



# Journal of Chemistry and Technologies

pISSN 2663-2934 (Print), ISSN 2663-2942 (Online).

journal homepage: <http://chemistry.dnu.dp.ua>



UDC 547.8

## N-SUBSTITUTED PYRIDINE SALTS WITH PHTHALIMIDE-N-OXYL ANION

Hanna O. Serhieieva\*<sup>1</sup>, Mykhajlo O. Kompanets<sup>2</sup>, Olena Ju. Nesterova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Oles Honchar Dnipro National University, 72 Gagarina Avenue, Dnipro 49010, Ukraine

<sup>2</sup>L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic Chemistry and Coal Chemistry NAS of Ukraine, Kharkivs'ke shose St., 50, Kyiv 02155, Ukraine

Received 31 August 2023; accepted 20 September 2023; available online 25 October 2023

### Abstract

Currently, various biological activities of pyridine derivatives are widely studied, the type and strength of which depends on the presence of a substituent in the molecule. The aromatic pyridine ring plays an important role in the metabolism of a living organism. It is an oxidative system, cleaving the hydride in nicotinamide adenine dinucleotide (NAD<sup>+</sup>) – a component of the dehydrogenase enzyme. Derivatives of pyridine salts are part of a variety of medicines that are used for the prevention, diagnosis and treatment of diseases of the human body as well. Therefore, we synthesized new water-soluble derivatives of N-benzylpyridinium 3-carboxamide phthalimide-N-oxyl, N-propylpyridinium 3-carboxamide phthalimide-N-oxyl and N-methylpyridinium 3-carboxamide phthalimide-N-oxyl with a pyridine ring. The reactions occurred during the interaction of the corresponding N-substituted pyridine salts of nicotinamide with various phthalimide-N-oxyl salts. Also within the framework of the work, the method of joining N-oxyphtalimide anion to N-substituted pyridine molecule was investigated, selected and developed.

**Keywords:** pyridine salt derivatives; nicotinamide; N-hydroxyphthalimide; phthalimide-N-oxyl salts; N-oxyphtalimide anion.

## Н-ЗАМІЩЕНІ ПІРИДИНОВІ СОЛІ З АНІОНОМ ФТАЛІМІД-Н-ОКСИЛУ

Ганна О. Сергєєва\*<sup>1</sup>, Михайло О. Компанець<sup>2</sup>, Олена Ю. Нестерова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, просп. Гагаріна, 72, Дніпро, 49010, Україна

<sup>2</sup>Інститут фізико-органічної хімії та вуглехімії імені Л. М. Литвиненко НАН України, Харківське шосе, 50, Київ, 02155, Україна

### Анотація

У наш час широко вивчається різна біологічна активність похідних піридинових солей, тип і сила яких залежить від присутності в молекулі замісника. Ароматичному піридиновому кільцю належить важлива роль у метаболізмі живого організму. Воно є окисною системою, відщеплюючи гідрид у нікотинамідаденіндинуклеотиді (НАД<sup>+</sup>) – складовою частиною ферменту дегідрогенази. Отже, нами здійснено синтез нових водорозчинних похідних сполук N-бензилпіридиній 3-карбоксамід фталімід-N-оксил, N-пропілпіридиній 3-карбоксамід фталімід-N-оксил та N-метилпіридиній 3-карбоксамід фталімід-N-оксил із піридиновим кільцем. Реакції відбувалися при взаємодії відповідних N-заміщених піридинових солей нікотинаміду з різними фталімід-N-оксильними солями. Також у межах роботи досліджено, підібрано та розроблено метод приєднання N-оксифталімідного аніону до N-заміщеної піридинової молекули.

**Ключові слова:** похідні піридинові солі; нікотинамід; N-гідроксифталімід; фталімід-N-оксильні солі; аніон N-оксифталіміду.

\*Corresponding author: e-mail: hannahryshchenko13@gmail.com

© 2023 Oles Honchar Dnipro National University;

doi: 10.15421/jchemtech.v31i3.286682

## Вступ

Пошук нових похідних піридину є досить багатообіцяючим напрямком розробки біологічно активних речовин – потенційних фармацевтичних препаратів, аналоги вітамінів (РР, групи В) та ферментів, що є основною задачею сучасної хімічної науки [1–4].

До числа найбільш вивчених піридинових солей відносяться *N*-заміщені піридинові солі нікотинаміду (**1**). На їх основі отримано великий ряд похідних, які мають спазмолітичні, судинорозширюючі, гіпотензивні, антигінальні, антиаритмічні, антишемічні та інші властивості [1–4].

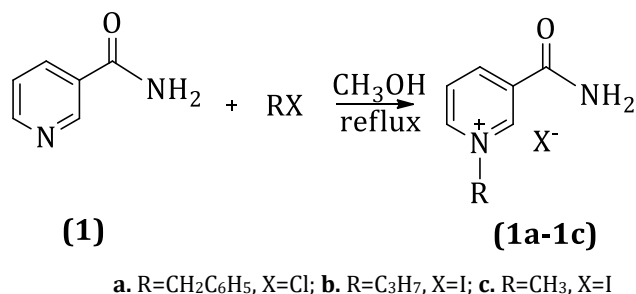
Хімія *N*-гідроксифталіміду (NHPI) [5–19] останнім часом зосереджує увагу дослідників у зв'язку з можливістю швидкого протікання окисно-відновних процесів гідроксиімідної групи та легкої трансформації молекули в *N*-оксильний радикал або аніон. NHPI є ефективним каталізатором радикальних реакцій окиснення 1.4-дигідропіридину молекулярним киснем із наступним утворенням зв'язку з аніоном фталімід-*N*-оксиду в синтезах піридинових солей.

Серед наявних на теперішній час методів синтезу похідних піридинових солей актуальними є дослідження, що характеризуються простотою і доступністю вихідних реагентів, відсутністю токсичності, економією часу та зусиль науковців, високим виходом продуктів реакцій. Це заохочує до пошуку і розробки нових методів синтезу та модифікації цього класу гетероциклів [1–4].

Мета даної роботи – розробка методів синтезу нових водорозчинних сполук піридинового ряду за взаємодії з різними фталімід-*N*-оксильними солями та пошук шляхів приєднання *N*-оксифталімідного аніону до *N*-заміщеної піридинової молекули, встановлення їх структури.

## Експериментальна частина

Синтез [13; 20–25] вихідних високоплавких *N*-заміщених піридинових солей нікотинаміду (**1a–1c**) проводили взаємодією нікотинаміду (**1**) з  $C_6H_5CH_2Cl$  (**a**),  $C_3H_7I$  (**b**),  $CH_3I$  (**c**) при кип'ятінні в абсолютному  $CH_3OH$  (рис. 1). В ході охолодження випадали білі та жовті кристали: хлорид *N*-бензил-3-карбоксамідпіридинію (**1a**), йодид *N*-пропіл-3-карбоксамідпіридинію (**1b**), йодид *N*-метил-3-карбоксамідпіридинію (**1c**), відповідно.



**Fig. 1. Synthesis of *N*-substituted pyridine salts of nicotinamide**  
**Рис. 1. Синтез *N*-заміщених піридинових солей нікотинаміду**

У роботах [3–4; 20–23] запропоновано інший шлях отримання похідних *N*-алкільних піридинових солей (**1a–1c**).

Синтез фталімід-*N*-оксильних солей натрію та аргентуму здійснювали поетапно (рис. 2). *N*-оксифталімід натрію (**2a**) синтезували при взаємодії NHPI з кристалічним NaOH при кип'ятінні в абсолютному  $CH_3OH$  протягом 1 години [20]. Темно-червона сіль (**2a**) має високу температуру плавлення (т. пл. > 350.0 °C) та добру розчинність у воді. Вихід продукту становить 98–99 %. Значення  $R_f$  визначали при використанні елюенту – льодяна  $CH_3COOH$  та  $^*CH_3CN:H_2O$  (1 : 1) ( $R_f = 0.76$ ;  $R_f^* = 0.84$ ).

За літературними даними [20] ІЧ-спектри сполуки (**2a**):  $\bar{\nu} = 3057, 1756, 1662, 1179, 1022, 992, 691$  см<sup>-1</sup>; <sup>1</sup>H ЯМР (500 МГц, D<sub>2</sub>O):  $\delta = 7.45$ – $7.31$  м.д. (м, 4H).

Далі в ході обмінної реакції *N*-оксифталіміду натрію [16; 20] з водним розчином 0.5 н  $AgNO_3$  за кімнатної температури 18.0–23.0 °C та перемішуванні магнітною мішалкою 300–400 об/хв, отримали високоплавку (Т. пл. > 300.0 °C) темно-червону з металевим блиском кристалічну відповідну сіль аргентуму (**2b**).

Процес обміну з утворенням осаду проходив миттєво.

Осад відфільтровували та висушували на повітрі, зберігаючи в сухому темному місці.

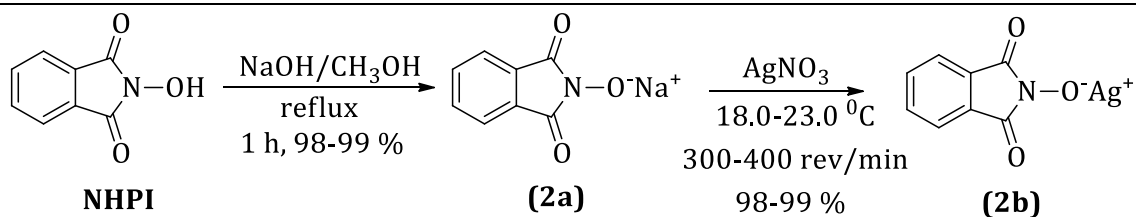


Fig. 2. Synthesis of sodium and argenticum N-oxophthalimide

Рис. 2. Синтез *N*-оксифталімід натрію та аргентуму

Також було одержано інші натрієві солі з похідних *N*-гідроксифталіміду (рис. 4) – 4-карбоксі-*N*-гідроксифталімід (4-carb-NHPI) **(3)**, гідроксибензтриазол (НВТ) **(4)**, *N*-гідрокси-нафталімід (NHNI) **(5)**, *N*-гідрокситетрафенілфталімід (NHTRP) **(6)**. Синтез проводили наступним чином.

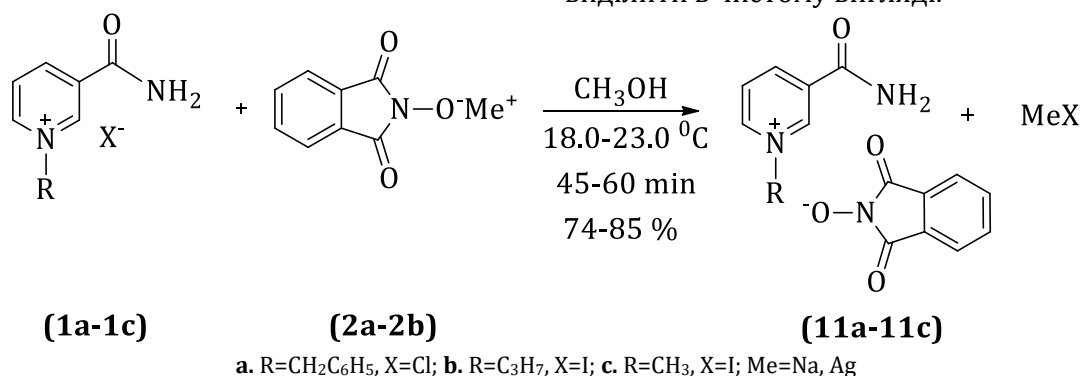
У чотири круглодонні колби окремо поміщали по 1.0 моль сполуки **(3-6)** та до кожної відповідно додавали надлишок кристалічного NaOH – 2.0 моль, 1.0 моль, 1.0 моль, 1.0 моль. Суміші кип'ятили зі зворотним холодильником в 10 мл абсолютного CH<sub>3</sub>OH протягом 1 години. Відфільтровували тверді осаді темно-червоного кольору – солі натрію 4-карбоксіфталімід-*N*-оксиду **(7)**, оксисбензтриазолу **(8)**, *N*-оксинафталіміду **(9)**. Однорідну рідину без осаду з **(6)** упарили, утворилася також темно-червона сіль *N*-окситетрафенілфталіміду **(10)**. Продукти реакцій **(7-10)** висушували на повітрі, промиваючи декілька раз CH<sub>3</sub>OH.

Тверді натрієві солі темно-червоного кольору **(7-10)** [16; 20] одержано з високими

виходами – 85–90, 80–82, 95–96, 91–92 % відповідно.

Нами виконано дослідження невідомих раніше похідних *N*-заміщених піридинових солей нікотинаміду з аніоном *N*-оксифталіміду **(11a-11c)** (рис. 3). Речовини отримали взаємодією піридинових солей 0.1 моль **(1a-1c)** з 0.1 моль *N*-оксифталіміду натрію **(2a)** та аргентуму **(2b)** відповідно, в 20 мл абсолютного CH<sub>3</sub>OH. Реакція проводилася за кімнатної температури 18.0–23.0 °C та постійному перемішуванні магнітною мішалкою 300–400 об/хв протягом 45–60 хв. Із **(2b)** випадав сірувато-білий осад AgCl та AgI, який відфільтровували. Маточний розчин залишали на «чашці для упарювання» для видалення розчинника за нормальних умов. Виростали кристали оранжево-червоного **(11a)** і темно-фіолетового **(11b-11c)** кольору, які промивали абсолютним CH<sub>3</sub>OH та також відфільтровували. Фільтрат знову залишали для росту кристалів. Тверді речовини висушували на повітрі.

Кінцеві продукти реакції **(11a-11c)** взаємодії з натрієвою сіллю **(2a)** не вдалося виділити в чистому вигляді.

Fig. 3. Synthesis of *N*-substituted pyridine salts of nicotinamide with *N*-oxophthalimide anionРис. 3. Синтез похідних *N*-заміщених піридинових солей нікотинаміду з аніоном *N*-оксифталіміду

Також було проведено реакцію із сполукою **(2a)** за кип'ятіння в абсолютному CH<sub>3</sub>OH протягом 20 год та диметилформаміді (ДМФА) – 10 год. З'ясовано, що нагрівання суміші приводить до розкладу вихідних сполук.

Синтез із сполукою **(2a)** в H<sub>2</sub>O, за перемішування магнітною мішалкою 300–400 об/хв та кімнатній температурі 18.0–23.0 °C, також не привів до утворення кінцевих продуктів. Проте реакція зі сполукою **(2b)** проходить до випадку сірувато-білого осаду AgCl або AgI. Однак і в цьому

випадку не вдалося виділити продукт (**11a–11c**), що пов'язано з доброю розчинністю (**11a–11c**) у воді.

З метою отримання нових похідних піридинових солей з 4-карбокситфталімід-*N*-оксильним (**12**), оксисбензтріазольним (**13**), *N*-оксинафталімідним (**14**) та *N*-окситетрафенілфталімідним аніоном (**15**), нами було здійснено синтез *N*-заміщеної піридинової солі (**1a**) з натрієвими твердими сполуками (**7–10**) відповідно (рис. 4).

У круглодонну колбу поміщали 1 моль сполуки (**1a**) та додавали 1 моль натрієвої солі (**7–10**). Реакційну суміш кип'ятили в 20 мл абсолютного  $\text{CH}_3\text{OH}$  впродовж 20–

40 год зі зворотним холодильником до закінчення реакції (за методом тонкошарової хроматографії (ТШХ)). Виділення сполуки здійснювали шляхом упарювання однорідного розчину. Перекристалізацію робили з  $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$  (т. кип.  $97.1^\circ\text{C}$ ), охолоджували в льодяній бані, осад відфільтровували та висушували на повітрі. Дослідження синтезованих речовин (**12–15**) не дало очікуваних результатів за відповідних умов. Про це свідчать інструментальні дані ІЧ та  $^1\text{H}$  ЯМР спектроскопії. Нагрівання суміші призвело до розкладу вихідних сполук. Утворення нових сполук (**12–15**) не відбулося.

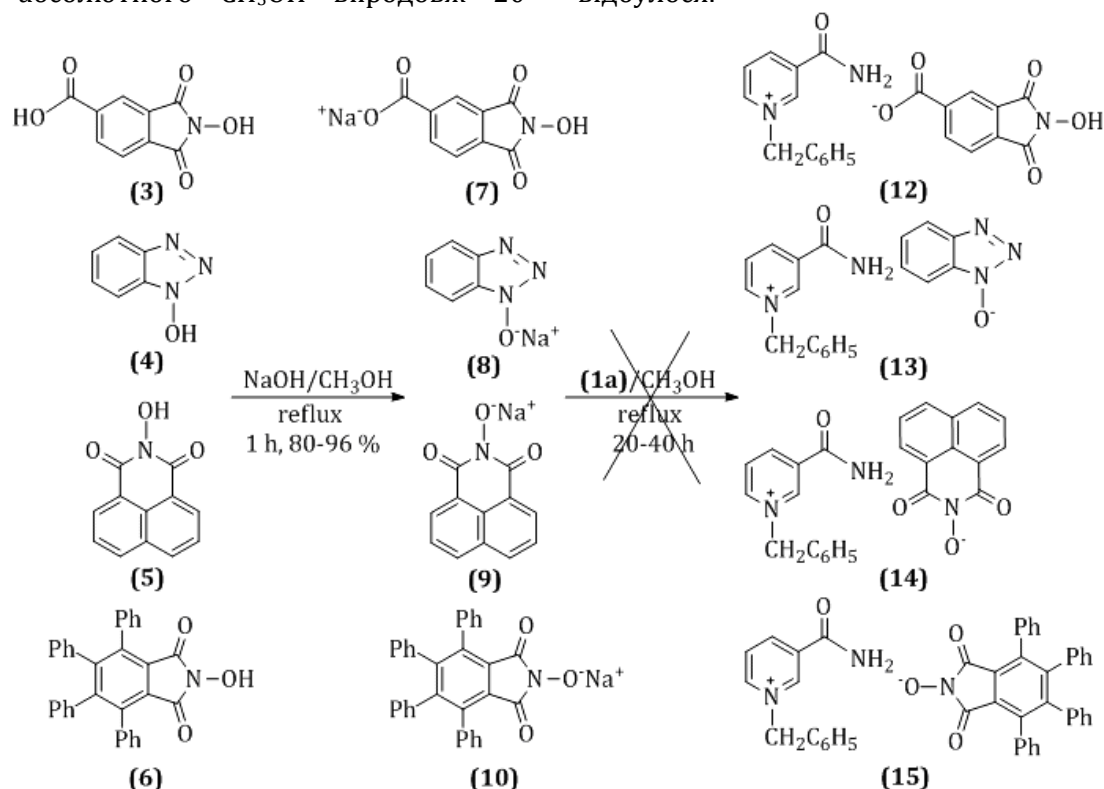


Fig. 4. Synthesis of sodium salts of *N*-hydroxyphthalimide and *N*-substituted pyridine salt of nicotinamide with corresponding anions

Рис. 4. Синтез натрієвих солей похідних *N*-гідроксифталіміду та *N*-заміщеної піридинової солі нікотинаміду з відповідними аніонами

Контроль за ходом реакцій, чистотою синтезованих сполук та визначення  $R_f$  здійснювали методом ТШХ на пластинках «Sorbfil ПТСХ-АФ-А» в системі льодяна  $\text{CH}_3\text{COOH}$  та  $^*\text{CH}_3\text{CN}:\text{H}_2\text{O}$  (1 : 1), проявлення – пари йоду. Температура плавлення сполук визначалася експрес методом.

### Результати та їх обговорення

Для нових синтезованих речовин нами було отримані деякі фізико-хімічні константи, їх будова підтверджена за допомогою  $^1\text{H}$  ЯМР спектроскопії [26] (радіоспектрометр «Varian

VXR», внутрішній стандарт – тетраметилсилан):

*N*-бензилпіридиній 3-карбоксамід фталімід-*N*-оксил (**11a**):  $^1\text{H}$  ЯМР-спектр (300 МГц,  $\text{DMSO}-d_6$ ),  $\delta$ , м. ч.: 5.93 (2H, с,  $\text{NCH}_2\text{Ph}$ ), 7.51 (5H, м, Ph), 7.64 (4H, м, аніон фталімід-*N*-оксилу), 8.14 (1H, с,  $\text{NH}_2$ ), 8.28 (1H, т,  $\text{H}^5$ ), 8.88 (1H, с,  $\text{NH}_2$ ), 9.00 (1H, д,  $\text{H}^4$ ), 9.30 (1H, д,  $\text{H}^6$ ), 9.74 (1H, с,  $\text{H}^2$ ).  $R_f=0.87$ .  $\text{C}_{21}\text{H}_{17}\text{N}_3\text{O}_4$ . Т. пл.  $275\text{--}277^\circ\text{C}$ . Вихід, %: 83–85;

*N*-пропілпіридиній 3-карбоксамід фталімід-*N*-оксил (**11b**):  $^1\text{H}$  ЯМР-спектр (300 МГц,  $\text{DMSO}-d_6$ ),  $\delta$ , м. ч.: 0.90 (3H, т,  $\text{CH}_3\text{CH}_2$ ), 1.4 (2H, м,  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2$ ), 4.70 (2H, т,  $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{N}$ ), 7.50 (2H, с,

NH<sub>2</sub>), 7.85-7.88 (4H, м, аніон фталімід-N-оксилу), 8.47 (1H, т, H<sup>5</sup>), 9.08 (1H, д, H<sup>4</sup>), 9.14 (1H, д, H<sup>6</sup>), 9.30 (1H, с, H<sup>2</sup>).  $R_f=0.66^*$ . C<sub>17</sub>H<sub>17</sub>N<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Т. пл. 267–269 °С. Вихід, %: 75–78;

*N*-метилпіридиній 3-карбоксамід фталімід-*N*-оксил (**11c**): 4.39 (3H, с, СН<sub>3</sub>N), 7.50 (2H, с, NH<sub>2</sub>), 7.85-7.88 (4H, м, аніон фталімід-N-оксилу), 8.47 (1H, т, H<sup>5</sup>), 9.08 (1H, д, H<sup>4</sup>), 9.14 (1H, д, H<sup>6</sup>), 9.17 (1H, с, H<sup>2</sup>).  $R_f=0.10$ . C<sub>15</sub>H<sub>13</sub>N<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Т. пл. 245–247 °С. Вихід, %: 74–75.

За нашими даними сполуки (**1a-1c**) із аніоном I<sup>-</sup> швидше утворюють продукти (**11b-11c**) синтезу, ніж (**11a**) з іоном Cl<sup>-</sup>, оскільки I<sup>-</sup> більш реакційноздатний.

Було показано, що незалежно від введення будь-якого замісника – як алкільного, так і ароматичного в *N*-положенні піридинового кільця – процес проходить за реакцією обміну з утворенням забарвлених піридинових солей з аніоном *N*-оксифталімідом (**11a-11c**).

З'ясовано, що приєднання аніону *N*-оксифталіміду до *N*-заміщених піридинових солей нікотинаміду (**1a-1c**) легко здійснюється за нормальних умов. У ході обмінної реакції за кімнатної температури 18.0–23.0 °С солі аргентуму швидко віддають аніон *N*-оксифталіміду *N*-заміщеній піридиновій молекулі з утворенням осадів

AgCl або AgI. Дані осаді нерозчинні в СН<sub>3</sub>ОН, що полегшило виділення сполук (**11a-11c**) – в порівнянні з солями натрію.

Встановлено, що нагрівання суміші призводить до розкладу вихідних речовин, а присутність води перешкоджає виділенню кінцевих продуктів реакції.

Нікотинові солі (**11a-11c**) мають кристалічну будову оранжево-червоного та темно-фіолетового кольору. Добре розчинні в воді, мають погану розчинність у більшості органічних розчинників.

## Висновки

1. Запропонована методика синтезу похідних піридинових солей з фталімід-*N*-оксильним аніоном.

2. Отримані нові, раніше не описані водорозчинні похідні піридинових солей з фталімід-*N*-оксильним аніоном, їх будова підтверджена хімічними та спектральними даними.

3. За допомогою хімічних перетворень та сучасних методів дослідження встановлена залежність умов протікання реакцій синтезу похідних піридинових солей від наявності *N*-оксифталімідового аніону.

## References

- [1] Nesterova, Ye. Yu., Hryshchenko, H. O. (2013). [The main directions of development of the chemistry of 1,4-dihydropyridines – a review of the literature]. *Bulletin of Dnepropetrovsk University. Series «Chemistry»*, 21(19), 61–79. (in Russian). <https://doi.org/10.15421/081308>
- [2] Yedase, G. S., Venugopal, S., Arya, P., Yatham, V. R. (2022). Catalyst-free Hantzsch Ester-mediated Organic Transformations Driven by Visible light. *Asian Journal of Organic Chemistry*, 11(10). <https://doi.org/10.1002/ajoc.202200478>
- [3] Sadri, Z., Behbahani, F. K. (2020). Synthesis of Spiro 1,4-Dihydropyridines: A Review. *Current Organic Synthesis*, 17(5), 324–343. <https://doi.org/10.2174/1570179417666200415150027>
- [4] Soma, M., Yamagishi, A. (1970). Photo-induced electron transfer from organic crystals to biologically interesting substances *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)*. *Bioenergetics*, 205, 183–189. [https://doi.org/10.1016/0005-2728\(70\)90248-3](https://doi.org/10.1016/0005-2728(70)90248-3)
- [5] Han, B., Liu, Q., Liu, Zh., Mu, R., Zhang, W., Liu, Zh.-Li, Yu, W. (2005). A Metal-Free Catalytic Aerobic Aromatization of Hantzsch 1,4-Dihydropyridines by *N*-Hydroxyphthalimide. *Journal of Organic Chemistry*, 15, 2333–2334. <https://doi.org/10.1055/s-2005-872267>
- [6] Ma, R., Chen, W., Wang, L., Yi, X., Xiao, Y., Gao, X., Zhang, J., Tang, X., Yang, Ch., Meng, X., Zheng, A., Xiao, F.-Sh. (2019). *N*-Oxyl Radicals Trapped on Zeolite Surface Accelerate Photocatalysis. *ACS Catalysis*, 9(11), 10448–10453. <https://doi.org/10.1021/acscatal.9b03737>
- [7] Mancini, M. Di B., Gelsomino, A. D., Stefano, S. Di, Fratelloreto, F., Lapi, A., Lanzalunga, O., Olivo, G., Sajeva, S. (2021). Change of Selectivity in C-H Functionalization Promoted by Nonheme Iron(IV)-oxo Complexes by the Effect of the *N*-hydroxyphthalimide HAT Mediator. *ACS Omega*, 6(40), 26428–26438. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03679>
- [8] Zhu, Zh., Zhang, Q., Xie, D., Liu, H., Wang, H., Shi, L., Chen, Ch. (2022). Photo- and Solvent-Mediated Production of the Highly Reactive *N*-Oxyl Radical and Its Efficient Catalytic Oxidation of Hydrocarbons at Ambient Temperature. *ACS Sustainable Chemistry. Engineering*, 10(41), 13765–13774. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c03985>
- [9] Kushch, O. V., Hordieieva, I. O., Novikova, K. V., Litvinov, Y. E., Kompanets, M. O., Shendrik, A. N., Opeida, I. A. (2020). Kinetics of *N*-oxyl radicals' decay. *Journal of Organic Chemistry*, 85(11), 7112–7124. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.0c00506>
- [10] Kushch, O. V., Hordieieva, I. O., Kompanets, M. O., Zosenko, O. O., Opeida, I. A., Shendrik, A. N. (2021). Hydrogen atom transfer from benzyl alcohols to *N*-oxyl radicals. Reactivity parameters. *Journal of Organic Chemistry*, 86(5), 3792–3799. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.0c02595>
- [11] Zhuk, T., Babkina, V. (2023). [Potential of *N*-hydroxyphthalimide for large-scale CH-oxidations]. *European Science*, 3(16-03), 65–83. (in Ukrainian). <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2023-16-03-014>
- [12] Koshino, N., Saha, B., Espenson, J. H. (2003). Kinetic Study of the Phthalimide *N*-Oxyl Radical in Acetic Acid Hydrogen Abstraction from Substituted Toluenes,

- Benzaldehydes, and Benzyl Alcohols. *Journal of Organic Chemistry*, 68(24), 9364–9370. <https://doi.org/10.1021/jo0348017>
- [13] Hryshchenko, H. O., Nesterova, O. Ju., Kompanets, M. O., Vynokurova, T. K. (2014). [Autooxidation and kinetic aspects of 1,4-dihydropyridines in the presence of the Co(II)/NHPI system]. *Collection of scientific works of the Dniprodzerzhyn State Technical University. Technical sciences*, 2, 159–163. (in Ukrainian). [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpddtu\\_2014\\_2\\_32](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpddtu_2014_2_32)
- [14] Hryshchenko, H. O. (2017). [Oxidation of 1,4-dihydropyridine derivatives in the presence of (CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>Co/phthalimide derivatives]. *Internauka: scientific journal*, 3(9(13)), 74–75. (in Ukrainian).
- [15] Hryshchenko, H. O., Nesterova, O. Ju., Kompanets, M. O. (2013). [Aerobic oxidation and kinetic aspects of 1,4-dihydropyridines in the presence of Co(II) and NHPI]. *Bulletin of Dnipropetrovsk University. «Rocket and space technology» series*, 2(17), 29–37. (in Ukrainian).
- [16] Hryshchenko, H. O. (2016). [Reactions of 1-N-substituted pyridine salts with phthalimide-N-oxyl salts]. *Modern trends in the development of science in Ukraine: materials of the international scientific and practical conference of young scientists, Rivne*, 171. (in Ukrainian).
- [17] Yang, Ch., Farmer, L. A., Pratt, D. A., Maldonado, S., Stephenson C. R. J. (2021). Mechanism of Electrochemical Generation and Decomposition of Phthalimide-N-oxyl. *Journal of the American Chemical Society*, 143(27), 10324–10332. <https://doi.org/10.1021/jacs.1c04181>
- [18] Cinco, M. Á. B., Wu, G., Telsler, J., Hayton, T. W. (2022). Structural and Spectroscopic Characterization of a Zinc-Bound N-Oxyphthalimide Radical. *Inorganic Chemistry*, 61(34), 13250–13255. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.2c01765>
- [19] Anderson, T. E., Woerpel, K. A. (2020). Strain-Promoted Oxidation of Methylene-cyclopropane Derivatives using N-Hydroxyphthalimide and Molecular Oxygen in the Dark. *Organic Letters*, 22(14), 5690–5694. <https://doi.org/10.1021/acs.orglett.0c02075>
- [20] [Dekamin, M. G., Moghaddam, F. M., Saeidian, H., Mallakpour, Sh. (2006). The Performance of Phthalimide-N-oxyl Anion. *Monatshefte fur Chemie Chemical Monthly*, 137, 1591–1595. <https://doi.org/10.1007/s00706-006-0553-6>
- [21] Mauzerall, D., Westheimer, F. H. (1955). 1-Benzylidihydronicotinamide – A Model for Reduced DPN. *Journal of the American Chemical Society*, 77(8), 2261–2264. <https://doi.org/10.1021/ja01613a070>
- [22] Nowak, C., Pick, A., Lommes, P., Sieber, V. (2017). Enzymatic Reduction of Nicotinamide Biomimetic Cofactors Using an Engineered Glucose Dehydrogenase: Providing a Regeneration System for Artificial Cofactors. *ACS Catalysis*, 7(8), 5202–5208. <https://doi.org/10.1021/acscatal.7b00721>
- [23] Lo, H. Ch., Leiva, C., Buriez, O., Kerr, J. B., Olmstead, M. M., Fish, R. H. (2001). Bioorganometallic Chemistry. Regioselective Reduction of NAD<sup>+</sup> Models, 1-Benzylnicotinamide Triflate and β-Nicotinamide Ribose-5'-methyl Phosphate, with in Situ Generated [Cp\*Rh(Bpy)H]<sup>+</sup>: Structure-Activity Relationships, Kinetics, and Mechanistic Aspects in the Formation of the 1,4-NADH Derivatives. *Inorganic Chemistry*, 40(26), 6705–6716. <https://doi.org/10.1021/ic010562z>
- [24] Sadri, Z., Behbahani, F. K. (2020). Synthesis of Spiro1,4-Dihydropyridines: A Review. *Current Organic Synthesis*, 17(5), 324–343. <https://doi.org/10.2174/1570179417666200415150027>
- [25] Soma, M., Yamagishi, A. (1970). Photo-induced electron transfer from organic crystals to biologically interesting substances. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Bioenergetics*, 205, 183–189. [https://doi.org/10.1016/0005-2728\(70\)90248-3](https://doi.org/10.1016/0005-2728(70)90248-3)
- [26] Kazitsyna, L. A., Kupletskaya, N. B. (1979). [Application of UV, IR, NMR and mass spectroscopy in organic chemistry]. Moscow, USSR: Moscow University Press. (in Russian).