

Д.Є. Ковтун, В.Ю. Колосков

Національний університет цивільного захисту України, Україна

ВПЛИВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ІОННИЙ ОБМІН У ТЕХНОЛОГІЯХ ДЕМІНЕРАЛІЗАЦІЇ ВОДИ

Проведено аналіз наукових досліджень впливу магнітного поля на іонний обмін у технологіях демінералізації води. Розглянуто фізико-хімічні механізми, що пояснюють вплив магнітного поля на процеси іонного обміну. Визначено, що ці механізми пов'язані з дією сил Лоренца, Кельвіна та проявом магнітогідродинамічних ефектів які впливають на подвійний електричний шар, змінюючи кінетику обмінних процесів.

Ключові слова: іон, магніт, інтенсифікація, вплив, іоніт, водопідготовка.

Постановка проблеми

У світі спостерігається тенденція до зменшення запасів чистої води, яка особливо гостро відчувається в Україні. Значною мірою, це пов'язано з воєнною агресією рф. [1].

Процес іонного обміну, який використовується для отримання води високої чистоти, попри свою ефективність має екологічні ризики, що пов'язані з продуктами експлуатації і обслуговування систем.

Технологічні процеси супроводжуються утворенням високомінералізованих концентратів, що містять значну кількість солей і домішок. Для утилізації таких стоків застосовують:

- скидання в каналізаційні системи після нейтралізації та розведення;
- випаровування й кристалізацію для отримання сухих солей, придатних до повторного використання;
- оброблений скид у водойми;
- закачування у глибокі підземні горизонти, що ізолювані від питних вод;

Сучасні методи вдосконалення очистки води спрямовані на зменшення енергетичних витрат і витрат на відновлення системи, модернізацію іонообмінних апаратів, оптимізацію подачі та відводу води, а також на застосування ефективних методів регенерації і промивки іонообмінного матеріалу. Перспективним методом інтенсифікації процесів іонного обміну, є використання магнітного поля.

Технологія магнітного поля може застосовуватись у різних системах водопідготовки. Її використання сприяє пригніченню росту патогенних мікроорганізмів, кристалізації CaCO_3 та підвищенню ефективності видалення домішок. Вплив магнітного поля зумовлений модифікацією фізико-хімічних властивостей дисперсних частинок, що посилює процеси осадження, коагуляції та седиментації. Унаслідок цього поліпшується розділення твердої і рідкої фаз та зростає загальна ефективність

очищення. Водночас застосування лише магнітного впливу без поєднання з іншими методами (коагуляцією, фільтрацією, іонним обміном) не забезпечує достатнього ступеня очищення, тому така технологія ефективна переважно як допоміжна. [2,3].

Використання впливу магнітного поля, також відображаються у створення нових матеріалів для очищення води. При дослідженнях магнітних аніонообмінних смол, відзначається їх перспективність, за рахунок високої адсорбційної здатності, швидкої кінетики та. Магнітні композити демонструють значний потенціал у сфері очищення води, завдяки універсальності, можливості модифікації, специфічним поверхневим властивостям і простоті відокремлення. [4,5].

Попри наявність великого спектра підходів, застосування зовнішнього магнітного поля для інтенсифікації процесів іонного обміну залишається маловивченим напрямом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Застосування магнітних та електричних полів впливає на іонну мобільність, що сприяє покращенню процесів іонного обміну.

Практичне застосування цієї технології проявляється у промислових системах водопідготовки, де магнітна обробка дозволяє запобігати утворенню накипу в трубопроводах і теплообмінному обладнанні, та у питному водопостачанні, де вона може використовуватися для зниження концентрації жорстких солей без залучення додаткових хімічних реагентів. Таким чином, магнітна активація води розглядається як перспективний метод інтенсифікації іонообмінних процесів, що поєднує високу ефективність з екологічною безпекою [6–9].

Наукова спільнота у питанні впливу магнітного поля на воду розділяється на 2 напрямки. Частина

дослідників вважає, що при впливі магнітного поля, можуть змінюватись фізичні властивості води. Інші дослідження, вказують на те, що магнітне намагнічування води, не впливає на рН, електропровідність, поверхневий натяг чи загальну жорсткість води, а отже, не доводять його здатності пом'якшувати питну воду. Можна припустити, що подібні результати, пов'язані з недостатньою кількістю проведених експериментів. [10].

Стационарне магнітне поле змінює фізико-хімічні властивості води при 0,5 Тл у проточно-циркуляційній системі. Магнітна обробка знижує поверхневий натяг, може збільшувати в'язкість, швидкість перенесення іонів та впливати на рН. Висловлено припущення, що внутрішньо молекулярна енергія води зменшується, а енергія активації збільшується з часом магнітної обробки [11–14].

Деякі дослідження підтверджують, що магнітна обробка води впливає на кристалізацію карбонату кальцію при температурах вище 15 °С, зменшуючи частку кальциту 1,2–2 рази. Магнітна обробка має потенціал для контролю кристалізації CaCO₃ та запобігання утворенню накипу у водопровідних і свердловинних системах, зокрема при температурах близьких до 25 °С. Крім того, зафіксовані зміни дифузійних коефіцієнтів катіонів (Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺) та аніонів, а також орієнтаційні ефекти кристалів після обробки [15,16].

Наукові роботи показують, що дія електромагнітного поля (ЕМП) здебільшого сприяє формуванню об'ємних кристалів, перешкоджаючи їх осіданню. Результати досліджень різняться: в одних спостерігають осідання, в інших – ефект відсутній. Механізм дії поля може полягати у впливі на зародки кристалів або колоїдні частинки. Відмінності пояснюються різними умовами експериментів [17].

Повідомляють, що під дією магнітного поля спостерігаються коливання показника рН. Крім того, було з'ясовано, що швидкість потоку та температура води суттєво впливають на ефективність магнітної обробки, зокрема на зміну рН після проходження через магнітні пристрої [18,19].

Формулювання мети статті

Існуючі уявлення щодо природи впливу магнітного поля на іонообмінні системи не є достатнім, що ускладнює формування узагальненої теорії цього явища. Це зумовлює потребу в подальшому теоретичному дослідженні механізмів впливу магнітного поля.

Метою дослідження є встановлення теоретичних основ впливу магнітного поля на процеси іонного обміну при демінералізації природних вод та обґрунтування можливостей

інтенсифікації цих процесів у системах водопідготовки.

Виклад основного матеріалу

Вплив магнітного поля на рідину та розчинені у ній іони пояснюється комплексом фізико-хімічних механізмів. Одними з ключових чинників, що зумовлюють зміну кінетичних та термодинамічних характеристик водних систем під дією магнітного поля, є сили електромагнітного походження. Зокрема, дія магнітного поля на рух іонів у розчині описується силою Лоренца, тоді як виникнення додаткових об'ємних ефектів у неоднорідному полі пов'язується із силами Кельвіна. Саме врахування цих фундаментальних закономірностей є необхідним для пояснення механізмів магнітної активації у процесах іонного обміну [20].

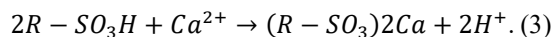
Як відомо, сила Лоренца – це електромагнітна сила, яка дія на заряд q (Кл), що рухається з певною швидкістю v (м/с), у магнітному і електричному полях, відповідно B (Т) та E (В/м). Ключова сила, яка пояснює рух заряджених частинок у електромагнітних полях (1).

$$F_L = q(E + v \times B) \quad (1)$$

Візьмемо окремий випадок, вплив магнітного поля на окремий іон, отже справедливим буде рівнянням (2):

$$F_L = q(v \times B). \quad (2)$$

Розглянемо випадок реакції іонного обміну (3), з присутніми у воді солями жорсткості, наприклад, CaCl₂ (джерело Ca²⁺), відбувається катіонний обмін:



Для Ca²⁺ заряд: $|q| = 2 \cdot e = 2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл. Рух Ca²⁺ до функціональних груп визначається не лише дифузією, а й дією сили Лоренца, отже справедливо наступне рівняння (4):

$$F_L Ca^{2+} = 2e(v \times B), \text{ Н}. \quad (4)$$

У випадку з аніонами, наприклад, видалення SO₄²⁻, за рахунок того, що заряд $-2e$, напрям сили Лоренца буде протилежний до того, що діє на Ca²⁺. Це призводить, до відмінності у траєкторії руху аніонів та катіонів. Зростає частота зіткнень з аніонів активними центрами аніонітів, катіонів відповідно з катіонітами. За рахунок більш слабких водневих зв'язків у аніонів, магнітне поле також впливає на гідратну оболонку SO₄²⁻, що сприяє швидшому закріпленню на іонообмінній смолі.

Оскільки сила Лоренца визначається векторним добутком швидкості частинки на вектор магнітної

індукції, то для знаходження використаєм рівняння (5), візьмемо модуль [21]:

$$|F_L| = |q| \cdot v B \sin\theta. \quad (5)$$

Для прикладу (6), візьмемо параметри, які використовують для грубої оцінки: $v = 10^{-3}$ м/с (конвекційна швидкість у порах/мікроструменах), $B = 0,5$ (типове значення магнітної індукції, для лабораторних досліджень) Т, $\theta=90^\circ$ (прийнято припущення про перпендикулярність вектора швидкості та вектора магнітної індукції, для отримання верхньої межі оцінки Сили Лоренца). Іон який розглядаємо – Ca^{2+} , заряд $+2e$.

$$|F_L| = 2e \cdot v \cdot B \approx 1,62 \cdot 10^{-22} \text{ (Н)}. \quad (6)$$

В реальному середовищі рух іона підлягає в'язкому гальмуванню F_d . У середовищі з дуже малим числом Рейнольдса ($Re \ll 1$, тобто рух мікрочастинок у воді) іон майже миттєво «гальмує» до такої швидкості, при якій: $F_d = F_L$.

Для сферичного тіла радіусом r , в'язкий опір $F_d = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v$ (закон Стокса), де η – в'язкість води ($\sim 1,0 \cdot 10^{-3}$ Па·с). Термінальна швидкість (v_{term}) – це гранична швидкість, яку набуває частинка під дією зовнішньої сили в рідині, коли сили, що її прискорюють, врівноважуються силами, що гальмують рух, рівняння (7).

$$v_{\text{term}} \approx F_L / 6\pi\eta r, \text{ м/с}. \quad (7)$$

Приймаючи гідратований радіус іона $r \approx 0,5$ нм, отримуємо оцінку $v_{\text{term}} = 1,72 \cdot 10^{-11}$ м/с. Тобто $F_L \ll F_d$ [22].

У системі рух іонів має хаотичний характер і зумовлений тепловими флуктуаціями середовища. Динаміку такого переміщення описують закономірності броунівського руху, який кількісно характеризується дифузійним коефіцієнтом, визначеним за рівнянням Стокса–Ейнштейна (8).

$$D = k_B T / 6\pi\eta r, \text{ м}^2/\text{с}, \quad (8)$$

де k_B – стала Больцмана $= 1,3806 \times 10^{-23}$ Дж/К; T – абсолютна температура (К) [23].

Відстань, на яку іон зміщується завдяки тепловому Броунівському руху за час t , називається середньоквадратичним відхиленням (RMS-відхилення). У своєму дослідженні Енштейн використовував теорію ймовірностей для виведення рівняння дифузії для розподілу ймовірностей зважених частинок, що наведено у рівнянні (9).

$$\langle x^2 \rangle = 2Dt, \text{ м}^2, \quad (9)$$

де t (с) – час протягом, якого відбувається процес дифузії [24].

Для того, щоб показати відстань, яку проходить частинка в середньому за час t , використовують наступне рівняння (10):

$$\Delta X_{RMS} = \sqrt{\langle x^2 \rangle} = \sqrt{2Dt}, \text{ м}. \quad (10)$$

За 1 с, $\Delta X_{RMS} \approx 10^{-5}$ м, що значно більше за переміщення від Лоренцової «дрейфової» швидкості ($10^{-11} \times 1 \text{ с} = 10^{-11}$ м). Таким чином, тепловий (Броунівський) рух, для одного іона переважає [25].

Як ми бачимо одинична сила на точковий заряд малопомітна. Існують колективні шляхи, через які магнітне поле суттєво впливає на масоперенос у системах іонного обміну. Однак у системі з великою кількістю іонів їх сумарний рух утворює електричні мікроструми, зумовлені градієнтами концентрацій, локальними потенціалами та рухом рідини. Саме ці мікроструми, взаємодіючи з магнітним полем, породжують об'ємну силу густини – рівняння (11), яка впливає на масоперенесення.

$$f_{MHD} = J \times B, \text{ Н/м}^3, \quad (11)$$

де B (Тл) – вектор магнітної індукції; J (А/м²) – густина струму. Інтенсивність магнітогідродинамічних (МНД) ефектів визначається густиною струму J , яка прямо пропорційна електропровідності водного середовища. Для типових умов водних розчинів, електропровідність – $\sigma = 10^{-3} - 10^{-1}$ С/м та локальних електричних полів $E = 10^{-3} - 10^{-1}$ В/м, густина струму може досягати $J = 10^{-6} - 10^{-2}$ А/м². При більшій електропровідності (наприклад, у воді з більшим вмістом іонів) зростає густина струму, а отже – і МНД-компоненти сили Лоренца. Отже $f_{MHD} \approx 10^{-7} - 10^{-3}$ Н/м³.

За наявності значних електричних струмів у системі виникають об'ємні сили, що зумовлюють формування конвективних потоків — явище, відоме як магнітогідродинамічна (МНД) конвекція. Такі потоки зменшують товщину дифузійного шару біля поверхні іоніту та сприяють більш інтенсивному масообміну, як зображено на рис. 1.

Це відображається у зростанні коефіцієнта масоперенесення. Його величина описується залежністю (12):

$$k_L \sim \frac{D}{\delta}, \text{ м/с}, \quad (12)$$

де D – коефіцієнт молекулярної дифузії, м²/с; δ – товщина дифузійного (приграничного) шару, м.

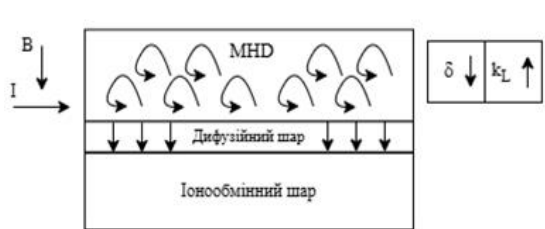


Рис. 1. Схематичне відображення впливу MHD-ефектів на дифузійний шар та коефіцієнт масоперенесення

Коефіцієнт визначає швидкість перенесення іонів із рідинної фази до поверхні іоніту – рівняння (13):

$$N = k_L(C_s - C_b, \text{ моль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})), \quad (13)$$

де N (моль/(\text{м}^2 \cdot \text{с})) – потік маси; C_s (моль/м³) – концентрація іонів на поверхні іоніту; C_b (моль/м³) – концентрація іонів у рідині.

У випадках, коли спостерігаються помітні електричні струми або поляризаційні потенціали, наявність зовнішнього магнітного поля може суттєво посилювати масообмін завдяки MHD-ефектам [26].

Окрім магнітогідродинамічної сили $J \times B$, у неоднорідних магнітних полях проявляється сила Кельвіна – об'ємна сила, яка діє на магнітно-поляризоване середовище. Цей ефект може зумовлювати локальний перерозподіл іонів та сприяти посиленню масоперенесення в приповерхневій зоні іоніту.[27]. При неоднорідному магнітному полі, дія сили Кельвіна виступає додатковим механізмом інтенсифікації процесів іонного обміну. Сила Кельвіна F_k виражена рівнянням (14):

$$F_k \approx (\chi/2\mu_0) \cdot \nabla(B^2), \text{ Н/м}^3, \quad (14)$$

де χ – магнітна сприйнятливості середовища; μ_0 (Н/А²) – магнітна стала, Н/А²; $\nabla(B^2)$ (Т²/м) – градієнт магнітної індукції [28].

Для парамагнітних солей ($\chi > 0$) тягне рідину в області сильнішого поля; для діаманітних – навпаки. Викликає магнітоконвекцію навіть без електричного струму, якщо $\nabla B \neq 0$ [29].

При наявності у шарі, поблизу іонообмінної смоли, локальних електричних струмів $J \times B$ збурює рідину, посилюючи підведення іонів до поверхні [30].

Для переходу від макроскопічного рівня, до мікроскопічного, скористаємось теорією Штерна. Отже ми розглядаємо, де проявляється, вплив магнітного поля.

Теорія Штерна описує подвійний електричний шар (ПЕШ), що виникає на межі поділу фаз. Згідно з моделлю Штерна, подвійний шар поділяється на дві частини, розділені площиною (площиною Штерна),

розташованою приблизно на радіусі гідратованого іона від поверхні. Центри будь-яких адсорбованих іонів розташовані в шарі Штерна, тобто між поверхнею та площиною Штерна. Іони з центрами, розташованими за площиною Штерна, утворюють дифузну частину подвійного шару, для якої застосовується метод Гуї-Чепмена [31,32].

Згідно з моделлю Гуї-Чепмена, розподіл електричного потенціалу в дифузному шарі описується експоненціальною залежністю (15) [33].

$$\psi(x) = \psi_d e^{-kx}, \quad (15)$$

де k (м⁻¹) – коефіцієнт затухання; x (м) – відстань від поверхні.

Товщина шару Дебая є термодинамічною характеристикою електролітного розчину і не зазнає прямого впливу з боку магнітного поля. Водночас магнітогідродинамічна (MHD) конвекція, зумовлена дією сили Лоренца ($J \times B$), змінює просторовий розподіл іонів у дифузному шарі. Унаслідок цього зменшується ефективний електричний потенціал на його межі. Отже магнітне поле опосередковано модифікує структуру подвійного електричного шару, підвищуючи ефективність масопереносу. Вплив MHD схематично відображено на рис. 2. [34].

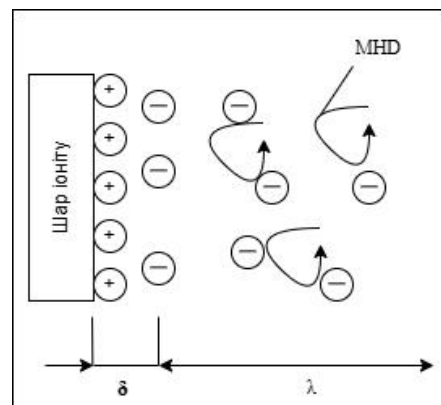


Рис. 2. Вплив MHD-конвекції на іонний розподіл дифузійного шару ПЕШ

На схематичному зображенні подвійний електричний шар, складається з: λ – товщина дифузійного іонного шару; δ – товщина компактного шару Штерна.

Отже, прикладене магнітне поле впливає на іонний транспорт двома взаємопов'язаними механізмами. На мікрорівні сила Лоренца діє на окремі іони ($F_L = q(v \times B)$), проте їхній індивідуальний дрейф незначний. На мезорівні виникає об'ємна сила ($f_{MHD} = J \times B$), яка зумовлює магнітогідродинамічну конвекцію. Згідно з моделлю Штерна, цей ефект реалізується у дифузному шарі електричного подвійного шару, тоді як шар Штерна визначає граничні умови та енергетику сорбції. Це пояснює

інтенсифікацію іонного обміну під дією магнітного поля.

Таким чином, врахування дії сил Лоренца, Кельвіна та магнітогідродинамічних ефектів дозволяє сформувати теоретичні передумови, що пояснюють вплив магнітного поля на процеси іонного обміну та розширюють їх наукове розуміння.

Висновки

Використання магнітної обробки у системах водопідготовки, є актуальним методом інтенсифікації процесу іонного обміну. Результати дослідження впливу магнітного поля демонструють наступне:

- Вплив магнітного поля на рідину та розчинені у ній іони зумовлений сукупністю фізико-хімічних механізмів, серед яких провідну роль відіграють сили електромагнітного походження – Лоренца та Кельвіна.
- Інтенсифікація процесу іонного обміну, під впливом магнітного поля, не може описуватись виключно силою Лоренца. Дія Сил Лоренца для окремого іона незначна, порівняно з тепловим (Броунівським) рухом. Для індукції магнітного поля $B = 0,5$ Тл і типових швидкостей мікропотоків $v = 10^{-3}$ м/с, сила Лоренца на окремий іон становить порядку 10^{-22} Н. Колективна дія іонних мікрострумів породжує об'ємну силу густини $f_{MHD} \approx 10^{-7} - 10^{-3}$ Н/м³, здатні створювати конвективні потоки, які інтенсифікують масоперенесення.
- Відповідно до моделі Штерна–Гуї–Чепмена, магнітне поле опосередковано впливає на структуру подвійного електричного шару, зменшуючи ефективний потенціал на межі розділу фаз і змінюючи кінетику обмінних процесів.
- Наукова новизна роботи полягає у теоретичному узагальненні дії магнітного поля на процеси іонного обміну, через взаємодію сил Лоренца, Кельвіна та магнітогідродинамічних ефектів, що дозволяє пояснити механізм магнітної активації
- Практична цінність отриманих результатів полягає у можливості використання встановлених закономірностей, для оптимізації процесів іонного обміну у системах водопідготовки. Це дозволяє прогнозувати зміни масоперенесення під дією магнітного поля, для підвищення ефективності процесу демінералізації води..

Література

1. Строкаль, В. П., Ковпак, А. В. Воснні конфлікти та вода: наслідки й ризики // *Environmental and Ecoengineering Journal*. – 2022. – Vol. 5, No. 44. – DOI: [10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.14](https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.14). – (укр.)
2. Zaidi, N. S., Sohaili, J., Muda, K., Sillanpää, M. Magnetic field application and its potential in water and wastewater treatment systems // *Separation & Purification*

Reviews. – 2013. – Vol. 43, No. 3. – P. 206–240. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1080/15422119.2013.794148>. – (англ.)

3. Li, Q., Wu, J., Hua, M. et al. Preparation of permanent magnetic resin crosslinking by diallyl itaconate and its adsorptive and anti-fouling behaviors for humic acid removal // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7. – P. 17103. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17360-8> – (англ.)

4. Niculescu, A.-G., Mihaiescu, B., Mihaiescu, D., Hadibarata, T., Grumezescu, A. An Updated Overview of Magnetic Composites for Water Decontamination // *Polymers* – 2024. – Vol. 16, No. 5. – P. 709. – DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16050709>. – (англ.)

5. Dzyazko, Y. S., Ponomarova, L. N. Hybrid organic-inorganic nanocomposites for ion-exchange processes // *In Membrane and Sorption Materials and Technologies: Present and Future*. – V.I. Vernadskii Institute of General & Inorganic Chemistry of the NAS of Ukraine; Sumy State University. – Режим доступу: <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/28759> (дата звернення: 19.10.2025). – (англ.)

6. Ramezani, A., Faghieh Khorasani, A., Ayoobi, A. Experimental study on transient pool boiling heat transfer of deionized water under an alternating magnetic field // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2025. – Vol. 161. – P. 108450. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108450>. – (англ.)

7. Higashitani, K., Oshitani, J., Ohmura, N. Effects of magnetic field on water investigated with fluorescent probes // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 1996. – Vol. 109. – P. 167–173. – DOI: [https://doi.org/10.1016/0927-7757\(95\)03483-8](https://doi.org/10.1016/0927-7757(95)03483-8). – (англ.)

8. Esmailnezhad, E., Choi, H. J., Schaffie, M., Gholizadeh, M., Ranjbar, M. Characteristics and applications of magnetized water as a green technology // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 161. – P. 908–921. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.166>. – (англ.)

9. Martín Algarra, R. V., Lahuerta Zamora, L., Antón Fos, G. M., Alemán López, P. A. Magnetized water: Science or fraud? // *Journal of Chemical Education*. – 2008. – Vol. 85, No. 10. – P. 1416. – DOI: <https://doi.org/10.1021/ed085p1416>. – (англ.)

10. Cai, R., Yang, H., He, J., Zhu, W. The effects of magnetic fields on water molecular hydrogen bonds // *Journal of Molecular Structure*. – 2009. – Vol. 938, No. 1–3. – P. 15–19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2009.08.037>. – (англ.)

11. Abu-Saied, M. A., El Desouky, E. A., Abou Kamer, M. E., Hafez, M., Rashad, M. Influence of magnetic field on the physicochemical properties of water molecule under growing of cucumber plant in an arid region // *Journal of King Saud University – Science*. – 2023. – Vol. 35, No. 8. – P. 102890. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102890>. – (англ.)

12. Amiri, M. C., Dadkhah, A. A. On reduction in the surface tension of water due to magnetic treatment // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2006. – Vol. 278, No. 1–3. – P. 252–255. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.12.046>. – (англ.)

13. Abdelsalam, H., Mostafa, H., El-Ansary, M., Awad, M., Sultan, W. Magnetization treatment effect on some physical and biological characteristics of saline irrigation water //

Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15, No. 1. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-04297-6>. – (англ.)

14. Sayed, A. A. M., Basu, S., Ogawa, T., Inagawa, K., Okumura, H. Elucidating the memory effects of magnetic water treatment via precipitated phase changes of calcium carbonate // *Eng.* – 2025. – Vol. 6, No. 2. – P. 26. – DOI: <https://doi.org/10.3390/eng6020026>. – (англ.)

15. Martínez Moya, S., Boluda Botella, N. Review of techniques to reduce and prevent carbonate scale prospecting in water treatment by magnetism and electromagnetism // *Water*. – 2021. – Vol. 13, No. 17. – P. 2365. – DOI: <https://doi.org/10.3390/w13172365>. – (англ.)

16. Lin, L., Jiang, W., Xu, X., Xu, P. A critical review of the application of electromagnetic fields for scaling control in water systems: Mechanisms, characterization, and operation // *npj Clean Water*. – 2020. – Vol. 3, No. 1. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41545-020-0071-9>. – (англ.)

17. Alimi, F. Influence of Magnetic Field on Calcium Carbonate Precipitation: A Critical Review // *Magnetochemistry*. – 2024. – Vol. 10, No. 11. – P. 83. – DOI: <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry10110083>. – (англ.)

18. Kovtun, D. E., Dushkin, S. S. Magnetic modification of ion exchange processes // *Technogenic and Ecological Safety*. – 2024. – Vol. 15, No. 1/2024. – P. 75–79. – DOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2024.1.8>. – (англ.)

19. Amor, H., Elaoud, A., Hozayn, M. Does magnetic field change water pH? // *Asian Research Journal of Agriculture*. – 2018. – Vol. 8, No. 1. – P. 1–7. – DOI: <https://doi.org/10.9734/arja/2018/39196>. – (англ.)

20. MIT OpenCourseWare. Electromagnetic forces [Chapter 5] [Електронний ресурс] // In 6.013 *Electromagnetics and applications*. – Massachusetts Institute of Technology, 2009. – Режим доступу: https://ocw.mit.edu/courses/6-013-electromagnetics-and-applications-spring-2009/d3be4ea78b036a6362230fb41780cf54/MIT6_013S09_notes.pdf (дата звернення: 20.10.2025). – (англ.)

21. Dey, S., Zeeshan Ali, S., Padhi, E. Terminal fall velocity: The legacy of Stokes from the perspective of fluvial hydraulics // *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2019. – Vol. 475, No. 2228. – P. 20190277. – DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.2019.0277>. – (англ.)

22. Einstein, A. Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen [A new determination of molecular dimensions] [Електронний ресурс] // *Archiv für Elektrotechnik*. – 1905. – Режим доступу: <https://archive.org/details/EineNeueBestimmungDerMolekldimensionen1905AlbertEinstein/page/n9/mode/2up> (дата звернення: 20.10.2025). – (нім.)

23. Spiechowicz, J., Marchenko, I. G., Hänggi, P., Łuczka, J. Diffusion coefficient of a Brownian particle in equilibrium and nonequilibrium: Einstein model and beyond // *Entropy*. – 2022. – Vol. 25, No. 1. – P. 42. – DOI: <https://doi.org/10.3390/e25010042>. – (англ.)

24. Wu, K.-T. Stokes–Einstein equation [Електронний ресурс]. – Worcester Polytechnic Institute, 2019. – Режим доступу: <https://users.wpi.edu/~kwu/Teaching/PH2651/stokes-einstein-equation.pdf> (дата звернення: 20.10.2025). – (англ.)

25. Qian, S., Bau, H. H. Magneto-hydrodynamics based microfluidics // *Mechanics Research Communications*. – 2009. – Vol. 36, No. 1. – P. 10–21. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2008.06.013>. – (англ.)

26. Monzon, L. M. A., Coey, J. M. D. Magnetic fields in electrochemistry: The Kelvin force. A mini-review // *Electrochemistry Communications*. – 2014. – Vol. 42. – P. 42–45. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2014.02.005>. – (англ.)

27. Monzon, L. M. A., Coey, J. M. D. Magnetic fields in electrochemistry: The Kelvin force. A mini-review // *Electrochemistry Communications*. – 2014. – Vol. 42. – P. 42–45. – DOI: [10.1016/j.elecom.2014.02.005](https://doi.org/10.1016/j.elecom.2014.02.005). – (англ.)

28. Butcher, T. A., Coey, J. M. D. Magnetic Forces in Paramagnetic Fluids // *arXiv*. – 2022. – DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.10529>. – (англ.)

29. Kovtun, D., Dushkin, S. Magnetic activation of ion exchange process during demineralisation of natural waters // *Technogenic and Ecological Safety*. – 2024. – Vol. 16, No. 2. – P. 54–60. – DOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2024.2.8>. – (англ.)

30. Allagui, A., Benaoum, H., Olendski, O. On the Gouy–Chapman–Stern model of the electrical double-layer structure with a generalized Boltzmann factor // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. – 2021. – Vol. 582. – P. 126252. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126252>. – (англ.)

31. Chapman, D. L. LI. A contribution to the theory of electrocapillarity // *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. – 1913. – Vol. 25, No. 148. – P. 475–481. – DOI: <https://doi.org/10.1080/14786440408634187>. – (англ.)

32. Markovich, T., Andelman, D., Podgornik, R. Poisson–Boltzmann theory, DLVO paradigm and beyond // *arXiv*. – 2016. – Режим доступу: <https://arxiv.org/pdf/1603.09451> (дата звернення: 20.10.2025). – (англ.)

33. Chang, Q. Electrical properties // *In Colloid and interface chemistry for water quality control*. – Elsevier, 2016. – P. 79–136. – DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809315-3.00007-4>. – (англ.)

34. Jawad, S. I., Karkush, M., Kaliakin, V. N. Alteration of physicochemical properties of tap water passing through different intensities of magnetic field // *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. – 2023. – Vol. 32, No. 1. – P. 23–32. – DOI: <https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0246>. – (англ.)

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.М. Кондратенко, Національний університет цивільного захисту України, Україна.

Автор: КОВТУН Давід Євгенович

аспірант

Національний університет цивільного захисту України, Україна

E-mail – davidkovtun15@gmail.com

ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8911-4148>

Автор: КОЛОСКОВ Володимир Юрійович
проф., доцент, к.т.н.

Національний університет цивільного захисту
України, Україна
E-mail – koloskov_v@ukr.net
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9844-1845>

THE EFFECT OF MAGNETIC FIELDS ON ION EXCHANGE PROCESSES

D. Kovtun, V. Koloskov

National University of Civil Defence of Ukraine, Ukraine

The article provides a comprehensive analysis of the influence of magnetic fields on ion exchange processes in water demineralization technologies. It considers the physicochemical mechanisms that determine the behavior of ions in the presence of magnetic fields and their influence on the kinetics, thermodynamics, and efficiency of sorption processes. Particular attention is paid to the role of electromagnetic forces, in particular the Lorentz force, which determines the motion of charged particles in a magnetic field, and the Kelvin force, which manifests itself in inhomogeneous magnetic fields and causes local redistribution of ions in the surface layers of the liquid.

It is shown that the individual drift of separate ions under the action of the Lorentz force is practically insignificant due to the predominance of Brownian motion. However, in systems with a large number of ions, the total motion creates local electric currents, whose interaction with an external magnetic field leads to the emergence of volumetric magnetohydrodynamic (MHD) flows. These effects reduce the thickness of the diffusion layer near the surface of ionites, increase the mass transfer coefficient and the intensity of sorption. The Stern–Gui–Chapman model allows describing the influence of magnetic fields on the structure of the double electric layer, reducing the effective potential at the phase boundary and changing the kinetics of ion exchange.

In addition to micro-level effects, thermodynamic aspects of magnetic activation are considered. It has been established that the effect of the magnetic field depends on temperature: at temperatures around 25 °C, there is an intensification of the formation of finely dispersed and amorphous sediment structures, which reduces their adhesive capacity and slows down the transition of aragonite to calcite.

Thus, taking into account the action of the Lorentz and Kelvin forces and magnetohydrodynamic effects creates a scientific basis for explaining the influence of the magnetic field on ion exchange processes and deepens the understanding of the mechanisms of magnetic activation. A comprehensive analysis of the interaction of magnetic fields with ion motion, the structure of the double electric layer, and local convective flows allows us to more clearly determine how the kinetics of ion exchange change under conditions of magnetic activation. The results show that the magnetic field not only affects individual particles through the Lorentz force, but also stimulates the formation of collective electric microcurrents, which, in turn, enhances mass transfer due to magnetohydrodynamic convection and local Kelvin effects.

The integration of theoretical understanding of the influence of Lorentz forces, Kelvin forces, and magnetohydrodynamic effects into the modeling and practical application of ion exchange processes opens up new opportunities for optimizing water treatment technologies and in-depth research into the mechanisms of magnetic activation in physicochemical systems.

Keywords: ion, magnet, intensification, influence, ionite, water treatment.