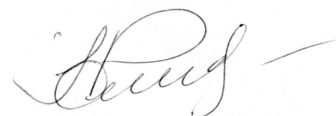


НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ КОЛОЇДНОЇ ХІМІЇ ТА ХІМІЇ ВОДИ ім. А.В. ДУМАНСЬКОГО

**РОМАНЮКІНА ІРИНА ЮРІЇВНА**



УДК 544.77.022.82:544.77.535+577.356

**ВПЛИВ ВМІСТУ ДЕЙТЕРІЮ НА ВЛАСТИВОСТІ ВОДИ**

02.00.11 – колоїдна хімія

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата хімічних наук

Київ-2018

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у відділі хімії, фізики та біології води Інституту колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського Національної академії наук України

**Науковий керівник:**

академік НАН України, доктор хімічних наук,  
професор

**Гончарук Владислав Володимирович,**

Інститут колоїдної хімії та хімії води  
ім. А.В. Думанського НАН України, директор  
інституту, завідувач відділу хімії, фізики та біології  
води

**Офіційні опоненти:**

член-кореспондент НАН України, доктор хімічних  
наук, професор

**Огенко Володимир Михайлович,**

Інститут загальної та неорганічної хімії

ім. В.І. Вернадського НАН України, завідувач відділу  
фізико-органічної хімії

доктор хімічних наук, професор

**Тарасенко Юрій Олександрович,**

Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України,  
провідний науковий співробітник відділу фізико-хімії  
вуглецевих наноматеріалів

Захист відбудеться « 31 » травня 2018 р. о 14<sup>00</sup> год на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.183.01 в Інституті колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України за адресою: 03142, м. Київ-142, бульв. Академіка Вернадського, 42.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституті колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України за адресою: 03142, м. Київ-142, бульв. Академіка Вернадського, 42.

Автореферат розісланий « 28 » квітня 2018 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
доктор хімічних наук



М.В. Мілюкін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Вода є одним з найбільш розповсюджених дисперсійних середовищ у колоїдних системах і визначальним чином впливає на перебіг численних колоїдних, фізико-хімічних, біологічних і технологічних процесів. Хоча вода здається елементарною та здавна відомою речовиною, за останні десятиліття науковий інтерес до неї стрімко зростає. Багато питань щодо властивостей, структури та функцій води на нашій планеті є відкритими.

З іншого боку, вода – це система, що складається як з окремих молекул, так і з їх кластерів  $(\text{H}_2\text{O})_n$ , які знаходяться в стані динамічної рівноваги. Можна стверджувати, що вода містить, принаймні, два типи структур і є сумішшю молекулярних неоднорідностей різних типів з відмінною густиною у межах 1 – 1000 нм. Таким чином, рідка вода є складною гетерогенною колоїдною системою. При цьому різні фази, що входять до складу «звичайної» води, знаходяться в стані динамічної рівноваги та завдяки хімічній однорідності легко переходять з однієї в іншу.

Важливим показником якості води є її ізотопний склад. Природна вода на 99,7 % складається з  $\text{H}_2\text{O}$ , молекули якої утворені природними атомами  $^1\text{H}$  і  $^{16}\text{O}$ . Решта (0,3 %) представлені ізотопними різновидами молекул води (ізотопологами). У складі природної води важкі ізотопи водню (дейтерій, D) та кисню ( $^{17}\text{O}$  та  $^{18}\text{O}$ ) утворюють дев'ять ізотопологів:  $\text{HD}^{16}\text{O}$ ,  $\text{HD}^{17}\text{O}$ ,  $\text{HD}^{18}\text{O}$ ,  $\text{D}_2^{16}\text{O}$ ,  $\text{D}_2^{17}\text{O}$ ,  $\text{D}_2^{18}\text{O}$ ,  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ ,  $\text{H}_2^{17}\text{O}$ ,  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ .

Отже, властивості води залежать від її структурної та ізотопної неоднорідності. Шляхом експериментальних досліджень та різноманітних методів моделювання запропоновано велику кількість моделей структури води, хоча жодна з них не може пояснити усі різноманітні й аномальні властивості води, а також не враховує її ізотопний склад, тобто не у змозі в повній мірі розкрити її складність. Отже об'ємна вода –  $\text{H}_2\text{O}$  – суміш багатьох фрагментів, у тому числі ізотопів водню, які впливають на те, що вода виявляє нетипові фізико-хімічні властивості. Як наслідок, відмінними можуть бути властивості води різного ізотопного складу, впливаючи як на біологічні об'єкти, так і на параметри процесів обробки води. Але у більшості досліджень часто-густо нехтують наявністю у воді важких ізотопів водню та вважають, що вона складається виключно з  $\text{H}_2\text{O}$ .

Дані літератури про важкий ізотоп водню – дейтерій – свідчать про його вплив на фізико-хімічні властивості води та на процеси життєдіяльності організмів. Однак аналіз літератури доводить, що вивчення властивостей води різного ізотопного складу знаходиться лише на своєму початку. Щодо спроб вивчення води, яка містить меншу кількість дейтерію, ніж природна вода, то такі дані відсутні. Тому представлена робота є актуальною, своєчасною та спрямована на виявлення взаємозв'язків кількості дейтерію у воді з її властивостями, структурою та параметрами процесів обробки.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана в рамках наукових досліджень Інституту колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України за відомчими

темами: «Стратегія розвитку досліджень в області хімії, фізики, біології води та фундаментальних основ колоїдної хімії» (2007 – 2011 рр., № держреєстрації 0107U000148, виконавець); «Розвиток нових підходів до оцінки і кондиціювання якості води» (2012 – 2016 рр., № держреєстрації 0112U000040; виконавець); «Створення концепцій управління біологічною активністю та фізико-хімічними властивостями води, у т.ч. її ізотопним складом при очищенні природних вод з урахуванням сучасних вимог до якості питної води» (2012 – 2016 рр., № держреєстрації 0112U000038; виконавець); грант НАН України для молодих вчених «Вплив фізико-хімічних факторів на властивості та структуру води» (2011 – 2012 рр., № держреєстрації 0111U008331, виконавець).

**Мета дослідження:** встановлення взаємозв'язків між кількістю дейтерію у воді різного ізотопного складу та її властивостями, процесами структурування (асоціації) та умовами мембранного розділення.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні наукові задачі:

- оцінити вплив дейтерію на фізико-хімічні показники води різного ізотопного складу;
- дослідити вплив вмісту дейтерію на структуроутворення води з різним ізотопним складом;
- визначити дію температури та способів попередньої обробки води з різним вмістом дейтерію на процес її асоціації;
- визначити іонну проникність мембран при ультрафільтраційній обробці води з різним вмістом дейтерію;
- дослідити осмотичний перенос «ізотопологів» води крізь полімерну напівпроникну мембрану методом прямого осмосу.

**Об'єкт дослідження:** процеси структуроутворення (асоціації) та мембранного розділення води з різним вмістом дейтерію.

**Предмет дослідження:** зразки води, відмінні за ізотопним складом, а саме з різним вмістом дейтерію – збіднена на дейтерій вода, важка вода та їх суміші.

**Методи дослідження:** мас-спектроскопія з індуктивно-зв'язаною плазмою, атомно-адсорбційний, титриметричний, фотометричний, опромінення вакуумним ультрафіолетом (ВУФ-опромінення), динамічне світлорозсіювання (МДС), малокутове розсіювання світла, віскозиметричний, сталагмометричний, пікнометричний, кондуктометричний, мембранне ультрафільтраційне розділення, диференційна скануюча калориметрія, прямий осмос, статистичний.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Розширено уявлення про воду як складну гетерогенну колоїдну систему, здатну до самоорганізації.

Уперше встановлено вплив вмісту дейтерію на кількісні зміни фізико-хімічних властивостей води різного ізотопного складу при температурах 4 – 25 °С. Визначені концентраційні залежності фізико-хімічних властивостей води від вмісту дейтерію, що є експериментальним підтвердженням процесу

самоорганізації води під впливом добавок дейтерію та дає змогу передбачати його регулюючу роль у процесі асоціації води.

Уперше експериментально встановлено вплив концентрації дейтерію на структурні зміни води та виявлено нелінійні концентраційні залежності та характерні для самоорганізації критичні точки (при D/H = 200, 40000 і 90000 ppm<sup>1</sup>), що вказують на перехід системи від одного структурного стану до іншого.

Уперше встановлено, що вплив температури на ступінь структурування води різного ізотопного складу має нелінійний характер з чітко вираженими критичними температурами (~ 4, 36, 45 та 60 – 70 °C), які тісно пов'язані із структурними особливостями води, її фізичними властивостями та функціями у біологічних системах.

Уперше експериментально встановлено межі оптичних неоднорідностей досліджених зразків води залежно від вмісту в них дейтерію та температури.

Уперше досліджено мембранний транспорт зразків води з різним вмістом дейтерію та отримано величини іонної проникності полімерних мембран при їх баромембранному фільтруванні, що зумовлено структурними особливостями досліджуваних зразків води.

Уперше досліджено процес прямого осмосу крізь полімерну напівпроникну мембрану, яка розділяє зразки води з різним вмістом дейтерію. Експериментально встановлено, що осмотичний перенос води – ізотопний осмос – визначається різницею концентрацій дейтерію та кисню-18 та пригнічує осмотичний потік, зумовлений різницею концентрацій хімічних компонентів у досліджуваних зразках води.

**Практичне значення отриманих результатів.** Експериментальні результати, отримані в роботі, можуть бути застосовані при розробці та вдосконаленні приладів по визначенню структурних характеристик води для дослідження процесів її асоціації, а також мають практичний інтерес при використанні мембранних процесів для отримання води із вмістом дейтерію, відмінним від природного. Ці підходи можуть бути покладені в основу подальшого теоретичного та експериментального вивчення колоїдних систем, розчинів та технологічних процесів за участю води.

**Особистий внесок здобувача.** Аналіз літератури за темою дослідження, основний обсяг експериментальної роботи, математична обробка та аналіз результатів, написання та оформлення дисертаційної роботи виконано особисто здобувачем. Постановку загального завдання досліджень здійснено спільно з науковим керівником – академіком НАН України, д.х.н., проф. В.В. Гончаруком; трактування й узагальнення експериментальних результатів, обговорення висновків дисертації проведено спільно з к.т.н. А.О. Кавіцькою та к.х.н. М.Д. Скільською.

Постановку окремих задач дослідження та інтерпретацію результатів здійснено спільно з к.х.н. С.О. Доленко. Дослідження зразків водних розчинів

---

<sup>1</sup> ppm – мільйонна частка (млн<sup>-1</sup>) – одиниця вимірювання концентрації та інших відносних величин, яка дорівнює  $1 \cdot 10^{-6}$  від базового показника

методом динамічного світлорозсіювання проводили в лабораторії Національного університету харчових технологій МОН України спільно з к.т.н. А.І. Мариніним. Фотохімічні дослідження виконували на установці, сконструйованій к.х.н. О.О. Самсоні-Тодоровим. Визначення вмісту дейтерію та кисню-18 у зразках води проводили в лабораторії ізотопної геохімії Інституту геохімії навколишнього середовища НАН України к.г.-м.н. Деміховим Ю.М. Експериментальні результати щодо стану води в мембранах отримано та обговорено з д.х.н. І.Д. Атаманенко. Усі співавтори брали участь у підготовці спільних публікацій.

**Апробація результатів.** Матеріали дисертації доповідалися та обговорювалися на наукових конференціях: молодих вчених ІКХВ ім. А.В. Думанського НАН України «Колоїдно-хімічні аспекти охорони довкілля та контроль якості води» (Київ, Україна, 2010 р.), «Проблема відновлення якості питної води» (Київ, Україна, 2011 р.); «Колоїдно-хімічні проблеми охорони довкілля та контроль якості води» (Київ, Україна, 2017 р.); «XII Polish – Ukrainian symposium on theoretical and experimental studies of interface phenomena and their technological applications» (Kielce, Poland, 2010); «International research and practice conference nanotechnology and nanomaterials NANO – 2017» (Chernivtsi, Ukraine, 2017); «Kyiv conference on analytical chemistry: Modern Trends» (Kyiv, Ukraine, 2017).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 9 робіт, у тому числі 6 статей у наукових фахових виданнях та тези трьох доповідей на конференціях.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 169, а основний текст – 139 сторінок друкованого тексту. Робота містить 42 рисунки, 20 таблиць, 1 додаток. До списку використаних джерел включено 250 найменувань, які розміщено на 25 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність роботи, визначено її зв'язок з науковими програмами та темами, сформульовано мету, об'єкт, предмет, завдання дослідження, визначено наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, а також особистий внесок здобувача.

**У першому** розділі представлено аналітичний огляд теоретичних робіт та експериментальних досліджень щодо властивостей, ізотопних та структурних особливостей води. Аналіз літератури свідчить, що однією з найважливіших проблем сучасної науки є вивчення води у контексті «склад і структура системи – властивості». Наведено дані, які свідчать, що вода є системою, здатною до самоорганізації, а також основні фактори, які можуть впливати на властивості та структуру води. Розглянуто існуючі методи, які використовуються для вивчення структурних особливостей води, проаналізовано їх переваги та недоліки. Показана важливість урахування ізотопного складу води при вивченні її фізико-хімічних і біологічних властивостей, а також структурних

особливостей. На основі аналізу літератури обґрунтовано актуальність, сформульовано мету й основні напрямки досліджень.

У другому розділі представлено описи використаних у дослідженнях методик експериментів, лабораторних установок, методів аналізу зразків та обробки одержаних результатів. Наведено характеристики об'єктів і предметів дослідження.

У третьому розділі досліджено вплив кількості дейтерію на фізико-хімічні властивості зразків води різного ізотопного складу, його ролі в процесах асоціації та аномальних властивостях води.

Для підтвердження зв'язку аномальних властивостей води з її структурою при температурах 4 – 25 °С експериментально досліджено зміну густини, кінематичної в'язкості та поверхневого натягу зразків води з різним вмістом дейтерію. Характер зміни цих параметрів наведено на рис.1 та 2.

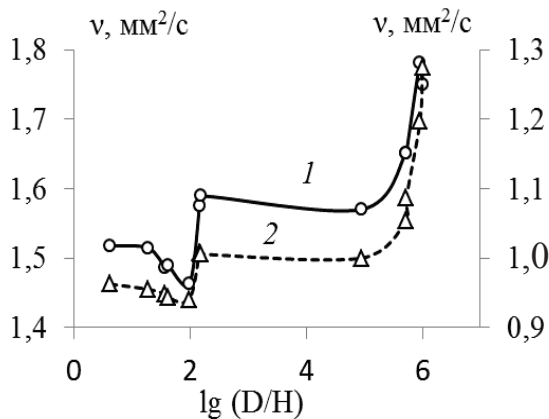


Рисунок 1 – Залежність кінематичної в'язкості ( $\nu$ ) води з різним вмістом дейтерію від його концентрації ( $\lg D/H$ ).  $T = 4^\circ\text{C}$  (1) та  $20^\circ\text{C}$  (2)

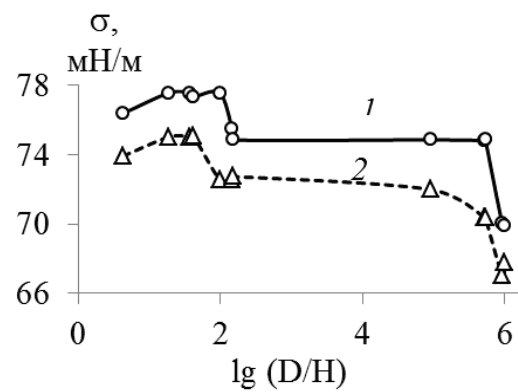


Рисунок 2 – Залежність поверхневого натягу ( $\sigma$ ) води з різним вмістом дейтерію від його концентрації ( $\lg D/H$ ).  $T = 4^\circ\text{C}$  (1) та  $20^\circ\text{C}$  (2)

Отримані залежності нелінійні та мають перегини при однакових концентраціях дейтерію. Можна виділити чотири виражені концентраційні діапазони: I –  $< 150$  ppm; II –  $\sim(150 \div 40000)$  ppm; III –  $\sim(40000 \div 90000)$  ppm; IV  $\rightarrow 90000$  ppm. Такий характер залежностей спостерігається при обох температурах. Однак величини досліджених параметрів для температури  $4^\circ\text{C}$  вищі.

Другий концентраційний діапазон характеризується різкими змінами величин кінематичної в'язкості (зростання) та поверхневого натягу (падіння) при сталій густині. А для третього діапазону характерним є досить широкий концентраційний інтервал зі сталістю досліджуваних властивостей (рис. 1 і 2).

У першому концентраційному діапазоні також можна відзначити дві критичні точки – при вмісті дейтерію 20 та 40 ppm (рис. 3). З ростом концентрації дейтерію до  $\sim 20$  ppm спостерігається збільшення поверхневого натягу при сталих значеннях кінематичної в'язкості та густини. Подальше збільшення концентрації дейтерію приводить навпаки до падіння кінематичної

в'язкості та зростання густини зразків води та сталому поверхневому натягу. Також при 40 ppm дейтерію має місце стрибок на всіх отриманих залежностях (рис. 1, 2, 3).

Збільшення концентрації дейтерію вище 90000 ppm (IV діапазон) приводить до стрімких змін усіх досліджуваних параметрів: до зростання кінематичної в'язкості, густини та до падіння поверхневого натягу.

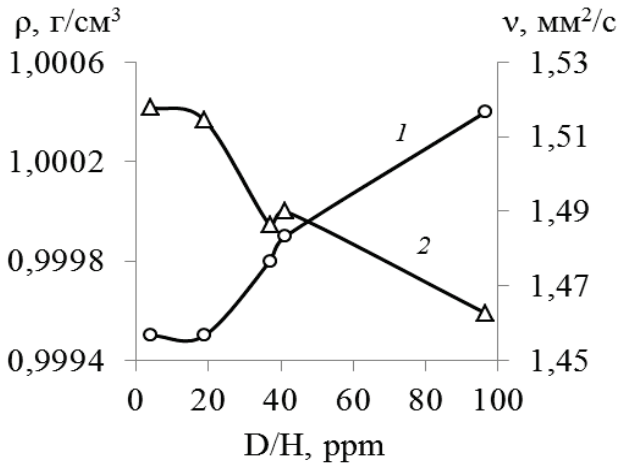


Рисунок 3 – Початкові ділянки концентраційних залежностей густини ( $\rho$ ) (1) та кінематичної в'язкості ( $\nu$ ) (2) води з різним вмістом дейтерію.  $T = 20^\circ\text{C}$

Також встановлено, що й інші фізико-хімічні властивості води (залежно від вмісту дейтерію) мають подібні особливості. Так, точки перегинів на концентраційних залежностях рН (рис. 4, а), питомої електропровідності (рис. 4, б), окисно-відновного та електрокінетичного потенціалів (рис. 5, криві 1, 2) корелюють із точками перегинів для в'язкості, густини та поверхневого натягу. Для підтвердження висунутих припущень досліджено вплив концентрації дейтерію на асоціа-

цію води оптичними методами, заснованими на реєстрації дифракційної картини у різних розмірних діапазонах (методами динамічного світлорозсіювання та малокутового розсіювання світла).

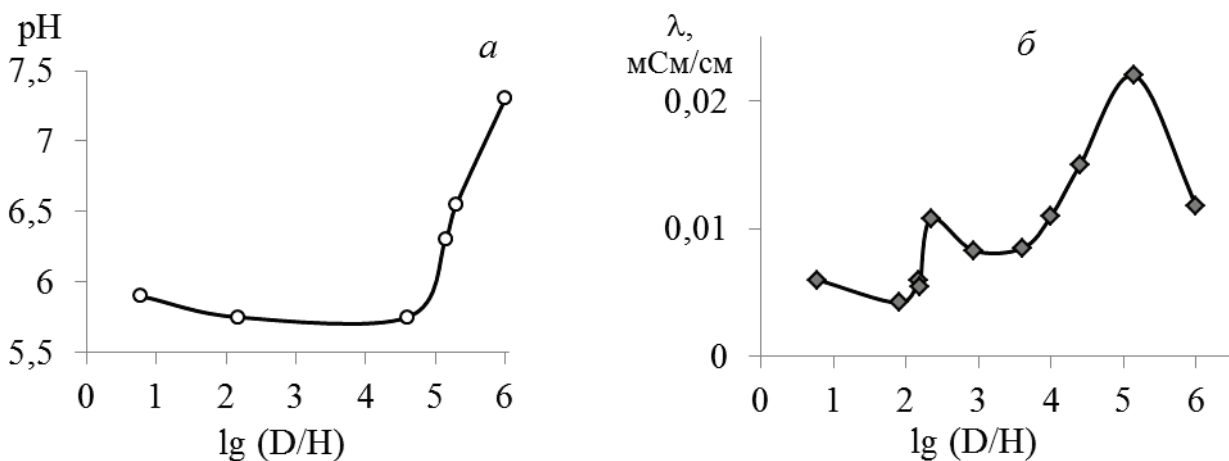


Рисунок 4 – Залежності зміни рН (а) та питомої електропровідності ( $\lambda$ ) (б) від концентрації дейтерію ( $\lg D/H$ ) у зразках.  $T = (18 \pm 2)^\circ\text{C}$  (а) та  $25^\circ\text{C}$  (б)

За допомогою МДС для зразків води з різним вмістом дейтерію в інтервалі 1 – 6500 нм зафіксовано оптичні неоднорідності, відповідно, одного



та/або двох масштабів (табл. 1). При концентрації дейтерію до 140000 ppm виявлено оптичні неоднорідності 50 – 100 нм і ~350 нм, а при більш високих – тільки одного розміру ~ 350 нм (для 140000 ppm) і ~755 нм (для важкої води 99, 96%) (див. табл. 1). Доля оптичних неоднорідностей до ~ 100 нм не перевищує ~20% і після досягнення концентрації дейтерію ~150 ppm їх кількість зменшується. Слід виділити воду із вмістом дейтерію 6 ppm (так звану «легку воду»), для якої не фіксуються оптичні неоднорідності до 100 нм, але присутні великі – > 5000 нм. Отже існування однакових точок перегинів на концентраційних залежностях, тобто стрибкоподібна зміна властивостей

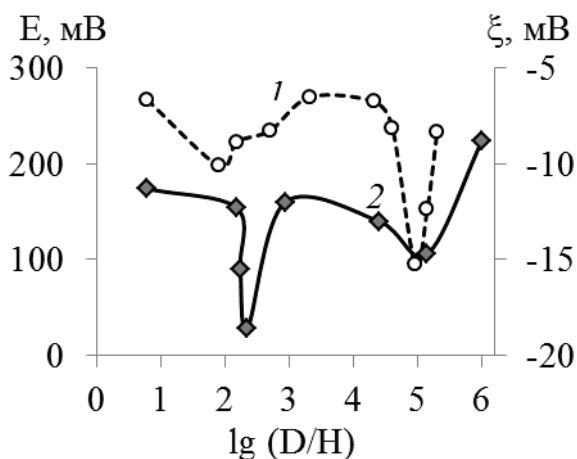


Рисунок 5 – Залежність окиснювально-відновного (E) (1) та електрокінетичного (ξ) (2) потенціалів від концентрації дейтерію (lg D/H) у зразку: T = (18 ± 2) °C (1) та 25°C (2)

при однакових концентраціях дейтерію є підтвердженням процесу самоорганізації води під впливом його кількості. При цьому концентрацію дейтерію можна розглядати як регулюючий параметр (пов'язаний з надходженням енергії/речовини іззовні), а точки перегинів на концентраційних залежностях – як точок біфуркації. При подоланні деякого критичного значення керуючого параметра система спонтанно переходить у новий впорядкований стан.

Таблиця 1 – Розміри оптичних неоднорідностей, визначені методом динамічного світлорозсіювання у водних розчинах з різним вмістом дейтерію. T = 25 °C

D/H, ppm	d1, нм	I, %	d2, нм	I, %	d3, нм	I, %
4,2	56	14	428	86	–	–
6	–	–	358	86	5200	14
100	81	17	372	83	–	–
150	97	17	342	83	–	–
250	80	10	247	90	–	–
900	57	6	373	94	–	–
140000	–	–	352	100	–	–
1000000	–	–	755	100	–	–

Залежність гідродинамічного діаметру та розмірів оптичних неоднорідностей, що домінують, від вмісту дейтерію у досліджених модельних розчинах, отримана методом динамічного розсіювання світла та наведена на

рис. 6. Перегини на даних кривих добре корелюють з перегинами відповідних залежностей, отриманих за допомогою приладу «Кластер-1», який чутливий в мікронній області (рис. 7). При цьому абсолютні величини меж оптичних неоднорідностей, не співпадають, що обумовлено різними розмірними діапазонами, в яких проводиться усереднення результатів. Це свідчить, що досліджені зразки мають оптичні неоднорідності як у нанометровій, так і в мікронній областях.

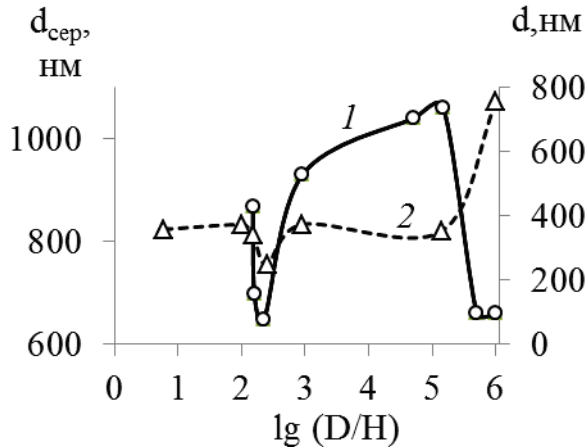


Рисунок 6 – Залежність середнього гідродинамічного діаметру ( $d_{\text{сер}}$ ) (1) та розміру домінуючих оптичних неоднорідностей ( $d$ ) (2) від концентрації дейтерію ( $\lg D/H$ ) у модельних розчинах (методом динамічного світлорозсіювання)

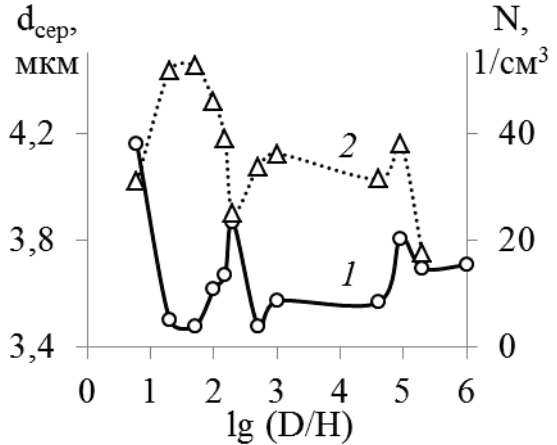


Рисунок 7 – Залежність середнього розміру ( $d_{\text{сер}}$ ) (1) та кількості часток ( $N$ ) (2) оптичних неоднорідностей від концентрації дейтерію ( $\lg D/H$ ) у модельних розчинах (методом малокутового розсіювання світла)

Отже, характер концентраційних змін усіх властивостей подібний (рисунки 1 – 5), а їх перегини співпадають також і на структурних залежностях. Тобто ефекти, які спостерігаються, не є випадковими, вони взаємопов'язані. Ми експериментально підтверджуємо ці зміни на основі структурних уявлень про розчини, тобто дані точки можна розглядати як критичні, характерні для самоорганізованих систем, у яких вони зазнають якісної динамічної перебудови, переходячи з одного структурного стану в інший. Тобто зміна структури води впливає на усі її властивості.

У роботі також проведена обробка зразків води з різним вмістом дейтерію вакуумним ультрафіолетовим випромінюванням, яка може бути використана як метод дослідження процесів асоціації води різного ізотопного складу. Отримана залежність утворення  $H_2O_2$  при обробці зразків води вакуумним ультрафіолетом від концентрації дейтерію характеризується не плавною зміною контрольованого параметра, а спостерігаються стрибкоподібні відхилення з вираженими екстремумами при  $\sim 200 - 250$  ppm і  $\sim 40000$  та  $90000$  ppm.

При дослідженні процесів саморганізації відкритих систем як керуючий фактор можна використовувати температуру. З метою вивчення впливу

температури на ступінь структурування води з різним вмістом дейтерію проводили обробку зразків ВУФ-опроміненням та їх вивчення за допомогою методу динамічного світлорозсіювання, змінюючи температурний режим. Використовували зразки легкої ( $D/H = 6$  ppm), дистильованої ( $D/H = 150$  ppm) і зразка води з  $D/H = 7700$  ppm, змінюючи температурний режим (рис. 8). Для всіх досліджуваних зразків зростання температури приводить до збільшення концентрації  $H_2O_2$ . Дана залежність є нелінійною. Можна виділити чотири умовних температурних інтервали (табл. 2), які, ймовірно, характеризують різну ступінь структурування води: I ~ (4 – 10) °C; II ~ (15 – 30) °C; III ~ (35 – 60) °C; IV ~ (> 70) °C.

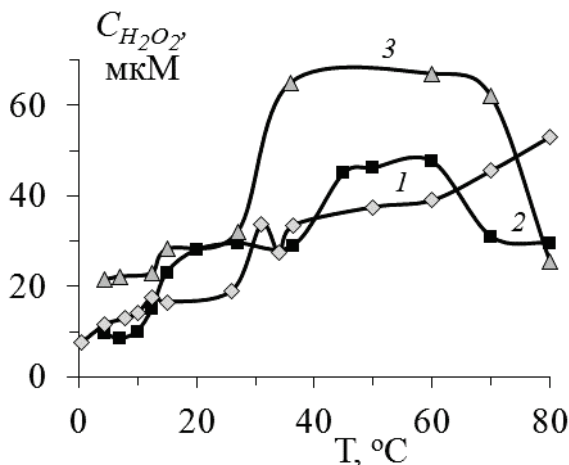


Рисунок 8 – Вплив температури на вихід  $H_2O_2$  при ВУФ-опроміненні (2 хв) води з різним ізотопним складом: 150 ppm (1), 6 ppm (2) і 7700 ppm (3)

Для зразків води з різним ізотопним складом спостерігаються явні відмінності кривих виходу  $H_2O_2$  при обробці ВУФ-опроміненням у III температурному інтервалі. Для води з природним вмістом дейтерію (150 ppm), на відміну від легкої та важкої, де домінують асоціати на основі переважаючого ізотопу водню (протію або дейтерію), у виділеному нами *третьому* температурному інтервалі спостерігається додаткова критична ділянка, яка, можливо, обумовлена наявністю асоціатів за участю НДО.

При цьому встановлено, що підвищення вмісту дейтерію в досліджених зразках води приводить до зниження критичної температури на III інтервалі.

Інформацію про межі оптичних неоднорідностей у зразках води можна отримати на основі даних про інтенсивність світлорозсіювання ними (рис. 9). Ця температурна залежність має тенденцію нелінійно зростати до ~ 60 °C. Отримані температурні інтервали досить добре корелюють з інтервалами, отриманими з використанням методу ВУФ-опромінення (див. табл. 2).

У воді з вмістом дейтерію до 7000 ppm у температурному діапазоні від 15 до 34 °C фіксуються оптичні неоднорідності двох типів: (500 – 600) і (~ 100) нм, які складають ~ 90 і 10%, відповідно (рис. 9). Зростання температури приводить до зменшення розмірів оптичних неоднорідностей до ~ 200 нм і підвищення гомогенності системи. Для води з високим вмістом дейтерію при відносно схожому характері залежності, що спостерігається в інтервалі до 36 °C, фіксуються неоднорідності великих розмірів. Так, при 15°C поряд з

нанорозмірними спостерігаються й мікророзмірні оптичні неоднорідності (5600 нм).

Таблиця 2 – Температурні інтервали стану води з різним ізотопним складом

D/H, ppm	Температурні інтервали з використанням ВУФ – опромінення, °C				Температурні інтервали з використанням МДС, °C				
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	V
6	4 – 10	15 – 37	45 – 60	> 70	-	14 – 25	30 – 35 36 – 40	42 – 65	> 70
150	4 – 10	12 – 25	31 – 34 36 – 60	> 70	-	14 – 30	31 – 36 38 – 42	44 – 50**	-
7700	4 – 12	15 – 25	36 – 70	> 70	-	14 – 28	30 – 35 36 – 40	42 – 65	> 70
99,96 *	-	-	-	-	-	14 – 30	32 – 45	50 – 55	> 60

\* – концентрація D виражена у %; \*\* – вище 50°C дослідження не проводились.

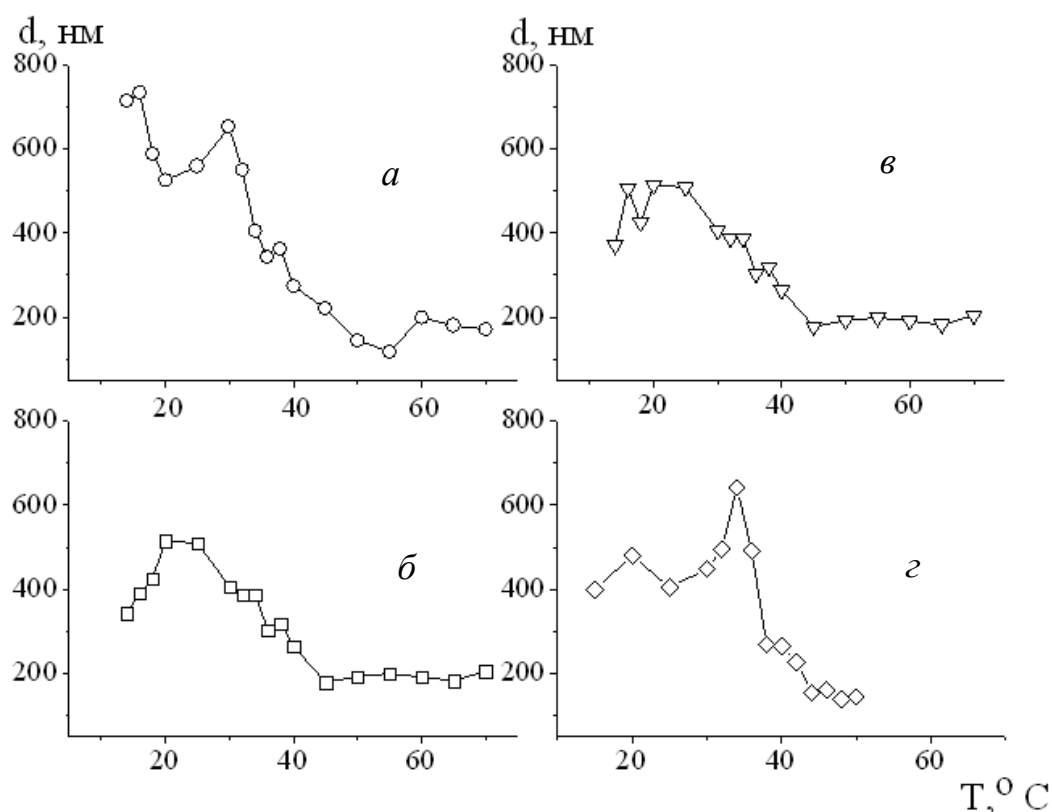


Рисунок 9 – Вплив температури на оптичні неоднорідності води з різним ізотопним складом: *a* – D/H = 99,96%; *б* – D/H = 6 ppm; *в* – D/H = 7700 ppm, *г* – D/H = 150 ppm.

Встановлено, що температурні залежності оптичних неоднорідностей, отримані МДС, а також утворення  $H_2O_2$  в результаті ВУФ-опромінення досліджуваних зразків води мають ступінчастий характер з чітко вираженими

критичними температурами:  $\sim 4, 36, 45$  та  $(60 - 70)$  °С.

У **четвертому** розділі представлено результати дослідження іонної проникності полімерних мембран при баромембранному фільтруванні вод з різним вмістом дейтерію. Встановлено, що при фільтруванні води з природним вмістом дейтерію іонна проникність мембран залежить від енергії гідратації, молекулярної маси іонів і хімічної природи поверхні мембран. Так, наприклад, при близьких значеннях молекулярної маси кобальту та цинку (58 та 65) проникність їх іонів для мембрани на основі полісульфону становить 0,18 і 0,16; для мембрани на основі полісульфонамідю – 0,52. Проникність іонів берилію (атомна маса якого складає 9) досягає 1, незалежно від хімічної природи поверхні мембран.

Кардинально змінюється іонна проникність розглянутих двовалентних іонів при фільтруванні збідненої на дейтерій води ( $D/H = 4,2$  ppm,  $^{18}O/^{16}O = 910$  ppm). Іонна проникність кобальту та цинку знижується в 1,5 – 2 рази, берилію – в 2 – 4 рази. Практично повністю нівелюється роль хімічної природи поверхні мембран.

Встановлено, що по закінченню фільтрування збідненої на дейтерій води іонна проникність мембрани УПМ-20 за  $Be^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  та  $Ba^{2+}$  в середньому не перевищує 0,30. При фільтруванні деіонізованої води за  $Be^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Sr^{2+}$  та  $Ba^{2+}$  спостерігається висока проникність іонів, тобто відбувається збагачення фільтрату даними іонами (табл. 3).

Таблиця 3 – Іонна проникність мембрани УПМ-20 при фільтруванні легкої ( $D/H = 4,2$  ppm) та деіонізованої ( $D/H = 150$  ppm) води

Іон	Легка вода $D/H = 4,2$ ppm		Деіонізована вода $D/H = 150$ ppm	
	Іонна проникність у часі $\tau$ , хв		Іонна проникність у часі $\tau$ , хв	
	$\tau = 10$ хв	$\tau = 115$ хв	$\tau = 10$ хв	$\tau = 115$ хв
$Be^{2+}$	0,33	0,25	Негативна	
$Mn^{2+}$	0,31	0,30	-0,95	+0,54
$Co^{2+}$	0,21	0,27	Негативна	+0,48
$Ni^{2+}$	0,82	0,28	+0,26	+0,73
$Cu^{2+}$	0,44	0,23	Негативна	+0,94
$Zn^{2+}$	0,44	0,28	Негативна	+0,52
$Sr^{2+}$	0,06	0,09	Негативна	+0,64
$Ba^{2+}$	0,49	0,11	-0,81	-0,24

Прямий взаємозв'язок між іонною селективністю мембран та енергією гідратації іонів при фільтруванні деіонізованої води простежується лише для  $Mn^{2+}$ ,  $Sr^{2+}$  та  $Ba^{2+}$ . Таким чином, можна припустити, що зростання селективності та водопроникності мембран при фільтруванні збідненої на дейтерій води зумовлено вищою гідратуючою здатністю іонів у ній. Отримані результати представляють практичний інтерес при використанні мембранних процесів для отримання води із вмістом дейтерію, відмінним від природного.

Оцінено вплив іонного радіусу елементів  $Me^{2+}$  та їх електрохімічних потенціалів на ступінь затримання  $Me^{2+}$  мембраною ПС-20. На рис. 10 показано залежність селективності мембрани ПС-10 за  $Me^{2+}$  від їх іонного радіусу. В табл. 4 наведено взаємозв'язок між іонною селективністю мембрани та електрохімічним потенціалом  $Me^{2+}$ .

Як видно з рис. 10, селективність мембрани ПС-20 при фільтруванні збідненої на дейтерій води для  $Ni^{2+}$  і  $Zn^{2+}$  нижча, ніж при фільтруванні деіонізованої води, а для  $Ba^{2+}$  – однакова. Селективність інших  $Me^{2+}$  при фільтруванні збідненої на дейтерій води вища, ніж при фільтруванні деіонізованої води. Найбільш висока селективність при фільтруванні обох зразків води характерна для  $Cu^{2+}$ , яка має найвищий стандартний електрохімічний потенціал  $+0,52$ . Пряма кореляція між селективністю  $Me^{2+}$  і зміною стандартного електрохімічного потенціалу не простежується для обох зразків води.

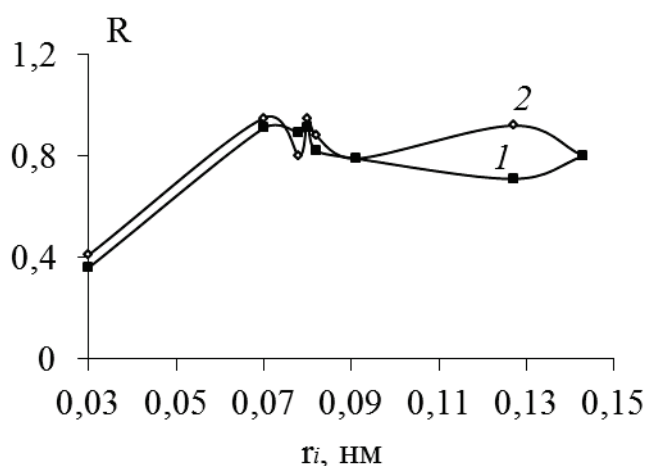


Рисунок 10 – Залежність селективності мембрани (R) ПС-20 від радіусу катіонів ( $r_i$ ), що затримуються, в процесі ультрафільтраційного розділення збідненої на дейтерій та деіонізованої води

Однією з причин такої відмінності є вплив на селективність мембрани за  $Me^{2+}$  хімічної природи поверхні мембрани. Відомо, що мембрана ПС-20 негативно заряджена. Її  $\xi$ -потенціал складає  $-6,48$  мВ. Отже, наявність негативного заряду може безпосередньо впливати на селективність  $Me^{2+}$ , які мають високий як позитивний, так і негативний стандартний електрохімічний потенціал (табл. 4).

У п'ятому розділі наведено результати дослідження осмотичного перенесення компонентів зразків важкої, деіонізованої та легкої води в процесі прямого осмосу крізь полімерну напівпроникну мембрану. Схема осмотичного потоку  $J_{H_2O}$  крізь поліамідну композитну мембрану (ESPA1) в процесі прямого осмосу при розміщенні в камері 1 води з D/H 4,2 і 144,7 ppm, в камері 2 – важкої води 99,96 % наведено на рис. 11, а.

Ймовірно, поряд з потоком  $J_{H_2O}$ , буде мати місце зустрічне потоку  $J_{H_2O}$  перенесення розчинених компонентів  $J_s$ . Тобто, осмотичне перенесення визначатиметься ефективним осмотичним тиском ( $\pi_{\text{еф}}$ ). Рис. 11, в ілюструє зміну рівнів зразків води в камерах 1 і 2, що відбуваються в процесі прямого осмосу. Зниження рівня води в камері 1 і підвищення в камері 2 повинно

приводити до зміни концентрації присутніх у воді компонентів, в камерах відповідно до властивої для даної мембрани іонної проникності.

Таблиця 4 – Взаємозв'язок між іонною селективністю мембрани ПС-20 за окремими елементами, іонним радіусом та електрохімічним потенціалом  $Me^{2+}$  при фільтруванні збідненої на дейтерій та деіонізованої води

Іон	Іонний радіус, нм	Електрохімічний потенціал	Іонна селективність мембрани	
			D/H = 4,2 ppm	D/H = 150 ppm
$Mn^{2+}$	0,09	-1,18	0,79	0,79
$Co^{2+}$	0,08	-0,28	0,88	0,82
$Ni^{2+}$	0,08	-0,23	0,80	0,89
$Cu^{2+}$	0,08	+0,34	0,98	0,91
$Sr^{2+}$	0,13	-2,90	0,92	0,71
$Ba^{2+}$	0,14	-2,91	0,80	0,80

На рис. 11, б наведено схему осмотичного перенесення при розміщенні в камері 1 легкої води (D/H 25 ppm) з мінералізацією 300 мг/дм<sup>3</sup>, в камері 2 – важкої води з D/H 99,96 %. На рис. 11, г показано, як повинні при цьому змінюватися рівні вод в камерах осмотичної комірки. Однак, як впливає з рис. 8, осмотичний процес відбувається з підвищенням рівня води в камері 2 з важкою водою, тобто за схемою, представленою на рис. 7, в.

Таким чином, для всіх зразків води зі зниженим вмістом дейтерію в камері 1 незалежно від концентрації хімічних елементів і мінералізації води спостерігається приріст її рівня в камері 2. Значне збільшення концентрації легкої води (D/H = 4,2 ppm) в камері 1 в процесі осмосу може бути викликано двома причинами: зворотним дифузійним перенесенням розчинених компонентів у бік менших концентрацій та високою гідратуючою здатністю води, збідненою на дейтерій.

Отримано результати, які відображують сумарний ефект перенесення компонентів як конвективним шляхом, так і за рахунок дифузії. Тим не менш, внесок високої гідратуючої здатності води, збідненої на дейтерій, може бути вирішальним. Напевно, за рахунок високої гідратації легкої води, розміри гідратованого іона стають співрозмірними або навіть перевищують розміри пор у підкладці мембрани та не переносяться крізь мембрану зворотноосмотичним потоком. Для  $Ba^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Co^{2+}$  збільшення енергії гідратації іонів внаслідок осмотичного перенесення легкої води приводить до підвищення їх концентрації в камері 2.

Зміна концентрацій елементів у дослідах з легкою водою (D/H = 25 ppm) обумовлена не лише переліченими причинами, але й внеском осмотичного потоку, який виникає через концентраційні відмінності  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$  в легкій та важкій воді (див. рис. 8, крива г).

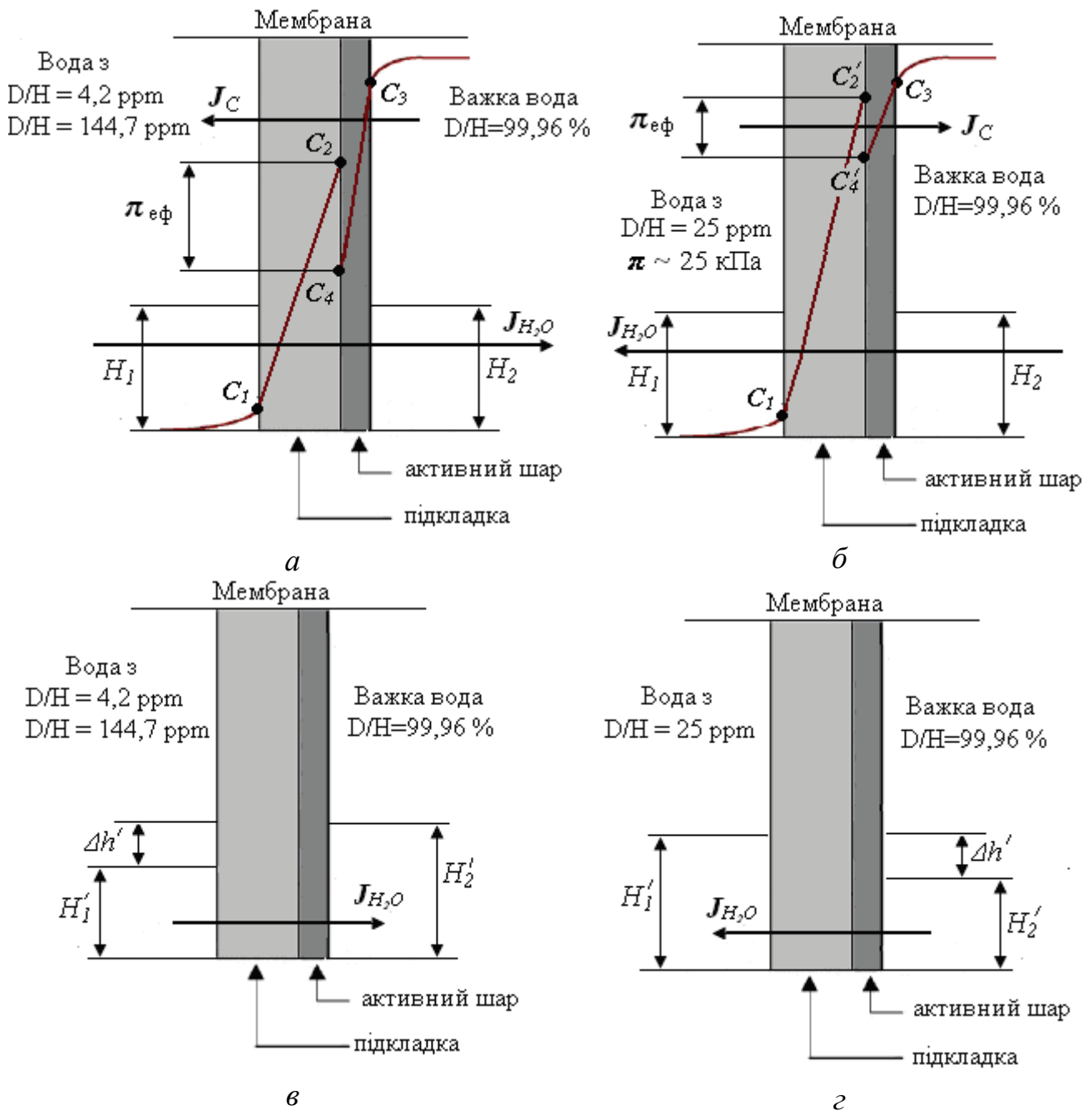


Рисунок 11 – Схеми осмотичного перенесення води з різним вмістом дейтерію крізь мембрану ESPA1 у процесі прямого осмосу:  $C_1$ ;  $C_1'$ ;  $C_3$  – вихідні концентрації хімічних елементів води 4,2; 144,7 і 25 ppm;  $C_2$ ;  $C_2'$ ;  $C_4$   $C_4'$  – концентрації хімічних елементів, що встановлюються під впливом внутрішньої концентраційної поляризації в підкладці та активному шарі мембрани;  $H_1$  та  $H_2$  – рівні води в камерах 1 і 2;  $J_{H_2O}$  – осмотичний потік води;  $J_C$  – осмотичний потік розчинених у воді хімічних компонентів;  $\pi$ ,  $\pi_{эф}$  – осмотичний та ефективний осмотичний тиск води;  $\Delta h$ ,  $\Delta h'$  – приріст і зниження рівня води в камері осмометра

Виходячи з класичних уявлень щодо впливу гідратуючої здатності іонів на іонну проникність мембран, слід очікувати, що проникність іонів буде збільшуватися в ряді:  $Mg^{2+} > Ca^{2+} > Na^+ > K^+$ . Проте, насправді, іони



розташовуються в таку послідовність:  $K^+ > Mg^{2+} > Na^+ > Ca^{2+}$ . Разом із тим, тільки для калію фіксується помітне зниження його концентрації у камері 1 і зростання у камері 2. Можна припустити, що зміна проникності іонів викликана, перш за все, високою активністю легкої води, яка змінює ступінь гідратації даних іонів.

В умовах осмосу збідненої на дейтерій води та важкої води, рушійною силою осмотичного перенесення є відмінність концентрацій ізотопологів води. Цей висновок підтверджують також дані, отримані при вимірюванні концентрації дейтерію та кисню-18 у камерах осмотичної комірки після завершення прямого осмосу (див. рис. 12). Рівновага на дейтерієм та киснем-18 у системі «вода з  $D/H < 99,96\%$  – мембрана – важка вода з  $D/H = 99,96\%$ » встановлюється практично за однаковий час, незважаючи на істотну різницю концентрації дейтерію у зразках води, розділених полімерною мембраною.

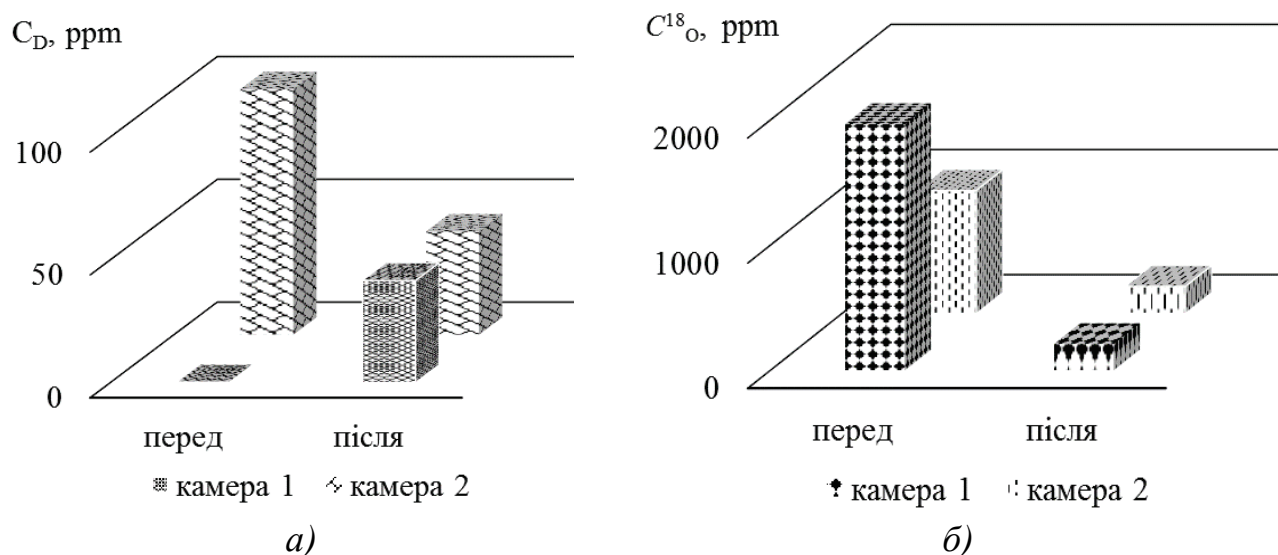


Рисунок 12 – Зміна концентрації дейтерію (а) та кисню-18 (б) у камерах осмотичної комірки (1 – деіонізована вода з  $D/H = 144,7 \text{ ppm}$ ; 2 – важка вода) у процесі прямого осмосу (*перед* та *після*). Тривалість експерименту – 400 год.

Встановлено, що спосіб розміщення мембрани (активний шар і підкладка) в камерах осмометру з важкою та легкою водою суттєво впливає на процес ізотопного осмосу.

На підставі отриманих результатів зроблено висновок, що осмотичний тиск у поровій структурі мембрани, який виникає в процесі ізотопного осмосу, є однією з причин істотного зниження рівня легкої води в камері осмометру в порівнянні з рівнем важкої води.

## ВИСНОВКИ

У представленій дисертаційній роботі розширено уявлення про воду як складну колоїдну систему, здатну до самоорганізації. Досліджено взаємозв'язок

ізотопного складу води з властивостями, структурою та параметрами процесів її обробки. Проведено експериментальне визначення структурних особливостей, фізико-хімічних показників зразків води з різним вмістом дейтерію, а також його впливу на мембранний транспорт при баромембранному фільтруванні та в процесі прямого осмосу.

1. Встановлено вплив концентрації дейтерію на кількісні зміни фізико-хімічних властивостей води різного ізотопного складу при температурах 4 – 25 °С, що дає змогу передбачити регулюючу роль дейтерію у процесі структуроутворення (асоціації) води.

2. Уперше показано вплив концентрації дейтерію на структурні зміни води. Отримано нелінійний характер концентраційних залежностей та зафіксовано характерні для самоорганізації критичні точки при  $D/H = 200$ , 40000 і 90000 ppm, які зумовлені переходом системи з одного структурного стану в інший.

3. Уперше встановлено вплив температури на ступінь структурування води різного ізотопного складу, що носить ступінчастий характер з чітко вираженими критичними температурами: 4, 36, 45 і (60 – 70°C), які тісно пов'язані зі структурними особливостями води, її фізичними властивостями та функціями у біологічних системах.

4 Експериментально встановлено межі оптичних неоднорідностей досліджених зразків води в залежності від вмісту дейтерію та температури методами динамічного та малокутового розсіювання світла, а також шляхом опромінення вакуумним ультрафіолетом, які раніше, головним чином, досліджувалися методами теоретичних розрахунків.

5 Уперше досліджено мембранний транспорт зразків води з різним вмістом дейтерію та встановлено іонну проникність полімерних мембран при їх баромембранному фільтруванні, яка знижується у 1,5 – 4 рази при фільтруванні води, збідненої на дейтерій, порівняно із природною, що зумовлено її структурними особливостями.

6 Уперше досліджено процес прямого осмосу крізь полімерну напівпроникну мембрану, яка розділяє зразки води з різним вмістом дейтерію. Обґрунтовано, що осмотичний перенос води – ізотопний осмос – визначається різницею концентрацій дейтерію та кисню-18 і пригнічує осмотичний потік, що спричинений різницею концентрацій хімічних компонентів у досліджуваних зразках води.

### Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Физико-химические свойства и биологическая активность воды, обедненной по тяжелым изотопам / В.В. Гончарук, В.Б. Лапшин, Т.Н. Бурдейная, Т.В. Плетенева, А.С. Чернопятко, И.Д. Атаманенко, А.С. Ульяновцев, Е.В. Успенская, А.О. Самсоны-Тодоров, В.В. Таранов, Г.М. Николаев, А.А. Кавицкая, **И.Ю. Романюкина**, Р.В. Приходько,

Е.А. Орехова, В.А. Яременко, А.С. Котельчук, А.В. Сыроешкин // Химия и технология воды – 2011. – Т. 33, № 1. – С. 15 – 25.

*(Участь у плануванні та проведенні експериментів з визначення фізико-хімічних показників збідненої на дейтерій води, участь в обговоренні результатів).*

2. Revealing water's secrets: deuterium depleted water / V.V. Goncharuk, A.A. Kavitskaya, **I.Yu. Romaniukina**, O.A. Loboda // Chemistry Central Journal – 2013. – Vol. 7, No 103 – P. 1 – 5.

*(Пошук та аналіз літератури, участь у плануванні експериментів. Проведення експериментальних досліджень фізико-хімічних показників води з різним вмістом дейтерію. Участь в обговоренні результатів та написанні статті).*

3. Изотопный осмос – осмотический перенос изотопологов воды через полимерную мембрану в процессе прямого осмоса / В.В. Гончарук, Т.В. Бурдейная, **И.Ю. Романюкина**, М.Д. Скильская, В.Я. Демченко, А.А. Кавицкая // Химия и технология воды – 2014. – Т. 36, № 3. – С. 189 – 202.

*(Планування та проведення експериментальних робіт по прямому осмосу зразків води, які відрізняються за ізотопним складом. Участь в обговоренні отриманих результатів та оформленні статті).*

4. Фотоліз вод с разным изотопным составом / В.В. Гончарук, А.О. Самсоны-Тодоров, О.В. Зуй, **И.Ю. Романюкина**, В.А. Яременко // Химия и технология воды – 2014. – Т. 36, № 3. – С. 220 – 228.

*(Проведення експериментальних досліджень фізико-хімічних показників води з різним вмістом дейтерію до та після процесу фотолізу).*

5. Влияние температуры на степень структурирования воды различного изотопного состава / В.В. Гончарук, **И.Ю. Романюкина**, М. Д. Скильская, А.И. Маринин, А.В. Сыроешкин, С.А. Доленко // Химия и технология воды. – 2017. – Т. 39, № 4. – С. 335 – 344.

*(Пошук та аналіз літератури, участь у плануванні та проведенні експериментів з ультрафіолетового опромінення води відмінного ізотопного складу при різних температурах. Участь у інтерпретації результатів та написанні статті).*

6. Влияние концентрации дейтерия на структурные изменения в водных растворах / С.А. Доленко, М.Д. Скильская, А.М. Кравченко, А.И. Маринин, **И.Ю. Романюкина**, В.В. Гончарук // Химия и технология воды. – 2017. – Т. 39, №6. – С. 611 – 623.

*(Проведення експериментальних досліджень. Участь у обговоренні та трактуванні отриманих результатів та написанні статті).*

7. Purification of water from heavy metals by micellar-enhanced ultrafiltration / **I.Yu. Romaniukina**, I.D. Atamanenko // Abstract book of XII Polish – Ukrainian Symposium “Theoretical and Experimental Studies of Interfacial Phenomena and Their Technological Applications” (24 – 28 August, 2010). – Kielce – Ameliowka, Poland, 2010. P. 124.

8. The influence of deuterium concentration and temperature on the degree of water structuring / S.A. Dolenko, M.D. Skilskaya, **I.Yu. Romaniukina**, A.I. Marynin, V.V. Goncharuk. // Abstract book of “International research and practice conference nanotechnology and nanomaterials (NANO -2017)” (23 – 26 August 2017). – Chernivtsi, 2017. – P. 571.

9. Збіднена за дейтерієм вода: іонна проникність полімерних мембран у процесі баромембранного фільтрування / В.В. Гончарук, **А.О. Кавіцька**, М.Д. Скільська, **І.Ю. Романюкіна** // Тези доповідей Київської Конференції з аналітичної хімії «Сучасні Тенденції» (18 – 21 жовтня, 2017). – Київ, 2017. – С. 45.

## АНОТАЦІЇ

**Романюкіна І.Ю.** Вплив вмісту дейтерію на властивості води. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата хімічних наук за спеціальністю 02.00.11 – колоїдна хімія. – Інститут колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України, Київ, 2018.

Дисертацію присвячено вивченню взаємозв'язку ізотопного складу води з її властивостями, структурою та параметрами процесів обробки. Проведено експериментальне визначення структурних особливостей, фізико-хімічних показників зразків води з різним вмістом дейтерію, а також його впливу на мембранний транспорт при баромембранному фільтруванні та в процесі прямого осмосу.

Уперше встановлено та проаналізовано вплив концентрації дейтерію на структурні зміни води. Експериментально встановлено розміри оптичних неоднорідностей досліджених вод при різних концентраціях дейтерію. Отримано критичні температури, характерні для самоорганізованих систем, у яких система зазнає якісної динамічної перебудови, переходячи з одного структурного стану в інший.

Показано вплив температури на ступінь структурування води різного ізотопного складу, встановлено розміри оптичних неоднорідностей досліджених вод при різних температурах, а також критичні точки структурної перебудови системи.

Уперше досліджено мембранний транспорт зразків води з різним вмістом дейтерію та експериментально встановлена іонна проникність полімерних мембран при їх баромембранному фільтруванні, що зумовлено структурними особливостями зразків води, що вивчалися. Досліджено процес прямого осмосу крізь полімерну напівпроникну мембрану, яка розділяє зразки води з різним вмістом дейтерію. Отримані результати представляють практичний інтерес при використанні мембранних процесів для отримання води із вмістом дейтерію, відмінним від природного.

**Ключові слова:** ізотопний склад води, дейтерій, властивості води, структура води, фотоліз, оптичні неоднорідності води, мембранний транспорт, прямий осмос.

**Романюкіна І.Ю.** Влияние содержания дейтерия на свойства воды. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 02.00.11 – коллоидная химия. – Институт коллоидной химии и химии воды им. А.В. Думанского НАН Украины, Киев, 2018.

Диссертация посвящена изучению взаимосвязи изотопного состава воды с ее свойствами, структурой и параметрами процессов обработки. Проведено определение структурных особенностей, физико-химических показателей образцов воды с различным содержанием дейтерия, а также его влияния на мембранный транспорт при баромембранном фильтровании и в процессе прямого осмоса.

Впервые установлено и проанализировано влияние концентрации дейтерия на структурные изменения воды. Экспериментально установлены размеры оптических неоднородностей исследованных вод при различных концентрациях дейтерия. Получены критические температуры при концентрациях дейтерия 200, 40000 і 90000 ppm, характерные для самоорганизующихся систем, в которых они претерпевают качественную динамическую перестройку, переходя из одного структурного состояния в другое. Показано влияние температуры на степень структурирования воды различного изотопного состава, установлены размеры оптических неоднородностей исследованных вод при различных температурах, а также температурные критические температурі – 4, 36, 45 і (60 – 70) °С, которые хорошо согласуются с экстремальными точками, известными для разных физических характеристик воды (максимум плотности, минимум изобарной теплоемкости, минимум сжимаемости и т.д.).

Экспериментально установлено влияние концентрации дейтерия на количественные изменения физико-химических свойств воды различного изотопного состава при температурах 4 и 20 °С, что позволило сделать вывод о важной роли дейтерия в процессе структурообразования (ассоциации) воды.

Впервые изучено влияние дейтерия на мембранный транспорт воды разного изотопного состава. Исследована ионная проницаемость мембран при баромембранной обработке воды с различным содержанием дейтерия, которая существенно меняется при фильтровании воды, обедненной по дейтерию. Улучшение процесса ионного транспорта при фильтровании легкой воды обусловлено ее структурными особенностями (в первую очередь, значительно высшей гидратирующей способностью). Полученные результаты представляют практический интерес при внедрении мембранных процессов для получения воды с содержанием дейтерия, отличного от природного.

Впервые исследован процесс прямого осмоса через полимерную полупроницаемую мембрану, которая разделяет образцы воды с различным содержанием дейтерия. Установлено, что движущей силой осмотического переноса – изотопного осмоса – является разница концентраций изотопологов воды. Показано, что изотопный осмос подавляет осмотическое течение, которое возникает из-за разницы концентраций химических компонентов, растворенных в легкой и тяжелой воде

**Ключевые слова:** изотопный состав воды, дейтерий, свойства воды, структура воды, фотолиз, оптические неоднородности воды, мембранный транспорт, прямой осмос.

**Romaniukina I.Yu.** The effect of deuterium concentration on water properties and processes of its association – Manuscript.

Thesis for obtaining the scientific degree of Candidate of Chemical Science. Speciality 02.00.11 – colloidal chemistry. – A.V. Dumanskiy Institute of Colloid and Water Chemistry of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2018.

The thesis is devoted to the study of the relationship between the isotope composition of water and its properties, structure and parameters of some processes. Experimental determination of structural features, physical and chemical parameters of water samples with different deuterium content, as well as its influence on membrane transport during baromembrane filtration and in the process of direct osmosis has been carried out.

The influence of deuterium concentration on structural changes of water was established and analyzed for the first time. The size of optical inhomogeneities of studied water at various concentration of deuterium is experimentally established. The critical points typical for self-organized systems in which dynamics of system undergoes high-quality reorganization, passing from one structural state into another are obtained.

The influence of temperature on the degree of water structuring with different isotopic composition is shown, the sizes of optical inhomogeneities of the investigated waters at different temperatures and the critical points of the structural adjustment of the system are determined.

For the first time the membrane transport of water samples with different deuterium content has been investigated. The ion permeability of polymeric membranes has been experimentally determined by the baromembrane filtration due to the structural features of studied water samples. Osmosis transfer through a polymeric semipermeable membrane of water with different concentration of deuterium during the process of forward osmosis has been studied. Obtained results are practical interest in the use of membrane processes for receiving water with different concentration of deuterium.

**Key words:** isotope composition of water, deuterium, water properties, water structure, photolysis, optical heterogeneities of water, membrane transport, direct osmosis.

---

Підп. до друку 26.04.2018. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір. офс. Гарнітура “Таймс”. Друк. офс.  
Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Зам. 171.

Віддруковано у ТОВ-Видавництві “ЛОГОС” із оригіналів автора.  
Свідоцтво про внесення суб’єкта видавничої справи Державного реєстру видавців,  
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції серія ДК № 201 від 27.09.2000 р.  
01030, Київ-30, вул. Богдана Хмельницького, 10, тел. 235-60-03