взаємодіяти між собою або така міжмолекулярна взаємодія слабка, проте кінетичну стійкість (здатність до розшарування) гелі зберігають. Механізмом утворення кілець, відповідно до теорії Оствальда, є результат періодичного перенасичення у структурі гелю. Нерозчинна речовина залишається якийсь час у ненасиченому стані, проте під впливом дифузії вона переміщується до тих пір, доки не досягне рівня перенасичення, потім відбувається утворення шару осаду і процес знову повторюється до того моменту, коли концентрації утвореного осаду буде недостатньо для розриву міцелярної сітки гелю. Саме в цей момент ріст кілець припиняється. Встановлено, що протягом 3–12 годин кілець Лізенганга з  $Ag_2Cr_2O_7$  утворилось ще чотири, відстань між кільцями становила 0,1 см, а сумарний діаметр досягав 6–7 см. За першу добу утворилось 8 кілець, відстань між кільцями збільшилась до 0,4 см; а за другу добу – сумарна кількість кілець становила 14. Протягом наступних днів ніяких змін не спостерігалось, окрім того, що гель висох і став твердим (випарувалась вода). Такий сухий гель не зазнавав ніяких змін навіть, протягом декількох місяців.

За такий самий період часу (3–12 годин) утворилось два кільця з  $Cu(OH)_2$  (одне темно синє – інше блакитне), проте, на відміну від кілець  $Ag_2Cr_2O_7$ , вони були не чітко виражені. За добу сумарний діаметр плями на гелі подвоївся, проте кількість кілець не змінилася. Єдина помітна зміна, яка відбулася за 5 діб, це те, що сухий гель у чашці Петрі потріскався і став крихким (рис. 3) (чого не спостерігалось в гелі з  $Ag_2Cr_2O_7$ ), що мож-



Рис. 3. Сухий гель  $Cu(OH)_2$  з кільцями Лізенганга

ливо пов'язано з утворенням солей калію з гідролізатом білкових молекул желатину.

Протягом 8 годин на весь діаметр чашки Петрі (12 см) вирости кільця  $BaSO_4$ , проте чіткої межі між кільцями не вдалося зафіксувати. Встановлено, що за добу змін у цьому гелі не спостерігалось. За 2–3 доби гель почав засихати, оскільки почав випаровуватись розчинник (вода). Процес утворення тріщин не спостерігався.

Даний експеримент дозволяє припустити, що сильнолужне середовище легше руйнує гель желатину з часом, в порівнянні з сильнокислим.

На рис. 4 зображені кільця Лізенганга через три доби від початку експерименту.

На рис. 5 показано гістограму залежності кількості утворених кілець речовиною від часу контакту розчину високої концентрації електроліту з гелем.

Встановлено, що за кількістю утворених кілець, осади можна розташувати в таку залежність:  $Ag_2Cr_2O_7 > Cu(OH)_2 > BaSO_4$ .

Вивчення процесів формування кілець Лізенганга у гелях дозволяє прогнозувати динаміку процесів формування каменів у нирках, тому дослідження такого розу залишаються перспективними на даному етапі розвитку колоїдної хімії.

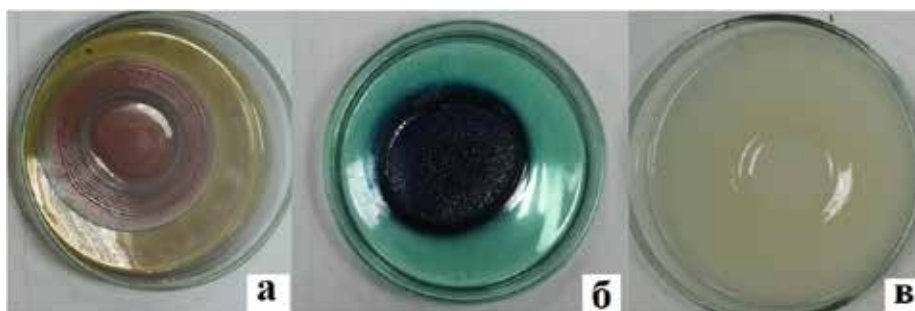


Рис. 4. Кільця Лізенганга в гелях через три доби від початку контакту гелю з електролітом

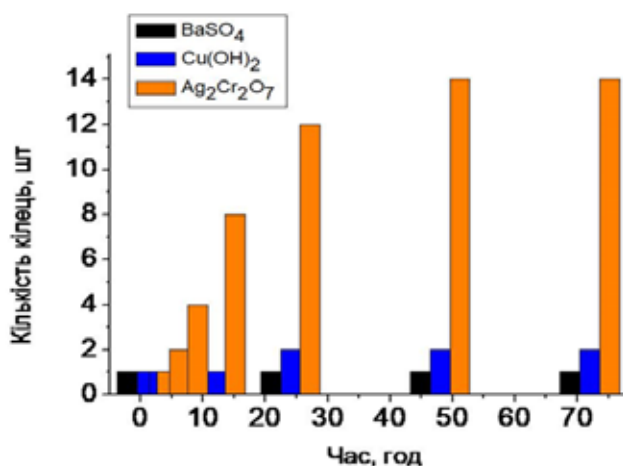


Рис. 5. Гістограма залежності кількості утворених кілець речовиною від часу контакту розчину високої концентрації електроліту з гелем

### Висновки

У роботі досліджено кінетику вирощування кілець Лізенганга у еластичних желатинових гелях. Показано, що однією з умов утворення чітких кілець Лізенганга в гелі є те, що перший розчин електроліту, який зміщується з розчином желатину, повинен бути низької концентрації (до 1%), а другий – максимально високої (до 90%).

Встановлено, що протягом першої доби у гелі з Ag<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> утворилось 14 кілець

Лізенганга, відстань між кільцями становить 0,1 см, а сумарний діаметр досягає 6–7 см. Протягом наступних днів ніяких змін не спостерігається, окрім того, що гель висихає і стає твердим. Такий сухий гель не зазнає ніяких змін навіть, протягом декількох місяців.

Показано, що протягом 3–12 годин утворилось два кільця з Cu(OH)<sub>2</sub>, проте, на відміну від кілець Ag<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, вони є не чітко виражені. За добу сумарний діаметр плями на гелі подвоюється, проте кількість кілець не змінюється. Єдина помітна зміна, яка відбувається за 5 діб, це те, що цей сухий гель у чашці Петрі тріскається і стає крихким. Це можливо пов'язано з утворенням солей калію з гідролізатом білкових молекул желатину.

Визначено, що протягом восьми годин на весь діаметр чашки Петрі (12 см) виростають кільця BaSO<sub>4</sub>, проте чіткої межі між кільцями не фіксується. Протягом 1 доби змін у цьому гелі не спостерігається. За 2–3 доби гель починає засихати, оскільки випаровується розчинник. Процес утворення тріщин не спостерігається.

Показано, що за кількістю утворених кілець, найкраще утворюються кільця з Ag<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, а найгірше – з BaSO<sub>4</sub>. Таку залежність можна пояснити різною розчинністю утворених солей у гелях та їх можливістю впливати на стійкість гелевої сітки у об'ємі гелю.

### Список використаної літератури

Баранова І.І. Особливості опрацювання гелів на основі бодяги. *Збірник наукових праць співробітників НМАПО ім. П.Л. Шупика*. 2010. № 19 (3). С. 584–588.

Гелі косметичні. Загальні технічні умови : СОУ 24.5-37-103:2004. Київ : Мінагрополітики України, 2004. 6 с.

Гелі, їх виникнення, будова і властивості. [Електронний ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/6272689/page:11/> (дата звернення 10.04.2024).

Камінський О.М., Кусяк Н.В., Петрановська А.Л., Абрамов М.В., Туранська С.П., Горбик П.П., Чехун В.Ф. Адсорбція комплексів *цис*-дихлордіамінплатини наноструктурами на основі магнетиту. *Металофізика та новітні технології*. 2013. Т. 35. № 3. С. 389–406.

Терещук Є.І., Панасюк Д.Ю., Камінський О.М. Вивчення кінетичної стійкості синтетичних нееластичних гелів на прикладі гелю силікатної кислоти. *Актуальні задачі хімії: дослідження та перспективи* : IV Всеукр. наук. конф., 15 квіт. Житомир, 2020. С. 158–159. [Електронний ресурс]. URL: <http://surl.li/ufdvu> (дата звернення 05.03.2024).

Усков І.О., Єременко Б.В., Пелишенко С.С., Нижчик В.В. Колоїдна хімія з основами фізичної хімії високомолекулярних сполук : підручник. Київ : Вища шк., 1995. 142 с.

Чуян Т.В., Горобей К.М., Камінський О.М., Чумак В.В., Денисюк Р.О., Панасюк Д.Ю. Фізико-хімічні особливості взаємодії в гелях. *Перспективи хімії в сучасному світі* : зб. матеріалів III Всеукр. Інтернет-конф. молодих вчених, 22 листоп. 2023 р. Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2023. С. 85–86. [Електронний ресурс]. URL: <http://eprints.zu.edu.ua/id/eprint/38332> (дата звернення 05.03.2024).

Abramov M.V., Kusyak A.P., Kaminskiy O.M., Turanska S.P., Petranovska A.L., Kusyak N.V., Gorbyk P.P. Chapter 1. Magnetosensitive Nanocomposites Based on Cisplatin and Doxorubicin

for Application in Oncology. In: Horizons in World Physics / Editor: Albert Reimer.: Nova Science Publishers, Inc. 2017. Vol. 293. P. 1–56.

Abdolali A., Guo W.S., Ngo H.H., Chen S.S., Nguyen N.C., Tung K.L. Typical lignocellulosic wastes and by-products for biosorption process in water and wastewater treatment: A critical review. *Bioresource Technology*. 2014. V. 160. P. 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.037>.

Belala Z., Jeguirim M., Belhachemi M., Addoun F., Trouvé G. Biosorption of basic dye from aqueous solutions by Date Stones and Palm-Trees Waste: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Desalination*. 2011. V. 271. № 1–3. P. 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.12.009>.

Gao X., Guo C., Hao J., Zhao Z. et al. Adsorption of heavy metal ions by sodium alginate based adsorbent—a review and new perspectives. *International J. of Biological Macromolecules*. 2020. V. 164. P. 4423–4434. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.046>

Grigoraş C.-G., Simion A.-I., Favier L., Drob C., Gavrilă L. Performance of dye removal from single and binary component systems by adsorption on composite hydrogel beads derived from fruits wastes entrapped in natural polymeric matrix. *Gels*. 2022. V. 8 (12). 795 p. <https://doi.org/10.3390/gels8120795>.

Kamacı U.D., Kamacı M. Hydrogel beads based on sodium alginate and quince seed nanoparticles for the adsorption of methylene blue. *Inorganic Chemistry Communications*. 2024. V. 160. 111919 p. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111919>.

Nakano Y., Takeshita K., Tsutsumi T. Adsorption mechanism of hexavalent chromium by redox within condensed-tannin gel. *Water Research*. 2001. V. 35. № 2. P. 496–500. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00279-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00279-7).

Petranovska A.L., Abramov N.V., Turanska S.P., Gorbyk P.P., Kaminskiy A.N., Kussyak N.V. Adsorption of cis-dichlorodiammineplatinum by nanostructures based on single-domain magnetite *J. Nanostruct. Chem.* 2015. V. 5. № 3. P. 275–285. <https://doi.org/10.1007/s40097-015-0159-9>.

### References (translated & transliterated)

Baranova, I.I. (2010). Osoblyvosti opratsyuvannya heliv na osnovi bodyahy [Peculiarities of processing gels based on bodiaga]. *Zbirnyk naukovykh prats spivrobotnykiv NMAPO im. P.L. Shupyka [Collection of scientific works of employees of NMAPO named after P.L. Shupyk]*, 19 (3), 584–588 [in Ukrainian].

Heli kosmetychni. (2004). Zahal'ni tekhnichni umovy: SOU 24.5-37-103:2004 [Cosmetic gels. General technical conditions: SOU 24.5-37-103:2004]. Kyiv : Minahropolityky Ukrainy [Ministry of Agrarian Policy of Ukraine] [in Ukrainian].

Heli, yikh vynyknennya, budova i vlastyvoli [Gels, their occurrence, structure and properties]. [Electronic resource]. URL: <https://studfile.net/preview/6272689/page:11/> (access date 10.04.2024) [in Ukrainian].

Kamins'kyy, O.M., Kussyak, N.V., Petranovs'ka, A.L., Abramov, M.V., Turans'ka, S.P., Horbyk, P.P., & Chekhun, V.F. (2013). Adsorbtsiya kompleksiv tsys-dykhlordiaminplatyny nanostrukturamy na osnovi mahnetytu [Adsorption of cis-dichlorodiamineplatinum complexes by magnetite-based nanostructures]. *Metalofizika i noveyshiyte tekhnologii [Metalphysics and the latest technologies]*, 35 (3), 389–406 [in Ukrainian].

Tereshchuk, Ye.I., Panasyuk, D.Yu., & Kamins'kyy, O.M. (2020). Vyvchennya kinetychnoyi stiykosti syntetychnykh neelastychnykh heliv na prykladi helyu sylikatnoyi kysloty [Study of kinetic stability of synthetic inelastic gels on the example of silicate acid gel]. *Aktual'ni zadachi khimiyi: doslidzhennya ta perspektyvy : IV Vseukrayins'ka naukova konferentsiya [Actual tasks of chemistry: research and perspectives: IV All-Ukrainian Scientific Conference]*. Zhytomyr, pp. 158–159. [Electronic resource]. URL: <http://surl.li/ufdv> (access date 05.03.2024) [in Ukrainian].

Uskov, I.O., Yeremenko, B.V., Pelyshenko, S.S., & Nyzhchyk, V.V. (1995). Koloyidna khimiya z osnovamy fizychnoyi khimiyi vysokomolekulyarnykh spoluk [Colloid chemistry with the basics of physical chemistry of high molecular weight compounds]. Kyiv [in Ukrainian].

Chuyan, T.V., Horobey, K.M., Kamins'kyy, O.M., Chumak, V.V., Denysyuk, R.O., & Panasyuk, D.Yu. (2023). Fyzyko-khimichni osoblyvosti vzayemodiyi v helyakh [Physico-chemical features of interaction in gels]. *Perspektyvy khimiyi v suchasnomu sviti: zbirnyk materialiv III Vseukrayins'koyi Internet-konferentsiyi molodykh vchenykh [Prospects of chemistry in the modern world: a collection of materials of the 3rd All-Ukrainian Internet Conference of Young Scientists]*. Zhytomyr. [Electronic resource]. URL: <http://eprints.zu.edu.ua/id/eprint/38332> (access date 05.03.2024) [in Ukrainian].



Abramov, M.V., Kusyak, A.P., Kaminskiy, O.M., Turanska, S.P., Petranovska, A.L., Kusyak, N.V., & Gorbyk, P.P. (2017). Magnetosensitive Nanocomposites Based on Cisplatin and Doxorubicin for Application in Oncology. In: *Horizons in World Physics* / Editor: Albert Reimer.: Nova Science Publishers, 293, 1–56 [in English].

Abdolali, A., Guo, W.S., Ngo, H.H., Chen, S.S., Nguyen, N.C., & Tung, K.L. (2014). Typical lignocellulosic wastes and by-products for biosorption process in water and wastewater treatment: A critical review. *Bioresource Technology*, 160, 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.037> [in English].

Belala, Z., Jeguirim, M., Belhachemi, M., Addoun, F., & Trouvé, G. (2011). Biosorption of basic dye from aqueous solutions by Date Stones and Palm-Trees Waste: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Desalination*, 271 (1–3), 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.12.009> [in English].

Gao, X., Guo, C., Hao, J., & Zhao, Z. (Ed.) (2020). Adsorption of heavy metal ions by sodium alginate based adsorbent—a review and new perspectives. *International J. of Biological Macromolecules*, 164, 4423–4434. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.046> [in English].

Grigoraş, C.-G., Simion, A.-I., Favier, L., Drob, C., & Gavrilă, L. (2022). Performance of dye removal from single and binary component systems by adsorption on composite hydrogel beads derived from fruits wastes entrapped in natural polymeric matrix. *Gels*, 8 (12), 795. <https://doi.org/10.3390/gels8120795> [in English].

Kamacı, U.D., & Kamacı, M. (2024). Hydrogel beads based on sodium alginate and quince seed nanoparticles for the adsorption of methylene blue. *Inorganic Chemistry Communications*, 160, 111919. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111919> [in English].

Nakano, Y., Takeshita, K., & Tsutsumi, T. (2001). Adsorption mechanism of hexavalent chromium by redox within condensed-tannin gel. *Water Research*, 35 (2), 496–500. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00279-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00279-7) [in English].

Petranovska, A.L., Abramov, N.V., Turanska, S.P., Gorbyk, P.P., Kaminskiy, A.N., & Kusyak, N.V. (2015). Adsorption of *cis*-dichlorodiammineplatinum by nanostructures based on single-domain magnetite *J. Nanostruct. Chem*, 5 (3), 275–285. <https://doi.org/10.1007/s40097-015-0159-9> [in English].

Отримано: 25.04.2024  
Прийнято: 08.05.2024