

Modelagem matemática da detecção eletroanalítica da nereistoxina, assistida pelo compósito de oxihidróxido de cobalto com polímeros condutores

Volodymyr V. Tkach^{1,2*}, Marta V. Kushnir¹, Nataliia M. Storoshchuk¹, Volodymyr F. Cherevatov¹, Sílvio C. de Oliveira², Olga V. Luganska³, Vira V. Kopiika³, Valerii I. Domnich³, Svitlana M. Lukanova¹, Yana G. Ivanushko⁴, Valentyna G. Ostapchuk⁴, Svitlana P. Melnychuk⁴, Petro I. Yagodynets¹, José I. Ferrão de Paiva Martins⁵, Maria João Monteiro⁶, Tétiana V. Morozova⁷

¹ Universidade Nacional de Chernivtsi, 58012, Rua de Kotsyubyns'ky, 2, Chernivtsi, Ucrânia

² Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Av. Sen. Felinto. Müller, 1555, C/P. 549, 79074-460, Campo Grande, MS, Brazil

³ Universidade Nacional de Zaporizhzhia, 69600, Rua de Zhukovsky, 66, Zaporizhzhya, Ucrânia

⁴ Universidade Estatal de Medicina de Bucovina, 58001, Praça Teatral, 9, Chernivtsi, Ucrânia

⁵ Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 4200-465, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, Porto, Portugal

⁶ Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Quinta de Prados, 5001-801, Folhadela, Vila Real, Portugal

⁷ Universidade Nacional de Transporte e Rodagem da Ucrânia, 02000, Rua de Omelianovych-Pavlenko, 1, Kyiv, Ucrânia

*Autor correspondente: nightwatcher2401@gmail.com

Recebido: 19 de abril de 2022

Revisado: 30 de agosto de 2023

Aceto: 4 de setembro de 2023

RESUMO

Introdução: Pela primeira vez, a possibilidade da detecção eletroanalítica da nereistoxina no eléctrodo, modificado pelo compósito de oxihidróxido de cobalto e polímeros condutores. **Desenvolvimento:** A eletrooxidação dá-se gradualmente pelos átomos do enxofre levando à rutura do anel e formação do ácido dissulfênico, seguida pela formação do ácido dissulfônico. **Resultado:** A análise do modelo correspondente, mediante a teoria de estabilidade lineal e de bifurcações confirma a eficiência

do oxihidróxido de cobalto e polímero condutor como modificador de ânodo para a determinação eletroquímica da nereistoxina. Por outro lado, a probabilidade do comportamento oscilatório neste sistema aumenta, haja vista a formação de novas formas iônicas.

Palavras-chave: nereistoxina, sensor eletroquímico, oxihidróxido de cobalto, polímero condutor, estado estacionário estável

SUMMARY

The mathematical modeling for nereistoxin electrochemical determination, assisted by cobalt oxyhydroxide/conducting polymer composite

Introduction: For the first time, the possibility of nereistoxin electrochemical determination on a CoO(OH)/CP-modified electrode has been given. **Proposal:** The electrooxidation is carried out gradually by the sulfur atoms, leading to the ring cleavage and formation of a disulfenic acid, followed by a disulfonic acid formation. **Result:** The analysis of the correspondent model by means of the linear stability theory and bifurcation analysis confirms the efficiency of cobalt oxyhydroxide and conducting polymer for nereistoxin determination. On the other hand, the probability of the oscillatory behavior in this system is enhanced, due to the formation of the new ionic forms.

Keywords: nereistoxine, electrochemical sensor cobalt oxyhydroxide, conducting polymer, stable steady-state

RESUMEN

Modelado matemático de la detección electroanalítica de la nereistoxina, asistida por el compuesto de oxihidróxido de cobalto con polímeros conductores

Introducción: Por primera vez, ha sido analizada teóricamente la posibilidad de la detección electroanalítica de la nereistoxina en el electrodo, modificado por el compuesto de oxihidróxido de cobalto y polímeros conductores. **Propuesta:** La electrooxidación se hace gradualmente por los átomos de azufre, llevando a la

ruptura del anillo heterocíclico y formación del ácido disulfénico, seguida por la formación del ácido disulfónico. **Resultado:** El análisis del modelo correspondiente, mediante la teoría de la estabilidad lineal y de bifurcaciones confirma la eficiencia del oxihidróxido de cobalto y polímero conductor como modificador de ánodo para la determinación electroquímica de la nereistoxina. Por otro lado, la probabilidad del comportamiento oscilatorio en este sistema aumenta, puesto que ocurre la formación de nuevas formas iónicas.

Palavras chave: nereistoxina, sensor electroquímico, oxihidróxido de cobalto, polímero conductor, estado estacionario estable

INTRODUÇÃO

Nereistoxina (4-*N,N*-dimetil-1,2-ditolano (IUPAC, Hantzsch – Widmann, CAS: 1631-58-9, $M=149,27$ g/mol, Fig. 1.) [1-4] é um composto tóxico natural, isolado pela primeira vez dos vermes anelares *Lumbriconereis heteropoda* em 1934. Os vermes introduzem a toxina, mordendo a vítima ou picando-a pelas espinhas, como dragões-do-mar.

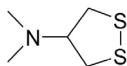


Fig. 1. Nereistoxina

A nereistoxina possui dois grupos funcionais – ambos, responsáveis pela ação tóxica [5-9]. A amina ternária irrita e bloqueia os receptores nicotínicos, e a “ponte” dos heteroátomos do enxofre facilmente se irrompe, rendendo os derivados de 2-dimetilamino-1,3-propanoditiol (isto é, 2-dimetilaminotrimetilenoditioglicol ou 2-dimetilamino-1,3-propilodimercaptano) e seus derivados. A nereistoxina deu origem a vários fármacos e pesticidas, como a inseticida cartap (Fig. 2):

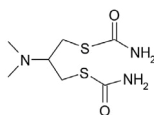


Fig. 2. Cartap

que é de fato o éster do 2-dimetilamino-1,3-propanoditiol e o ácido aminofórmico, que é instável a temperaturas superiores a -23° . Destarte, o desenvolvimento de um método eficaz da determinação do cartap é realmente atual [10-12].

Possuindo uma “ponte” dissulfídica, em que os átomos do enxofre têm número de oxidação como no pireto, o analito pode ser tanto oxidado, como reduzido. Portanto, tanto os métodos anódicos, como os catódicos são aplicáveis à sua determinação eletroanalítica. Um dos modificadores de eletrodo, passíveis de aplicar à determinação da nereistoxina, pode ser o oxihidróxido de cobalto [13-15], material semicondutor, frequentemente usado nos aparelhos semicondutores como substituição para o dióxido de titânio, porém, ao contrário deste, é eletroquimicamente ativo. Ele, sozinho ou em compósito com polímeros condutores [16-20], podia ter um desempenho eficiente como modificador de eletrodo para a detecção da nereistoxina.

No entretanto, o seu uso poderia acarretar uma influência comportamental, nociva à estabilidade do sistema e à sua eficiência eletroanalítica [21-23]. Destarte, o uso prático deste sistema eletroanalítico não pode ser realizado sem uma descrição teórica prévia do comportamento do sistema, o que se faz neste trabalho.

Assim, neste trabalho, pela primeira vez, faz-se uma análise comportamental do sistema eletroanalítico da detecção eletroquímica da nereistoxina sobre o oxihidróxido de cobalto, estabilizado pelo polímero condutor. A análise comportamental do sistema eletroanalítico faz-se mediante o desenvolvimento e a análise do modelo correspondente. Com isto também se faz a comparação do comportamento do sistema eletroanalítico com o dos semelhantes [24-28].

O SISTEMA E O SEU MODELO

O oxihidróxido de cobalto oxida a nereistoxina gradualmente. Na primeira etapa, ocorre a rutura do anel, com a formação do ácido dissulfênico. Depois, este se oxida até ao ácido dissulfônico (Fig. 3):

O pH do sistema decresce levemente na primeira etapa e bruscamente na segunda, o que pode prejudicar a estabilidade do oxihidróxido de cobalto depositado na matriz polimérica. Portanto, é aconselhável usar o pH moderadamente alcalino da solução, para equilibrar a atividade dos prótons nos produtos de oxidação.

Haja vista o supracitado, para descrever a detecção eletroanalítica da nereistoxina, introduzimos três variáveis:

n – a concentração da nereistoxina na camada pré-superficial;

n^* – a concentração do ácido dissulfênico na camada pré-superficial;

c – o grau do recobrimento da matriz polimérica pelo óxido de cobalto (II).

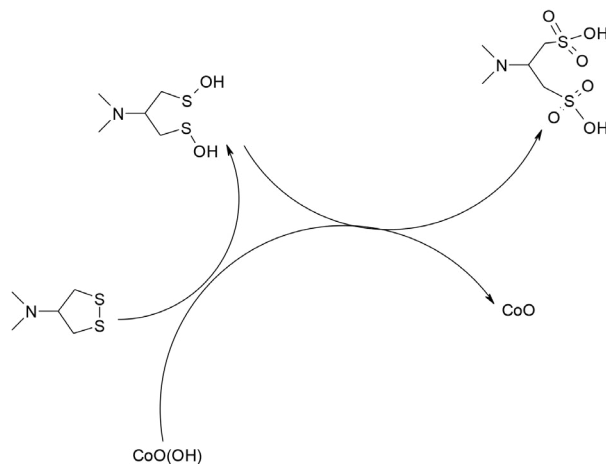


Fig. 3. A sequência das reações basilaes do processo eletroanalítico

Para simplificar a modelagem, supomos que o reator esteja sob agitação intensa (destarte, podemos menosprezar o fluxo de convecção), que o eletrólito de suporte esteja em excesso (destarte, podemos menosprezar o fluxo de migração). Outrossim, supomos que o perfil concentracional das substâncias na camada pré-superficial seja lineal, e a sua espessura, constante, igual a δ .

É possível provar que o comportamento do sistema pode ser descrito pelo conjunto de equações diferenciais de balanço (1):

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = \frac{2}{\delta} \left(\frac{N}{\delta} (n_0 - n) - r_1 \right) \\ \frac{dn^*}{dt} = \frac{2}{\delta} (r_1 - r_2) \\ \frac{dc}{dt} = \frac{1}{c} (r_1 + r_2 - r_3) \end{cases} \quad (1)$$

Sendo N o coeficiente de difusão, n_0 é a concentração da nereistoxina no interior da solução, C é a concentração superficial máxima do óxido de cobalto (II) e os parâmetros r são as velocidades das reações correspondentes, que se podem calcular como:

$$r_1 = k_1 n (1 - c)^2 \exp(-an) \quad (2)$$

$$r_2 = k_2 n * (1 - c)^8 \exp(-bn *) \quad (3)$$

$$r_3 = k_3 c \exp\left(\frac{F\varphi_0}{RT}\right) \quad (4)$$

Em que os parâmetros k são constantes de velocidades das respectivas reações, a e b são variáveis, que relacionam as capacitâncias da DCE com as transformações de formas iônicas, F é o número de Faraday, φ_0 é o salto do potencial, relativo ao potencial da carga zero, R é a constante universal de gases e T é temperatura absoluta do vaso.

Haja vista a formação com a seguinte transformação de novas formas iônicas, o comportamento oscilatório far-se-á mais provável que nos casos mais simples do uso do oxihidróxido de cobalto [24-28]. Malgrado o supracitado, o compósito do oxihidróxido de cobalto com o polímero condutor pode ser um modificador eficiente para a detecção da nereistoxina por um processo anódico, conforme exposto abaixo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para investigar o comportamento do sistema com a determinação eletroanalítica da nereistoxina, assistida pelo ânodo, modificado pelo compósito $\text{CoO}(\text{OH})$ – polímero condutor, analisamos o conjunto de equações diferenciais (1), considerando as relações algébricas (2 – 4), mediante a teoria de estabilidade linear. Os elementos estacionários da matriz funcional de Jacobi podem ser expostos como:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Sendo:

$$a_{11} = \frac{2}{\delta} \left(-\frac{N}{\delta} - k_1(1 - c)^2 \exp(-an) + ak_1 n(1 - c)^2 \exp(-an) \right) \quad (6)$$

$$a_{12} = 0 \quad (7)$$

$$a_{13} = \frac{2}{\delta} (2k_1 n(1 - c) \exp(-an)) \quad (8)$$

$$a_{21} = \frac{2}{\delta} (k_1(1 - c)^2 \exp(-an) - ak_1 n(1 - c)^2 \exp(-an)) \quad (9)$$

$$a_{22} = \frac{2}{\delta}(-k_2(1-c)^8 \exp(-bn*) + bk_2n*(1-c)^8 \exp(-bn*)) \quad (10)$$

$$a_{23} = \frac{2}{\delta}(8k_2n*(1-c)^7 \exp(-bn*) - 2k_1n(1-c) \exp(-an)) \quad (11)$$

$$a_{31} = \frac{1}{c}(k_1(1-c)^2 \exp(-an) - ak_1n(1-c)^2 \exp(-an)) \quad (12)$$

$$a_{32} = \frac{1}{c}(k_2(1-c)^8 \exp(-bn*) - bk_2n*(1-c)^8 \exp(-bn*)) \quad (13)$$

$$a_{33} = \frac{1}{c}\left(-2k_1n(1-c) \exp(-an) - 8k_2n*(1-c)^7 \exp(-bn*) - k_3 \exp\left(\frac{F\varphi_0}{RT}\right) + jk_3c \exp\left(\frac{F\varphi_0}{RT}\right)\right) \quad (14)$$

Observando os elementos da diagonal principal da matriz Jacobiana (6), (10) e (14), podemos concluir que o *comportamento oscilatório* neste sistema é passível de realizar. Ademais, ele é mais provável que nos sistemas mais simples [24-28], já que além do fator das influências da etapa eletroquímica na DCE, descritas pela positividade do elemento $jk_3c \exp\left(\frac{F\varphi_0}{RT}\right) > 0$, se $j > 0$, típico para os sistemas mais simples, neste caso existem também as influências dos câmbios na estrutura da DCE, causados pela formação de uma nova forma iônica (sulfenato) na primeira etapa química, descritas pela positividade do elemento $ak_1n(1-c)^2 \exp(-an) > 0$, se $a > 0$, e dos câmbios na estrutura da camada, causados pela transformação do íon de um ácido menos forte (sulfenato) para o íon de um ácido mais forte (sulfonato) na segunda etapa química, descritos pela positividade do elemento $bk_2n*(1-c)^8 \exp(-bn*) > 0$, se $b > 0$.

Assim como em [22-28], a manifestação do comportamento oscilatório (frequência, amplitude e tipo de oscilações), será dependente da composição do eletrólito de suporte, usado para o processo eletroanalítico. De qualquer maneira, esta manifestação dar-se-á nos valores de parâmetros afastados do limite de detecção, como será exposto abaixo.

A *estabilidade do estado estacionário*, por sua vez, tem uma ampla zona topológica de parâmetros, correspondente à sua realização, embora seja mais estreita que nos casos mais simples. Para investigá-la, aplicamos ao conjunto de equações diferenciais (1) o critério Routh-Hurwitz e, para facilitar a análise do determinante, introduzimos as novas variáveis e reescrevemo-lo conforme (15):

$$\frac{4}{\delta^2 C} \begin{vmatrix} -\kappa - \Xi & 0 & P \\ \Xi & -\Lambda & T - P \\ \Xi & \Lambda & -T - P - \Omega \end{vmatrix} \quad (15),$$

O que, conforme as propriedades do determinante, pode ser reescrito como (16)

$$\frac{4}{\delta^2 C} \begin{vmatrix} -\kappa - \Xi & 0 & P \\ 2\Xi & 0 & -2P - \Omega \\ \Xi & \Lambda & -T - P - \Omega \end{vmatrix} \quad (16)$$

Abrindo os parênteses e aplicando a condição $\text{Det } J < 0$, saliente do critério, obtemos o requisito de estabilidade do estado estacionário expresso como (17):

$$\Lambda(2P\kappa - \Omega P - \Omega\Xi) > 0 \quad (18),$$

que se satisfaz de forma garantida, sendo positivos os valores dos parâmetros Λ , Ξ e Ω , o que acontece na esmagadora maioria dos casos, definindo um processo eletroanalítico eficiente cineticamente controlado. A zona topológica da satisfação do requisito (18) far-se-á mais estreita que nos sistemas mais simples. Ainda assim, ela permanecerá vasta.

Não havendo reações laterais, capazes de comprometer a estabilidade do analito e(ou) modificador do ânodo, a estabilidade do estado estacionário far-se-á correspondente à linearidade da dependência entre o parâmetro eletroquímico (no caso, corrente) e a concentração da toxina, o que é relacionado com o melhor desempenho do sensor, até que seja alcançado o limite de detecção.

Este limite é descrito pela *instabilidade monotônica*, descrevendo a margem entre os estados estacionários estáveis e instáveis. A sua realização é condicionada ao requisito de $\text{Det } J=0$, ou

$$\Lambda(2P\kappa - \Omega P - \Omega\Xi) = 0 \quad (19),$$

Que é satisfeito, caso se satisfaça pelo menos um dos seguintes requisitos:

$$\Lambda = 0 \quad (20)$$

e(ou):

$$2P\kappa = \Omega(P + \varepsilon) \quad (21)$$

Neste ponto, para o sistema podem coexistir vários estados instáveis, dos quais o sistema escolhe um. Este se destrói facilmente, ao se mudarem as condições e, geralmente, não se regenera, se as condições iniciais forem restauradas (o sistema passa para um estado instável diferente).

Caso o pH inicial seja neutro, o comportamento do sistema será complicado por conta da redução do pH, causada pela formação dos ácidos. No caso, o conjunto de equações diferenciais (1) sofrerá alterações, e este conjunto será descrito e analisado num dos nossos próximos trabalhos.

CONCLUSÕES

A análise teórica do processo eletroanalítico da detecção da perilartina, assistida pelo compósito CoO(OH) – polímero condutor, deixou concluir que:

- se trata de um processo eletroanalítico eficiente, em que o composto de cobalto funciona como substância ativa, e o corante desempenha o papel de mediador;
- o processo eletroanalítico é controlado pela tanto pela cinética do processo;
- a realização do comportamento oscilatório é mas provável que no caso mais simples e comum, haja vista os câmbios cíclicos da força iônica da dupla camada elétrica, causados pela formação das formas iônicas dos ácidos sulfênico e sulfônico.

CONFLITOS DE INTERESSE

Os autores não têm conflitos de interesse a declarar.

REFERÊNCIAS

1. W.R. Kem, K. Andrud, G. Bruno, *et al.*, Interactions of nereistoxin and its analogs with vertebrate nicotinic acetylcholine receptors and molluscan ACh binding proteins, *Marine Drugs*, **20**, 49 (2022).

2. R. López-Ruiz, E. Belmonte-Sánchez, R. Romero-González, *et al.*, A laboratory study on dissipation and risk assessment of the proinsecticide thiocyclam and its metabolite nereistoxin in tomato using liquid chromatography high resolution mass spectrometry, *Food Chem.*, **344**, 128729 (2021).
3. J. Dai, Ch. Jiang, Y. Chai, *et al.*, Photolysis kinetics of cartap and nereistoxin in water and tea beverages under irradiation of simulated sunlight and ultraviolet under laboratory conditions, *Food Chem.*, **355**, 129595 (2021).
4. J. Zhang, L. Pang, J. Jing, *et al.*, Development, optimization, and validation of a method for detection of cartap, thiocyclam, thiosultap-monosodium, and thiosultap-disodium residues in plant foods by GC-ECD, *Food Chem.*, **371**, 131198 (2022).
5. E. Kurisaki, N. Kato, T. Ishida, *et al.*, Fatal human poisoning with Padan™: A cartap-containing pesticide, *Clin. Toxicol.*, **48**, 153–155 (2010).
6. Y. Nagawa, Y. Saji, S. Chiba, T. Yui, Neuromuscular blocking action of nereistoxin and its derivatives and antagonism by sulfhydryl compounds, *Japan J. Pharmacol.*, **21**, 185–197 (1971).
7. Makoto Ihara, Steven D. Buckingham, Kazuhiko Matsuda, David B Sattelle, Modes of action, resistance and toxicity of insecticides targeting nicotinic acetylcholine receptors, *Curr. Med. Chem.*, **24**(27), 2925–2934 (2017).
8. N. Suganthan, R. Manmathan, T. Kumanan, Rhabdomyolysis and acute kidney injury associated with thiocyclam hydrogen oxalate (Evisect) poisoning, *SAGE Open Med. Case Rep.*, **8**, 2050313X20954942 (2020).
9. G. Preetha, Toxicity of different insecticides against rice stem borer, *Pesticide Res. J.*, **32**(2), 311–315 (2020).
10. M. Senthilvelan, B. Nageswaran, K. Baburaj, A. Elaiaraja, Cartap hydrochloride poisoning - A case report, *J. Med. Sci. Clin. Res.*, **7**, 701–704 (2019).
11. V.V. Oberemok, K.V. Laikova, Yu. I. Gninenko, *et al.*, A short history of insecticides, *J. Plant Prot. Res.*, **55**(3), 221–225 (2015).
12. M. Awad, S.I. El-Desoky, E. Osman, *et al.*, Nano-insecticides against the black cutworm *Agrotis ipsilon* (Lepidoptera: Noctuidae): Toxicity, development, enzyme activity, and DNA mutagenicity, *PLoS One*, **17**, 0254285 (2022).

13. A. Stadnik, E.M. Caldas, A. Galli, F.J. Anaissi, Eletrodo modificado com [CoO(OH)] coloidal aplicado na detecção de ácido oxálico, *Orbital. Elec. J. Chem.*, **7**, 122–128 (2015).
14. J.S. Bonini, F.Q. Mariani, E. Guimarães Castro, *et al.*, Partículas de CoO(OH) dispersas em pasta de carbono aplicado na eletrooxidação de compostos fenólicos, *Orbital Elec. J. Chem.*, **7**, 318–326 (2015).
15. O. Stadnik, *Synthesis, electrochemical and photoelectrochemical properties of the oxide-hydroxide compounds of cobalt*, Diss. Kand. Chim. N., Kyiv, 2011.
16. S. Sadki, P. Schottland, N. Brodie, G. Saboraud, The mechanisms of pyrrole electropolymerization, *Chem. Soc. Rev.*, **29**, 283–293 (2000).
17. F. Ağin, Electrochemical determination of amoxicillin on a poly (acridine orange) modified glassy carbon electrode, *Anal. Lett.*, **49**(9), 1366–1378 (2016).
18. T.D. Martins, M.L. Pacheco, R. Boto, *et al.*, Synthesis, characterization and protein-association of dicyanomethylene squaraine dyes, *Dyes Pigm.*, **147**, 120–129 (2017).
19. S. Sreejith, P. Carol, P. Chithra, A. Ajayaghosh, Squaraine dyes: A mine of molecular materials, *J. Mater. Chem.*, **18**, 264–274 (2008).
20. D.E. Lynch, Pyrrolyl-squaraines – Fifty golden years, *Metals*, **5**(3), 1349–1370 (2015).
21. M.S. Ba-Shammakh, *Electropolymerization of pyrrole on mild steel for corrosion protection*, M.Sc. Thesis, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dharan, Saudi Arabia, 2002.
22. I. Das, N.R. Agrawal, S.A. Ansari, S.K. Gupta, Pattern formation and oscillatory electropolymerization of thiophene, *Ind. J. Chem. A*, **47**(12), 1798–1803 (2008).
23. K. Aoki, I. Mukoyama, J. Chen., Competition between polymerization and dissolution of poly(3-methylthiophene) films, *Russ. J. Electrochem.*, **40**, 280–285 (2004).
24. I. Das, N. Goel, N.R. Agrawal, S.K. Gupta, Electropolymerization of pyrrole: Dendrimers, nano-sized patterns and oscillations in potential in presence of aromatic and aliphatic surfactants, *J. Phys. Chem.*, **114**, 12888–12896 (2010).

25. M. Bazzaoui, E.A. Bazzaoui, L. Martins, J.I. Martins, Electropolymerization of pyrrole on zinc-lead-silver alloys' electrodes in neutral and acid organic media, *Synth. Metals*, **130**, 73–83 (2002).
26. I. Das, N. Goel, N.R. Agrawal, S.K. Gupta, Growth patterns of dendrimers and electric potential oscillations during electropolymerization of pyrrole using mono- and mixed surfactants, *J. Electroanal. Chem, J. Phys. Chem. B*, **114**, 12888–128961 (2010)
27. V.V. Tkach, M.V. Kushnir, S.C. de Oliveira, *et al.*, Theoretical description for anti-COVID-19 drug molnupiravir electrochemical determination over the poly(1,2,4-triazole)-co-squaraine dye composite with Cobalt (III) oxyhydroxide, *Biointerface Res. Appl. Chem.*, **13**, 74 (2023).
28. V.V. Tkach, M.M. Kucher, N. Slyvka, *et al.*, The modeling for anti-Covid-19 drug molnupiravir electrochemical sensing on C₃N₄, *Biointerface Res. Appl. Chem.*, **13**, 446 (2023).

COMO CITAR ESTE ARTIGO

V.V. Tkach, M.V. Kushnir, N.M. Storoshchuk, V.F. Cherevatov, S.C. de Oliveira, O.V. Luganska, V.V. Kopiika, V.I. Domnich, S.M. Lukanova, Y.G. Ivanushko, V.G. Ostapchuk, S.P. Melnychuk, P.I. Yagodynets', J.I. Ferrão de Paiva-Martins, M.J. Monteiro, T.V. Morozova, Modelagem matemática da detecção eletroanalítica da nereistoxina, assistida pelo compósito de oxihidróxido de cobalto com polímeros condutores, *Rev. Colomb. Cienc. Quim. Farm.*, **52**(3), 1221-1232 (2023). <https://doi.org/10.15446/rcciquifa.v52n3.112480>