

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЗАГАЛЬНОЇ ТА НЕОРГАНІЧНОЇ ХІМІЇ ім.В.І.ВЕРНАДСЬКОГО

ЗАТВЕРДЖЕНО
Вченою радою Інституту загальної та неорганічної хімії
ім. В.І. Вернадського НАН України
протокол № 8
від « 04 » вересня 2025 року



Голова Вченої ради Інституту
Сергій СОЛОПАН

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ (СИЛАБУС)

ЕЛЕКТРОХІМІЧНА ЕНЕРГЕТИКА

(назва навчальної дисципліни)

Рівень вищої освіти: **Третій (освітньо-науковий)**

Галузь знань: **10 Природничі науки**

Спеціальність: **102 Хімія**

Освітньо- наукова програма: **Неорганічна і координаційна хімія, фізична хімія, електрохімія**

Київ
2025

Робоча програма навчальної дисципліни «Електрохімічна енергетика» - Київ, 2025. – 13 с.

РОЗРОБНИКИ РОБОЧОЇ ПРОГРАМИ:

Пірський Юрій Кузьмич, провідний науковий співробітник
ІЗНХ ім. В.І. Вернадського НАН України, доктор хімічних наук,
старший науковий співробітник



(підпис)

Погоджено із гарантом ОНП



Анатолій ОМЕЛЬЧУК

Програму затверджено на засіданні Вченої ради
Інституту загальної та неорганічної хімії ім. В.І. Вернадського НАН України
протокол № 8
від «04» вересня 2025 року

Вчений секретар Інституту



Людмила ЛИСЮК

1. Опис навчальної дисципліни

Найменування показників	Характеристика навчальної дисципліни
Загальна кількість: кредитів – 1 годин – 30 змістових модулів – 1	<i>Обов'язкова навчальна дисципліна - Електрохімічна енергетика</i>
	<i>Рік підготовки – 2 курс</i>
	<i>Лекції - 8 год.</i>
	<i>Практичні - 4 год.</i>
	<i>Консультації 2 год.</i>
	<i>Лабораторні заняття не передбаченні</i>
	<i>Самостійна робота - 16 год.</i>
	<i>Форма підсумкового контролю: згідно з навчальним планом - іспит</i>

2. Мета та завдання навчальної дисципліни

Мета навчальної дисципліни:

- освоєння курсу електрохімічної енергетики повинно бути основою підготовки молодих фахівців високого рівня в галузі електрохімії, що має дозволити успішно працювати їм в різних областях науки і техніки, що використовують електрохімічні методи, а також в галузі професійної освіти;
- Формування знань і умінь в області електрохімічної енергетики. Освоєння навчальної програми по електрохімічній енергетики;
- Вивчення теорії і методів вирішення завдань в галузях теоретичної і прикладної електрохімії.

Завдання навчальної дисципліни:

Освоєння методів електрохімічної енергетики для практичного її використання для вдосконалення існуючих та розробки нових пристроїв в області електрохімічної енергетики;

Сформувані навички і вміння практичного використання отриманих знань.

Вивчити методи, підходи до вирішення різноманітних наукових і прикладних проблем, пов'язаних з електрохімією.

Аспірант з даної дисципліни повинен мати базові знання з неорганічної хімії та електрохімії. Для вивчення даної дисципліни необхідно мати вищу освіту з вивченням курсу фізичної хімії або хімічної фізики для хімічних спеціальностей.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти після засвоєння навчальної дисципліни мають продемонструвати такі результати навчання:

Предмет дисципліни:

Предметом вивчення навчальної дисципліни є досягнення світової науки в галузі електрохімічної енергетики, ознайомлення з пріоритетними напрямками досліджень й сучасними здобутками вчених – українських і зарубіжних, що розвивають фундаментальні основи теорії і методів вирішення завдань в галузях теоретичної і прикладної електрохімії.

Освоєння курсу електрохімічної енергетики повинно бути основою підготовки молодих фахівців високого рівня в галузі електрохімії, що має дозволити успішно працювати їм в різних областях науки і техніки, що використовують електрохімічні методи, а також в галузі професійної освіти. Формування знань та умінь в області електрохімічної енергетики. Освоєння навчальної програми по електрохімічній енергетики.

Процес вивчення дисципліни спрямований на формування елементів наступних компетентностей:

В рамках даної дисципліни поглиблюються і розвиваються такі компетенції:

а) загальні компетенції:

ЗК4, ЗК7, ЗК8

б) спеціальні компетенції:

СК1, СК2, СК6, СК7, СК8

Програмні результати навчання (ПРН): ПРН 2, ПРН 4, ПРН 10, ПРН 12, ПРН 16, ПРН 20.

У результаті вивчення навчальної дисципліни здобувач вищої освіти повинен **знати:**

Традиційні хімічні джерела струму. Основні поняття. Струмоутворюючі та інші процеси. Основи конструкції джерел струму. Основні типи первинних

елементів і акумуляторів. Літієві електрохімічні системи. Особливості літієвого електрода. Електрохімічні системи первинних елементів. Струмоутворюючі процеси. Основні характеристики первинних елементів. Літій-іонні акумулятори. Основи конструкції та технології літій-іонних акумуляторів. Основні характеристики літій-іонних акумуляторів. Паливні елементи (ПЕ). Проблема прямого перетворення енергії палива в електричну. Принцип роботи і класифікація паливних елементів. Пористі електроди. Макрокінетика в паливних елементах. Електрокаталіз в паливних елементах. Основи конструкції та технології паливних елементів. Суперконденсатори. Типи електрохімічних конденсаторів. Електроди двошарових конденсаторів. Пристрій і принцип роботи гібридних суперконденсаторів. Загальні характеристики суперконденсаторів

вміти: . використовувати набуті знання з електрохімічної енергетики для виконання стратегічних і поточних завдань у широкому діапазоні робочих ситуацій та повсякденному житті.

Міждисциплінарні зв'язки.

Навчальна дисципліна «**Електрохімічна енергетика**» згідно з навчальним планом належить до циклу дисциплін професійної підготовки, яка викладається на 2, 3 курсах аспірантури. Базою для вивчення даної дисципліни є курси “Неорганічна хімія”, “Фізична хімія”, “Електрохімія”, “Електрохімічні методи досліджень”, що вивчаються за напрямками підготовки спеціалістів, магістрів спеціальності “Хімія”.

Матеріал курсу слугує теоретичною основою для формування умінь і навичок, необхідних для ефективної дослідницької роботи, аналізу прикладних аспектів в галузі теоретичної і прикладної електрохімії із застосуванням фундаментальних знань для розв'язання практичних задач.

3. Зміст навчальної дисципліни "Електрохімічна енергетика"

Тема 1. Вступ. Електрохімічна енергетика. Традиційні хімічні джерела струму.

Поняття електрохімічна енергетика. Класифікація електрохімічних систем перетворення енергії. Галузі використання ХДС. Основні типи первинних елементів і акумуляторів

Тема 2 . Літієві електрохімічні системи.

Особливості літєвого електрода. Електрохімічні системи первинних літєвих елементів. Струм-утворюючі процеси. Основні характеристики первинних елементів. Літєві, літій-іонні та літій-іон-полімерні акумулятори. Нові матеріали для літєвих, літій-іонних та літій-іон-полімерних акумуляторів.

Тема 3 . Паливні елементи.

Історичні аспекти ПЕ. Проблема прямого перетворення енергії палива в електричну. Принцип роботи і класифікація паливних елементів. Термодинаміка і кінетика процесів в ПЕ.

Тема 4 . Суперконденсатори.

Типи електрохімічних конденсаторів. Електроди двошарових конденсаторів. Пристрій і принцип роботи гібридних суперконденсаторів. Основні характеристики суперконденсаторів.

4. Темі лекційних занять

№, з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Вступ. Електрохімічна енергетика. Традиційні хімічні джерела струму Поняття електрохімічна енергетика. Класифікація електрохімічних систем перетворення енергії. Галузі використання ХДС. Основні типи первинних елементів і акумуляторів	2
2	Літєві електрохімічні системи. Особливості літєвого електрода. Електрохімічні системи первинних літєвих елементів. Струм-утворюючі процеси. Основні характеристики первинних елементів. Літєві, літій-іонні та літій-іон-полімерні акумулятори. Нові матеріали для літєвих, літій-іонних та літій-іон-полімерних акумуляторів.	2
3	Паливні елементи. Історичні аспекти ПЕ. Проблема прямого перетворення енергії палива в електричну. Принцип роботи і класифікація паливних елементів. Термодинаміка і кінетика процесів в ПЕ.	2
4	Суперконденсатори. Типи електрохімічних конденсаторів. Електроди подвійношарових конденсаторів. Принцип роботи гібридних суперконденсаторів. Основні характеристики суперконденсаторів.	2

5. Теми семінарських занять

Семінарські заняття не передбачені.

6. Теми практичних занять

№, з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Загальні принципи роботи сучасних хімічних джерел струму та паливних елементів. Механізм виникнення в ХДС електричного струму та сутність хімічних реакцій, що лежать в основі їх роботи.	2
2	Електрохімічні системи для зберігання та перетворення енергії: від літєвих акумуляторів до суперконденсаторів	2

7. Теми лабораторних занять

Лабораторні заняття не передбачені.

8. Самостійна робота

№, з/п	Назва теми	Кількість годин
1.	Поняття електрохімічна енергетика. Технічні об'єкти електрохімічної енергетики.	1
2.	Класифікація електрохімічних систем перетворення енергії.	1
3.	Традиційні хімічні джерела струму. Основні типи первинних елементів	1
4.	Традиційні хімічні джерела струму. Основні типи акумуляторів	1
5.	Літєві електрохімічні системи. Особливості літєвого електрода.	1
6.	Електрохімічні системи первинних літєвих елементів.	1
7.	Струм-утворюючі процеси в первинних літєвих елементах.	1
8.	Літєві, літій-іонні та літій-іон-полімерні акумулятори	1
9.	Основні характеристики первинних літєвих елементів.	1
10.	Нові матеріали для літєвих, літій-іонних та літій-іон-полімерних акумуляторів	1
11.	Паливні елементи. Проблема прямого перетворення енергії палива в електричну.	1
12.	Принцип роботи паливних елементів.	1
13.	Класифікація паливних елементів.	1
14.	Типи електрохімічних конденсаторів.	1
15.	Електроди подвійношарових конденсаторів.	1
16.	Основні характеристики і принцип роботи гібридних суперконденсаторів.	1

9. Форми контролю і методи оцінювання

(у т.ч. критерії оцінювання результатів навчання)

Поточний контроль здійснюється під час проведення практичних занять і має на меті перевірку засвоєння аспірантами навчального матеріалу. Формами поточного контролю є:

- а) тестові завдання з вибором однієї правильної відповіді, з визначенням правильної послідовності дій, з визначенням відповідності, з визначенням певної ділянки на фотографії чи схемі («розпізнавання»);
- б) індивідуальне усне опитування, співбесіда;
- в) розв'язання типових ситуаційних задач;
- д) контроль практичних навичок;

Комплексне оцінювання навчальної діяльності здійснюється виставлення традиційної оцінки, яка конвертується у бали відповідно у кожному з занять, аспірант отримує на практичному занятті: оцінку «відмінно» - якщо він виконав правильно не менше 90% навчальних завдань; оцінку «добре» - якщо він виконав правильно не менше 80% навчальних завдань; оцінку «задовільно» - якщо він виконав правильно не менше 60% навчальних завдань; оцінку «незадовільно» - якщо він виконав правильно менше 60% навчальних завдань; На кінцевому етапі заняття викладач виставляє набрану суму балів і традиційну оцінку в журналі успішності.

Самостійна робота аспіранта оцінюється на практичних заняттях і є складовою підсумкової оцінки аспіранта.

Підсумковий контроль. Загальна система оцінювання проводиться по завершенню вивчення дисципліни у вигляді заліку. Шкали оцінювання національна та ECTS.

10. Питання для підсумкового контролю

1. Загальні поняття о ХДС. Пристрій ХДС.
2. Параметри, що характеризують акумуляторні ХДС. Побічні процеси в ХДС.
3. Порівняння характеристик біполярних пластин (БП) з вуглець-полімерних композитів та металевих БП, їх переваги і недоліки.

4. Класифікація ХДС. Струмоутворюючі реакції в ХДС.
5. Традиційні ХДС з водним електролітом. ХДС з цинковим анодом.
6. Газодифузійні шари, їх функції в ТППЕ, вимоги до них.
7. Основні матеріали для ГДС і способи їх отримання.
8. Розчинники і солі, що використовуються в літєвих ХДС. Взаємодія літію з розчинниками (пропіленкарбонат, етіленкарбонат) і газами (O_2 , CO_2 , N_2).
9. Основні типи каталізаторів для ТППЕ, структура і методи їх отримання.
10. Електрохімічні процеси в ХІТ різних типів (на прикладі електрохімічних систем Zn/MnO_2 і Zn/Ag_2O).
11. Паливні елементи. Принцип роботи та історія розвитку.
12. Розрахунок ЕРС і її залежність від температури і концентрації електроліту (на прикладі свинцевого акумулятора). Режим роботи свинцевих акумуляторів та особливості їх експлуатації.
13. Вибір електродні матеріали для ХІТ (питомі параметри, електродні потенціали, збереження заряду, економічна доцільність і ін.).
14. Перерахувати найбільш поширені матеріали мембран для ТППЕ. Механізм провідності і структура мембран типу Nafion®.
15. Термодинамічні характеристики ТППЕ. Розрахунок величин ЕРС і ККД, їх залежність від температури, тиску і складу газового середовища
16. Термодинаміка ХДС. Розрахунок електрорушійної сили (ЕРС) і її залежність від температури і концентрації реагентів для електрохімічних систем з цинковим анодом.
17. Матеріали біполярних пластин та вимоги к ним, их функції.
18. Кінетика електродних процесів в ПЕ. Загальний вигляд ВАХ; перенапруження переносу заряду, омические втрати, концентраційна поляризація, їх вплив на робочі характеристики ПЕ.1
19. Порівняння характеристик різних первинних і вторинних електрохімічних систем. Комерційна динаміка випуску акумуляторів різних систем.
20. Інтеркаляція літію в вуглець і оксиди металів. Літій-іонний акумулятор.

21. Метанольні, етанольні і боргідридні паливні елементи. Перспективи розвитку паливних елементів.
22. Основні електричні параметри ХДС: напруга, потужність, місткість, енергія.
23. Проблема літєвих ХДС які здатні перезаряджатися. Літєві акумулятори з металевим літєм.
24. Система $H_2/NiOOH$ (нікель-металгідридний акумулятор).
25. Поняття про питомі, номінальні та граничні параметри ХДС.
26. Літєві ХДС з твердим катодом. Система Li/CuO .
27. Перерахувати основні типи паливних елементів, для кожного з них записати рівняння реакцій, що протікають на катоді і на аноді.
28. Низькотемпературний паливний елемент з полімерної протонопровідною мембраною.
29. Типи електрохімічних конденсаторів: електролітичні, двохшарові конденсатори, псевдоконденсатори. Відмінності електрохімічних конденсаторів від ХДС, перевага і недоліки.
30. ХДС для електромобілів. Варіанти рішень енергоустановки: з акумулятором, паливним елементом, гібридна система.

11. Розподіл балів

Форма для іспиту

Поточний та періодичний контроль	Підсумковий контроль (іспит)	Сума балів
Змістовий модуль №1		
60	40	100

Шкала оцінювання: національна та ECTS

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою	
		для іспиту	для заліку
90-100	A	відмінно	зараховано
82-89	B	добре	
74-81	C	задовільно	
64-73	D		
60-63	E	незадовільно з	не зараховано з
35-59	Fx		

		МОЖЛИВІСТЮ ПОВТОРНОГО СКЛАДАННЯ	МОЖЛИВІСТЮ ПОВТОРНОГО СКЛАДАННЯ
0-34	F	незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни	не зараховано з обов'язковим повторним вивченням дисципліни

12. Рекомендована література

Основна:

1. Кошель М. Д. Теоретичні основи електрохімічної енергетики. Дніпропетровськ: УДХТУ, 2002.
2. Handbook of Batteries / Ed. David Linden, 3rd ed. New York, McGraw-Hill, Inc. 2002
3. Lithium Batteries. Science and Technology /eds. G.-A.Nazri and G.Pistoia Springer, 2009

Додаткова

1. Vladimir S. Bagotsky, Fuel Cells: Problems and Solutions, Hoboken: Wiley, The Electrochemical Society Series, 2009. 320 p.
2. Conway B.E. Electrochemical Supercapacitors. Scientific Fundamentals and Technological Applications. New York, Kluwer, 1999
3. Волков С. В., Присяжний В. Д. Холодне горіння. - Київ: Наукова думка, 1972.
4. Dr. Aneeya K. Samantara Materials Development for Active/Passive Components of a Supercapacitor in SpringerBriefs in Materials (2018)
5. Prof. Kamal K. Kar Handbook of Nanocomposite Supercapacitor Materials II, Performance, in Springer Series in Materials Science (2020)
6. Prof. Kamal K. Kar Handbook of Nanocomposite Supercapacitor Materials I, Characteristics in Springer Series in Materials Science (2020)
7. Prof. Kamal K. Kar Handbook of Nanocomposite Supercapacitor Materials III, Selection. in Springer Series in Materials Science (2021)
8. Klaus-Dieter Kreuer. Fuel Cells, Selected Entries from the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology (2013)

9. Supramaniam Srinivasan. Fuel Cells, From Fundamentals to Applications (2006)
10. Luca Spiridigliozzi Fuel Cells, in Doped-Ceria Electrolytes (2018)
- 11 Manfred Klell, Helmut Eichlseder, Alexander Trattner. Fuel Cells, in Hydrogen in Automotive Engineering (2023)
12. Crompton T. R. Rechargeable Small Batteries in Small Batteries (1982)
https://doi.org/10.1007/978-1-349-04633-1_1
13. Crompton. T. R. Small Batteries Volume 2 Primary Cells (1982)
<https://doi.org/10.1007/978-1-349-06319-2>
14. Crompton. T. R. Small Batteries Volume 1 Secondary Cells (1982)
<https://doi.org/10.1007/978-1-349-04633-1>

Інформаційні ресурси

1. Larcher, D., Tarascon, J.M.: Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage. *Nat. Chem.* **7**, 19–29 (2015).
<https://doi.org/10.1038/nchem.2085>
2. Tarascon, J.M., Armand, M.: Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature* **414**, 359–367 (2001). <https://doi.org/10.1038/35104644>
3. Zhang, S.S., Xu, K., Jow, T.R.: Low temperature performance of graphite electrode in Li-ion cells. *Electrochim. Acta* **48**, 241–246 (2002).
[https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(02\)00620-5](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(02)00620-5)
4. Nagasubramanian, G.: Electrical characteristics of 18 650 Li-ion cells at low temperatures. *J. Appl. Electrochem.* **31**, 99–104 (2001).
<https://doi.org/10.1023/A:1004113825283>
5. Zhu, G.L., Wen, K.C., Lv, W.Q., et al.: Materials insights into low-temperature performances of lithium-ion batteries. *J. Power Sources* **300**, 29–40 (2015).
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.09.056>
6. Xu, K.: Nonaqueous liquid electrolytes for lithium-based rechargeable batteries. *ChemInform* **35**, 5 (2004). <https://doi.org/10.1002/chin.200450271>
7. Fong, K.D., Self, J., Diederichsen, K.M., et al.: Ion transport and the true transference number in nonaqueous polyelectrolyte solutions for lithium ion batteries. *ACS Cent. Sci.* **5**, 1250–1260 (2019). <https://doi.org/10.1021/acscentsci.9b00406>
8. Piao, N., Gao, X.N., Yang, H.C., et al.: Challenges and development of lithium-ion batteries for low temperature environments. *eTransportation* **11**, 100145 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2021.100145>

9. Qian, Y.X., Chu, Y.L., Zheng, Z.T., et al.: A new cyclic carbonate enables high power/low temperature lithium-ion batteries. *Energy Storage Mater.* **45**, 14–23 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2021.11.029>
10. Xu, K., von Cresce, A., Lee, U.: Differentiating contributions to “ion transfer” barrier from interphasial resistance and Li⁺ desolvation at electrolyte/graphite interface. *Langmuir* **26**, 11538–11543 (2010). <https://doi.org/10.1021/la1009994>
11. Jow, T.R., Delp, S.A., Allen, J.L., et al.: Factors limiting Li⁺ charge transfer kinetics in Li-ion batteries. *J. Electrochem. Soc.* **165**, A361–A367 (2018). <https://doi.org/10.1149/2.1221802jes>
12. Zhang, S.S.: Challenges and strategies for fast charge of Li-ion batteries. *ChemElectroChem* **7**, 3569–3577 (2020). <https://doi.org/10.1002/celec.202000650>
13. Li, Q.Y., Lu, D.P., Zheng, J.M., et al.: Li⁺-desolvation dictating lithium-ion battery’s low-temperature performances. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **9**, 42761–42768 (2017). <https://doi.org/10.1021/acsami.7b13887>
14. Zhang, S.S., Xu, K., Jow, T.R.: The low temperature performance of Li-ion batteries. *J. Power Sources* **115**, 137–140 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00618-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00618-3)
15. Fan, J., Tan, S.: Studies on charging lithium-ion cells at low temperatures. *J. Electrochem. Soc.* **153**, A1081 (2006). <https://doi.org/10.1149/1.2190029>
16. Wang, C.Y., Zhang, G.S., Ge, S.H., et al.: Lithium-ion battery structure that self-heats at low temperatures. *Nature* **529**, 515–518 (2016). <https://doi.org/10.1038/nature16502>
17. Lin, W., Zhu, M.Y., Fan, Y., et al.: Low temperature lithium-ion batteries electrolytes: rational design, advancements, and future perspectives. *J. Alloys Compd.* **905**, 164163 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164163>
18. Ding, M.S.: Liquid-solid phase diagrams of ternary and quaternary organic carbonates. *J. Electrochem. Soc.* **151**, A731 (2004). <https://doi.org/10.1149/1.1690782>
19. Dong, X.L., Wang, Y.G., Xia, Y.Y.: Promoting rechargeable batteries operated at low temperature. *Acc. Chem. Res.* **54**, 3883–3894 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.1c00420>
20. Smart, M.C., Ratnakumar, B.V., Surampudi, S.: Electrolytes for low-temperature lithium batteries based on ternary mixtures of aliphatic carbonates. *J. Electrochem. Soc.* **146**, 486–492 (1999). <https://doi.org/10.1149/1.1391633>