

Аналітична хімія

УДК 543.06+543.07

АЛМАЗНИЙ ЕЛЕКТРОД, ДОПОВАНИЙ БОРОМ В АНАЛІТИЧНІЙ ХІМІЇ: СПОСОБИ АКТИВАЦІЇ ПОВЕРХНІ ЕЛЕКТРОДА (КОРОТКИЙ ОГЛЯД)

О. Душна^{1*}, Л. Дубенська¹, М. Войс²

¹Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Кирила і Мефодія, 6, 79005 Львів, Україна;

²Словацький технологічний університет у Братиславі,
Інститут електроніки та фотоніки,
вул. Ільковичова, 3, 812 19 Братислава, Словаччина
e-mail: olha.dushna@lnu.edu.ua

Огляд присвячено особливостям використання алмазного електрода, допованого бором (АДБЕ), в аналітичній хімії. АДБЕ – один з найсучасніших пристроїв для вольтамперометрії, який набуває щоразу більшої популярності для визначення слідових кількостей органічних речовин у складних об'єктах. Зараз використовують стрижневі (дискові) і плівкові АДБЕ. Головну увагу в огляді зосереджено на особливостях активації поверхні АДБЕ для використання в аналізі. Активують поверхню електрода потенціостатично, гальваностатично та в динамічних умовах, використовують різні фонові електроліти. Електрохімічно обробляють АДБЕ зазвичай у водних розчинах, здебільшого поверхня електрода одночасно очищується й активується. Правильне попереднє електрохімічне оброблення може бути цінним способом досягнення поліпшених аналітичних властивостей методики вольтамперометричного визначення. Отримують інтенсивніший аналітичний сигнал, вужчий, чіткіший пік та/або корисне зміщення потенціалу піка, що сприяє підвищенню чутливості і селективності визначення.

Огляд містить понад 80 літературних посилань щодо особливостей активації поверхні АДБЕ, серед них монографії, оглядові статті та оригінальні праці.

Ключові слова: вольтамперометрія, алмазний електрод, допований бором, активація поверхні, поляризація.

DOI: <https://doi.org/10.30970/vch.6301.153>

1. Вступ

Алмазний електрод, допований бором (АДБЕ) – один з найсучасніших пристроїв для електрохімії, який зараз широко використовують у багатьох галузях: для органічного синтезу, очищення об'єктів доквілля від забруднень, у медицині, аналітичній та біоаналітичній хімії тощо. У 2011 р. видавництво Wiley [1] опублікувало монографію, у якій ґрунтовно розглянуто синтез, електрохімічні властивості і застосування, особливо промислове, алмазних плівок, допованих бором (АДБ). За останні роки особливостям використання АДБЕ в аналітичній хімії та характеристикам розроблених методик аналізу присвячено низку оглядових статей [2–14].

Зокрема, в праці [3] наведено короткі характеристики вольтамперометричних методик визначення різних речовин за період 2016–2018 рр. В огляді [4] особливу увагу приділяють використанню АДБЕ в аналізі харчових продуктів на вміст пестицидів, вітамінів та флавоноїдів. В огляді [6] наведено коротку характеристику методів визначення наркотичних та лікарських речовин за період 2015–2020 рр., а працю [11] присвячено використанню АДБЕ для визначення нейромедіаторів. Автори праці [14] зосередили увагу на особливостях застосування АДБЕ для визначення сполук, які порушують роботу ендокринної системи людини – пестицидів та парабенів, – та на їхню деградацію у пробах води. АДБЕ можна застосовувати для розроблення вольтамперометричних методик, які ґрунтуються як на струмах окиснення, так і відновлення речовин на поверхні електрода. У деяких працях з аналітичною метою використовують обидві ділянки сканування [15–17].

Головною перевагою АДБЕ щодо використання в аналітичній хімії є широкий робочий діапазон потенціалів як у катодній, так і в анодній ділянках у водних та неводних розчинах. Виділення водню (H_2) на поверхні АДБЕ у кислому водному середовищі починається за $-1,2$ В, а виділення кисню (O_2) – за $+2,4$ В. Тобто “вікно” потенціалів може бути більшим, ніж $3,5$ В. Завдяки цьому АДБЕ можна використовувати в широких межах рН у водному середовищі. Ця властивість пов’язана з sp^3 -гібридацією атома карбону в алмазі [18–21].

Для АДБЕ також характерні, зазвичай, слабка адсорбція для більшості органічних молекул, низький фоновий струм, низька ємність ПЕШ [21–23]. Усе це своєю чергою свідчить про високу чутливість електрода, тобто про інтенсивніший аналітичний сигнал. Крім того, поверхню АДБЕ можна легко очищати та активувати [12–13]. Варто також відмітити механічну міцність АДБЕ, хімічну інертність, тривалий термін служби [1, 10, 24–28] та чудову біосумісність [11, 29–33]. АДБ є визнаним “кандидатом” для імплантації [11, 34]. Біосумісність АДБЕ сприяє розробленню методик визначення лікарських речовин, нейромедіаторів та їхніх метаболітів, дослідженню процесів окиснення/відновлення цих речовин *in vivo*. Усі ці властивості визначають привабливість АДБЕ з погляду аналітичної вольтамперометрії. У цьому огляді ми зосередимо увагу на особливостях активації поверхні АДБЕ для використання в аналізі.

2. Будова АДБЕ

Класичні АДБЕ зазвичай виготовляють у вигляді стержня у корпусі з тефлону чи епоксидної смоли та герметика (рис. 1), алмазний диск напилують бором та полірують [35]. Для синтезу алмазних плівок протягом майже п’яти десятиліть найчастіше використовують хімічне осадження з парової фази (Chemical Vapor Deposition, CVD) [1]. Зараз стійкі полікристалічні товсті плівки АДБ виготовляють здебільшого високопотужним мікрохвильовим осадженням із пари (Microwave Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition, MW PACVD) [36–37]. Якщо під час осадження наявне джерело бору, то утворюються нанокристаліти, які можуть бути *n*-леговані або *p*-леговані. Для цих кристалітів співвідношення поверхня/об’єм набагато більше й електрична провідність набагато вища, ніж у мікрокристалічному чи нанокристалічному нелегованому алмазі [38]. Залежно від особливостей синтезу можна отримати алмазні плівки з різним вмістом sp^2 -гібридизованого карбону, характерного для графіту. Збільшення вмісту sp^2 -гібридизованого карбону сприяє

перенесенню електронів, однак звужує робочий діапазон потенціалу, збільшує фоновий струм і небажану адсорбцію хімічних речовин та зменшує стабільність матеріалу [39].

Як підкладку для АДБ-плівки використовують високопровідний кремній з шаром SiO₂ товщиною 2 мкм. Для отримання модифікацій поверхні алмазу використовують також нанокластери золота, нікелю, бісмуту, сажі, нафіону, графену тощо [40–45]. Для зменшення дефектів поверхні АДБЕ часто використовують вакуумний підпал та оброблення водневою плазмою *in situ* [46].

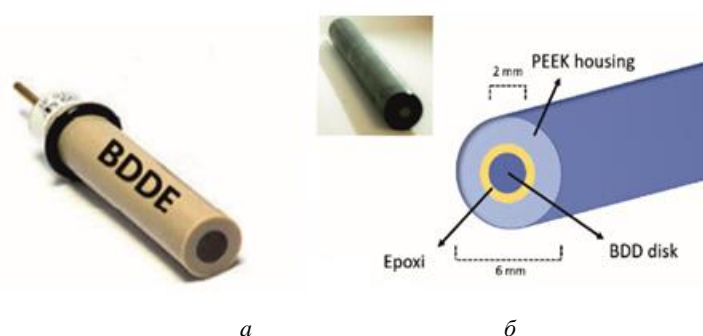


Рис. 1. Вигляд дискового АДБЕ: *a* – [45]; *б* – [28]
 Fig. 1. Shape of disk BDDE: *a* – [45]; *b* – [28]

На рис. 2 зображено триелектродну плівкову комірку виготовлену в Інституті електроніки та фотоніки, факультету електротехніки та інформаційних технологій Словацького технологічного університету в Братиславі. Зазвичай діаметр робочого електрода (WE) становить 1–3 мм. Як електрод порівняння (RE) використовують аргентум хлоридний електрод, допоміжний електрод (CE) – графітовий електрод. Перевага плівкових електродів полягає у їхній портативності і компактності, що, своєю чергою, дає змогу використовувати їх для швидкого аналізу біологічних рідин, коли для аналізу достатньо однієї краплі проби, а також у протічних системах (хроматографія, капілярний електрофорез) та в інжекційному аналізі (протічному і порційному) [5, 47–51].

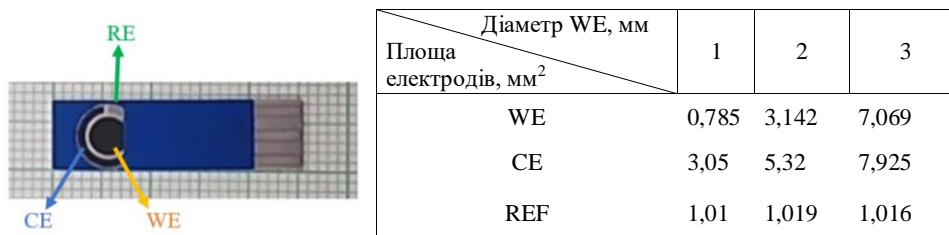


Рис. 2. Вигляд та характеристики триелектродної плівкової комірки з робочим АДБЕ
 Fig.2. The structure of the three-electrode film cell with a working BDDE

Зазвичай уміст бору визначають співвідношенням В/С, де В і С – вміст бору та карбону у газовій фазі (парі) під час легування. Кількість атомів бору, які осаджуються на поверхні алмазу, зазвичай коливається в діапазоні від 100 до 15 000 ppm. Наприклад, під час вольтамперометричного визначення ципрофлоксацину автори [47] вивчили вплив співвідношення В/С на чутливість методики. Досліджували АДБЕ з умістом бору в діапазоні від 0 до 20 000 ppm. АДБЕ з малим умістом бору виявляли низьку чутливість до малих концентрацій аналіта. Зі збільшенням рівня легування до 15000 ppm отриманий сигнал для ципрофлоксацину був достатньо високим і достатнім для визначення антибіотику в зразках сечі. Варто додати, що найнижчу межу виявлення ципрофлоксацину (LOD) (0,05 мМ) отримано з використанням АДБЕ з найвищим рівнем легування (20 000 ppm) [47]. Проте збільшення кількості бору може звужити робочий діапазон потенціалів і зменшити стабільність матеріалу [1, 50, 52]. Беручи до уваги ці чинники, можна підібрати оптимальний рівень легування бором для конкретного аналізу, однак найчастіше використовують АДБЕ з умістом бору 8 000 ppm, які забезпечують високу провідність, достатньо високий і чіткий аналітичний сигнал та широкий діапазон потенціалів [5, 48].

Для характеристики поверхні АДБЕ використовують скануючу електронну мікроскопію (SEM) і раманівську спектроскопію [9, 21, 35, 53]. На рис. 3 подано SEM фотографію (а) і спектр комбінаційного розсіювання (КР) для АДБ-плівки “друкованої” комірки (б), яку зображено на рис. 2. На КР-спектрі чітко простежуються типові максимуми алмазу, сильнолегованого бором: приблизно 470 cm^{-1} (B₁); $1\ 200\text{ cm}^{-1}$ (B₂); $1\ 290\text{ cm}^{-1}$ ($sp^3\text{ C}$). Максимум sp^3 належить до залишків максимуму зони фонованого центру (zone center phonon, ZCP) алмазу і зміщений через інтерференцію переходів електронних та оптичних фононів із вихідного положення для монокристалічного алмазу ($1\ 333\text{ cm}^{-1}$). Смуга B₂ пов’язана з оптичним утриманням фононів на дефектах решітки, викликаних включеннями бору. Карбон sp^2 -гібридизований виявляється за $1\ 530\text{ cm}^{-1}$.

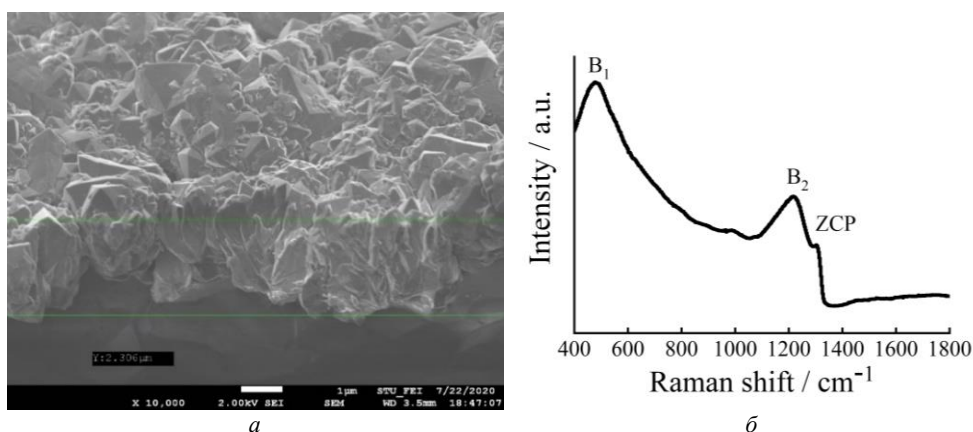


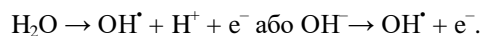
Рис. 3. SEM фотографія (під кутом 45°) (а)
і спектр комбінаційного розсіювання для АДБЕ плівкової комірки (б)
Fig. 3. SEM image (angle 45°) (a)
and Raman spectrum for BDDE film of cell (b)

3. Активація електрода

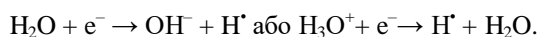
Так само як й інші стаціонарні електроди АДБЕ потребують очищення й активації поверхні. Попереднє електрохімічне оброблення поверхні електрода здебільшого поліпшує продуктивність електрода: пришвидшується перенесення електронів, підвищується чутливість, забезпечується хороша відтворюваність результатів, також може поліпшитися селективність.

Під час очищення поверхні відбувається видалення адсорбованих забруднень, продуктів електрохімічних реакцій, пасивуючих плівок. Очищують поверхню АДБЕ або механічно-поліруванням дрібнодисперсним Al_2O_3 [28, 54–55], або електрохімічно [54]. Залишки алюміній оксиду видаляють здебільшого високоочищеною водою [54]. У праці [28] потім додатково промивали електрод розчином ізопропанолу протягом 20 хв. Електрохімічно обробляють АДБЕ зазвичай у водних розчинах, у багатьох випадках під час електрохімічного оброблення поверхня електрода одночасно очищується й активується.

Активації АДБЕ присвячено розділ у монографії [1] й огляд [10]. Активують поверхню електрода потенціостатично, гальваностатично та в динамічних умовах, використовують різні фонові електроліти. Результати досліджень методом раманівської спектроскопії поверхонь АДБЕ до та після електрохімічної активації свідчать, що в АДБ-плівках не відбувається ніяких важливих об'ємних структурних змін чи змін співвідношення sp^2/sp^3 -гібридизованого карбону. Натомість доведено, що під час анодної поляризації відбувається утворення кисневмісних функціональних груп на поверхні АДБЕ (C–OH, C=O, C–O–C, COOH). Вважають, що окиснення поверхні АДБЕ спричиняють гідроксильні радикали, електрогенеровані на початковому етапі процесу електроокиснення води, або під час окиснення гідроксиліонів у основних середовищах [10]:



Під час катодної поляризації на початковому етапі розрядження води чи іонів гідроксонію у кислому середовищі на поверхні АДБЕ утворюються радикали водню [10]:



В англійській літературі щодо цих процесів використовують терміни *saturation of surface* – насичення поверхні або *oxygen-terminated surface/ hydrogen-terminated surface* – поверхня з кисневими/водневими закінченнями. Функціоналізація поверхні електрода може сильно вплинути на кінетику перенесення електронів [21]. Відповідно, насичення поверхні АДБЕ оксигеновмісними групами сприяє надалі процесам окиснення, а “водневими закінченнями” – відновлення. Тобто електрохімічну активність АДБЕ щодо різних аналітів можна “налаштувати” за допомогою попереднього електрохімічного оброблення електрода. Також поверхневі закінчення АДБЕ впливають на змочувальні властивості електрода.

Треба відмітити, що ступінь насичення поверхні АДБЕ киснем чи воднем залежить від абсолютного значення потенціалу (анодного чи катодного, відповідно), густини струму і тривалості активації. У літературі велися дискусії щодо того, чи справді катодною поляризацією електрода можна повторно гідрогенізувати поверхню. Є інформація, що для цього треба накладати потенціал -35 В протягом 5 хв у 2 М розчині хлоридної кислоти [21]. Однак у будь-якому разі утворення реакційноздатних частинок під час поляризації електрода у розчині фонового електроліту сприяє очищенню його поверхні, а також дає змогу модифікувати поверхню різними функціональними групами [56–61]. Наприклад, на насичену киснем поверхню завдяки реакції естерифікації легко “закріплюються” піреналкілкарбонова кислота, біотин, бензофенон та ін. [56–59].

Для характеристики стану поверхні електрода після активації найчастіше використовують циклічні вольтамперограми редокс-пар $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}/[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ та $[\text{Ru}(\text{NH}_3)_6]^{3+}/[\text{Ru}(\text{NH}_3)_6]^{2+}$, рідше – $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ [1, 10, 35, 41, 55, 62–64]. Це одноелектронні оборотні окисно-відновні системи, однак стан поверхні електрода по-різному впливає на кінетику перенесення електрона, оскільки перетворення $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}/[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ супроводжується дисоціацією комплексного іона на поверхні електрода й утворенням нової координаційної сфери, а для $[\text{Ru}(\text{NH}_3)_6]^{3+}/[\text{Ru}(\text{NH}_3)_6]^{2+}$ окисно-відновна реакція не супроводжується дисоціацією комплексу [65]. Ті самі окисно-відновні системи використовують для визначення електроактивної площі поверхні електродів [66]. У табл. 1 коротко охарактеризовано умови активації АДБЕ з публікацій останнього десятиріччя. У раніших працях переважала активація накладанням на електрод декількох десятків циклів у певному діапазоні потенціалів у фоновому електроліті. Активували тільки ту ділянку сканування, в якій аналіт електрохімічно перетворювався.

Зараз здебільшого активують АДБЕ у потенціостатичних умовах, утримуючи електрод у фоновому електроліті за певного потенціалу впродовж декількох хвилин, причому активують частіше почергово анодно й катодно, не залежно від природи електрохімічного процесу, на якому ґрунтується аналіз [16, 35–36, 54, 56, 68–70, 72, 77, 81, 84, 86–87]. Хоча відомі випадки, коли катодно оброблений АДБ забезпечив чіткіший анодний пік і вищий струм окиснення аналіту [74, 76]. Як фоновий електроліт найчастіше використовують сульфатну кислоту достатньо високої концентрації $0,5$ – 1 М (табл. 1). Таке електрохімічне оброблення дає змогу отримати найвищий аналітичний сигнал, оскільки відбувається одночасно регенерація й активація поверхні АДБЕ (рис. 4). Також може простежуватися зсув потенціалу піка і змінюватися вигляд вольтамперної кривої [55].

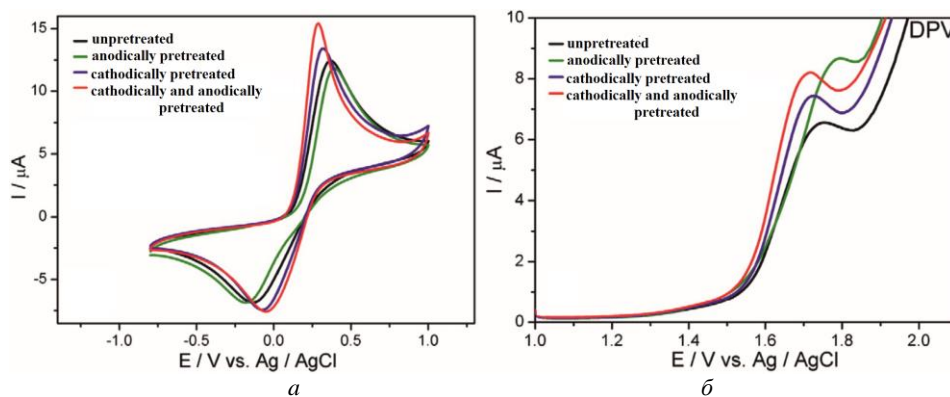


Рис. 4. Циклічні вольтамперограми 1 мМ $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}/[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ у 0,1 М КСl на АДБЕ після різних програм електрохімічної активації з використанням швидкості сканування 100 мВ/с (а). Диференційно-імпульсні вольтамперограми 0,1 мМ нефопаму (NEF) в 1 М HClO_4 на АДБЕ після різної попередньої електрохімічної активації (б) [54]

Fig. 4. Cyclic voltammograms of 1mM $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}/[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ in 0.1 M KCl on the BDDE after different electrochemical activation programs using the scan rate 100mV s^{-1} (a). Differential pulse voltammograms records of 0.1mM nephopam (NEF) in 1 M HClO_4 on the BDDE after different electrochemical pretreatment (b) [54]

Таблиця 1

Умови активації поверхні АДБЕ

Table 1

Conditions of surface activation BDDE

Аналітична електрохімічна реакція	Спосіб накладання потенціалу*	Фоновий електроліт	Рік	Літера-тура
1	2	3	4	5
Плівкові АДБЕ				
Окиснення	Від 0 до +2,5 В, 15–20 циклів з $V=150$ мВ/с	1 М H_2SO_4	2013	69
Окиснення	Від –2 до +2 В протягом 10 хв	1 М HNO_3	2014	70
Окиснення	+2 В протягом 180 с, –2 В протягом 180 с	1 М H_2SO_4	2014	55
Окиснення	+2 В протягом 60 с –2 В протягом 60 с	0,5 М H_2SO_4	2014	71
Окиснення	+3 В протягом 180 с	0,5 М H_2SO_4	2014–2015	72–73
Окиснення	+0,5 А cm^2 , протягом 30 с –0,5 А cm^2 протягом 180 с	0,5 М H_2SO_4	2015	74
Окиснення	Від –2 до +2 В, 15 циклів з $V=100$ мВ/с	ацетатний БР та УБС	2015	67
Окиснення	+0,001 А протягом 120 с –0,03 А протягом 360 с	0,5 М H_2SO_4	2017	48

Закінчення табл. 1

1	2	3	4	5
Окиснення	+0,25 А см ² протягом 60 с –0,25 А см ² протягом 240 с	0,5 М Н ₂ SO ₄	2018	52
Окиснення	+0,5 А см ² протягом 30 с	0,5 М Н ₂ SO ₄	2018	23
Окиснення	–0,03 А протягом 360 с +0,001 А протягом 120 с	0,5 М Н ₂ SO ₄	2018	47
Окиснення	Від –2 до +2 В протягом 40 с	1 М ННО ₃	2018	75
Окиснення/ відновлення	+0,25 А см ² протягом 60 с –0,25 А см ² протягом 240 с	0,5 М Н ₂ SO ₄	2020	15
Окиснення	+0,5 А см ² протягом 180 с –0,25 А см ² протягом 60 с	0,5 М Н ₂ SO ₄	2020	76
Окиснення	+1,8 В протягом 180 с –1,8 В протягом 180 с	0,5 М Н ₂ SO ₄	2021	16
Окиснення	Від 0 до +2 В, 5 циклів 3 V= 100мВ/с.	0,1 М NaOH	2021	77
Стержневі АДБЕ				
Відновлення	+2 В протягом 120 с –2 В протягом 60 с	0,25 М Н ₂ SO ₄	2012	78
Окиснення	+1,6 В протягом 180 с –1,6 В протягом 180 с	0,5 М Н ₂ SO ₄	2018	79
Окиснення/ Відновлення	+2,6 В протягом 500 с –2,6 В протягом 60 с	0,1 М УБС	2019	17
Окиснення	+2,4 протягом 20 хв	0,5 М Н ₂ SO ₄	2019	51
Окиснення	–1,35 В протягом 30 с	суміш 0,25 М ацетатного БР, 0,04 М тартрату калію	2020	43
Окиснення	–3,0 В протягом 15 хв	0,5 М Н ₂ SO ₄	2020	80
Окиснення	+1,6 В протягом 180 с –1,6 В протягом 180 с	0,5 М Н ₂ SO ₄	2020	81
Окиснення	+2 В протягом 120 с –2 В протягом 120 с	0,5 М Н ₂ SO ₄	2020	54
Окиснення	+1,6 В протягом 180 с –1,6 В протягом 180 с	0,5 М Н ₂ SO ₄	2020	82
Окиснення	+1,8 В протягом 180 с –1,8 В протягом 180 с	0,5 М Н ₂ SO ₄	2020	83
Окиснення	–1,6 В протягом 120 с +1,6 В протягом 180 с	0,5 М Н ₂ SO ₄	2020	84
Окиснення	+1,8 В протягом 180 с –1,8 В протягом 180 с	0,5 М Н ₂ SO ₄	2021	85–86
Окиснення	+1,8 В протягом 180 с	0,5 М Н ₂ SO ₄	2021	87

* Від ... до ... В – означає активацію накладанням на електрод циклів у цьому діапазоні потенціалів; в іншому разі – почергова активація спочатку за одного потенціалу, а тоді за іншого.

4. Висновки

На скільки нам відомо, ще поки не було проведено систематичних досліджень стану поверхні АДБЕ залежно від методики електрохімічної активації. Способи активації обирали, керуючись інтенсивністю та чіткістю аналітичного сигналу для певного визначення. Правильне попереднє електрохімічне оброблення може бути цінним способом досягнення поліпшених аналітичних властивостей методики. Аналіз літератури засвідчив, що здебільшого як оптимальну обирають активацію в середовищі сульфатної кислоти почергово анодною й катодною поляризацією (не залежно від хімічної структури аналіта чи природи електродного процесу). У такому разі отримують інтенсивніший аналітичний сигнал, вужчий, чіткіший пік та/або зміщення потенціалу піка. Однак спосіб активації щоразу треба обирати експериментально.

1. *Brillas E., Martínez-Huitle C. A.* Synthetic diamond films: preparation, electrochemistry, characterization, and applications. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. 632 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118062364>
2. *Svítková J., Ignat T., Švorc L., Labuda J., Barek J.* Chemical modification of boron-doped diamond electrodes for applications to biosensors and biosensing // *Crit. Rev. Anal. Chem.* 2016. Vol. 46, No. 3. P. 248–256
DOI: <https://doi.org/10.1080/10408347.2015.1082125>
3. *Muzyka K., Sun J., Fereja T. H., Lan Y., Zhang W., Xu G.* Boron-doped diamond: current progress and challenges in view of electroanalytical applications // *Anal. Methods.* 2019. Vol. 11, No. 4. P. 1759-9660.
DOI: <https://doi.org/10.1039/c8ay02197j>
4. *Sarakhman O., Švorc L.* A review on recent advances in the applications of boron-doped diamond electrochemical sensors in food analysis // *Crit. Rev. Anal. Chem.* 2020. <https://doi.org/10.1080/10408347.2020.1828028>
5. *Freitas J., Oliveira T., Munoz R., Richter E.* Boron doped diamond electrodes in flow-based systems // *Front. Chem.* 2019. DOI: <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00190>
6. *Yence M., Cetinkaya A., Ozcelikay G., Kaya S., Ozkan S.* Boron-doped diamond electrodes: recent developments and advances in view of electrochemical drug sensors // *Crit. Rev. Anal. Chem.* 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408347.2020.1863769>
7. *Baluchová S., Daňhel A., Dejmková H., Ostatná V., Fojta M., Schwarzová-Pecková K.* Recent progress in the applications of boron doped diamond electrodes in electroanalysis of organic compounds and biomolecules – A review // *Anal. Chim. Acta.* 2019. Vol. 1077. P. 30–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.05.041>
8. *Pecková K., Barek J.* Boron doped diamond microelectrodes and microelectrode arrays in organic electrochemistry // *Cur. Org. Chem.* 2011. Vol. 15, No. 11. P. 3014–3028. DOI: <https://doi.org/10.2174/138527211798357164>
9. *Ryl J., Cieslik M., Zielinski A., Ficek M., Dec B., Darowicki K., Bogdanowicz R.* High-temperature oxidation of heavy boron-doped diamond electrodes: microstructural and electrochemical performance modification // *Materials.* 2020. Vol. 13(4), No. 964. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13040964>
10. *Lourencao B., Brocenschi F., Medeiros A., Fatibello-Filho O., Rocha-Filho R.* Analytical applications of electrochemically pretreated boron-doped diamond electrodes // *ChemElectroChem.* 2020. Vol. 7. P. 1291–1311. DOI: <https://doi.org/10.1002/celec.202000050>

11. Purcell E., Becker M., Guo Y., Hara S., Ludwig K., McKinney C., Monroe E., Rechenberg R., Rusinek C., Saxena A., Siegenthaler J. R., Sortwell C. E., Thompson C. H., Trevathan J. K., Witt S., Li W. Next-generation diamond electrodes for neurochemical sensing: Challenges and opportunities // *Micromachines*. 2021. Vol. 12, No. 128. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi12020128>
12. Einaga Y., Foord J., Swain G. Diamond electrodes: Diversity and maturity // *MRS Bull.* 2014. Vol. 39. P. 525–532. DOI: <https://doi.org/10.1557/mrs.2014.94>
13. Cobb S., Ayres Z., Macpherson J. Boron doped diamond: A designer electrode material for the twenty-first century // *Annu. Rev. Anal. Chem.* 2018. Vol. 11. P. 463–484. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-anchem-061417-010107>
14. De Luna Ya., Bensalah N. Review on the electrochemical oxidation of endocrine-disrupting chemicals using BDD anodes. // *Curr. Opin. Electrochem.* 2022. Vol. 32, No. 100900. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2021.100900>
15. Micheletti L., Coldibeli B., Rossi Salamanca-Neto C., Almeida L., Sartori E. Assessment of the use of boron-doped diamond electrode for highly sensitive voltammetric determination of the azo-dye carmoisine E-122 in food and environmental matrices // *Talanta*. 2020. No. 121417. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121417>
16. Ertuğrul K., Shabnam A., İzem Ö., Oruç Yu., Yavuz Y. Voltammetric quantification of the anesthetic drug propofol (2,6-diisopropylphenol) in the pharmaceutical formulations on a boron-doped diamond electrode // *J. Ser. Chem. Soc.* 2021. Vol. 86, No. 7–8. P. 711–724. DOI: <https://doi.org/10.2298/JSC201019017K>
17. Almeida S., Gouveia M., Leite L., Santos K., Felsner M., Galli A. In-house validation of voltammetric determination of paracetamol in natural waters // *Rev. Virtual Quim.* 2019. Vol. 11, No. P. 326–338. DOI: <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20190023>
18. Hupert M., Muck A., Wang J., Stotter J., Cvackova Z., Haymond S., Show Y., Swain G. Conductive diamond thin-films in electrochemistry // *Diam. Relat. Mater.* 2003. Vol. 12. P. 1940–1949. DOI: <https://doi.org/10.1016/S0925-9635>
19. Kraft A. Doped diamond: A compact review on a new, Versatile electrode material // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2007. Vol. 2 P. 355–385.
20. Shi D., Liu L., Zhai Z., Chen B., Lu Z., Zhang C., Yuan Z., Zhou M., Yang B., Huang N., Jiang X. Effect of oxygen terminated surface of boron-doped diamond thin-film electrode on seawater salinity sensing. // *J. Mater. Sci. Technol.* 2021. Vol. 86. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.01.028>
21. Macpherson J. V. A practical guide to using boron doped diamond in electrochemical research // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2015. Vol. 17, No. 5. P. 2935–2949.
22. Kozak J., Tyszczyk-Rotko K., Wójciak M., Sowa I., Rotko M. First screen-printed sensor (Electrochemically activated screen-printed boron-doped diamond electrode) for quantitative determination of rifampicin by adsorptive stripping voltammetry. // *Materials*. 2021. Vol. 14, No. 4231. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14154231>
23. Scremin J., Sartori E. Simultaneous determination of nifedipine and atenololin combined dosage forms using a boron-doped diamond electrode with differential pulse voltammetry // *Can. J. Chem.* 2018. Vol. 96. P. 1–7.
24. Švorc L., Cinkova K., Sochr J., Vojs M., Michniak P., Marton M. Sensitive electrochemical determination of amlodipine in pharmaceutical tablets and human urine using a boron-doped diamond electrode // *J. Electroanal. Chem.* 2014. Vol. 728. P. 86–93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2014.06.038>

25. *Waldvogel S., Elsler B.* Electrochemical synthesis on boron-doped diamond // *Electrochimica Acta*. 2012. Vol. 82. P. 434–443.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.03.173>
26. *Vlckova Z., Zivcova O., Petrak V., Tarabkova H., Vacik J., Nesladek M., Kavan L.* Electrochemistry and in situ Raman spectroelectrochemistry of low and high quality boron doped diamond layers in aqueous electrolyte solution // *Electrochim. Acta*. 2013. Vol. 87. 518–525. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.09.031>
27. *Marton M., Vojs M., Kotlar M., Michniak P., Vanco L., Vesely M., Redhammer R.* Deposition of boron doped diamond and carbon nanomaterials on graphite foam electrodes // *Appl. Surf. Sci.* 2014. Vol. 312. P. 139–144.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.05.199>
28. *Maldonado V., Espinoza-Montero P., Rusinek C., Swain G.* Analysis of Ag (I) biocide in water samples using anodic stripping voltammetry with a boron-doped diamond disk electrode // *Anal. Chem.* 2018. Vol. 90, No. 11. P. 6477–6485.
DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.7b04983>
29. *Taylor A. C., Vagaska B., Edgington R., Hebert C., Ferretti P., Bergonzo P., Jackman R.B.* Biocompatibility of nanostructured boron doped diamond for the attachment and proliferation of human neural stem cells // *J. Neural Eng.* 2015. Vol. 12, No. 066016. DOI: <https://doi.org/10.1088/1741-2560/12/6/066016>
30. *Alcaide M., Taylor A., Fjorback M., Zachar V., Pennisi C. P.* Boron-doped nanocrystalline diamond electrodes for neural interfaces: in vivo biocompatibility evaluation // *Front. Neurosci.* 2016. Vol. 10.
DOI: <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00087>
31. *Nistor P. A., May P. W., Tamagnini F., Randall A. D., Caldwell M. A.* Long term culture of pluripotent stem-cell-derived human neurons on diamond – A substrate for neurodegeneration research and therapy // *Biomaterials*. 2015. Vol. 61. P. 139–149.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2015.04.050>
32. *Krusek J., Dittert I., Smejkalova T., Korinek M., Gottfriedova K., Freislebenova H., Neuhoferova E., Klimsa L., Sedlakova S., Taylor A., Mortet V., Petrak V., Benson V., Petrakova V.* Molecular functionalization of planar nanocrystalline and porous nanostructured diamond to form an interface with newborn and adult neurons // *Phys. Status Solidi B-Basic Solid State Phys.* 2019. Vol. 256.
DOI: <https://doi.org/10.1002/pssb.201800424>
33. *Brycht M., Baluchová S., Taylor A., Mortet V., Sedláková S., Klimša L., Schwarzová-Pecková K.* Comparison of electrochemical performance of various boron-doped diamond electrodes: Dopamine sensing in biomimicking media used for cell cultivation // *Bioelectrochemistry*. 2020. No. 107646.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2020.107646>
34. *Garrett D. J., Saunders A. L., McGowan C., Specks J., Ganesan K., Meffin H., Williams R. A., Nayagam D. A. X.* In vivo biocompatibility of boron doped and nitrogen included conductive-diamond for use in medical implants // *J. Biomed. Mater. Res. Part B Appl. Biomater.* 2016. Vol. 104. P. 19–26.
35. *Švorc L., Vojs M., Michniak P., Marton M., Rievaj M., Bustin D.* Electrochemical behavior of methamphetamine and its voltammetric determination in biological samples using self-assembled boron-doped diamond electrode. // *J. Electroanal. Chem.* 2014. Vol. 717–718. P. 34–40.

36. *Radičová M., Behül M., Marton M., Vojs M., Bodor R., Redhammer R., Vojs A.* Heavily boron doped diamond electrodes for ultra-sensitive determination of ciprofloxacin in human urine // *Electroanalysis*. 2017. Vol. 29, No. 6. P. 1612–1617.
37. *Garcia-Segura S., Vieira Dos Santos E., Martínez-Huitle C.* Role of sp^3/sp^2 ratio on the electrocatalytic properties of boron doped diamond electrodes: A mini review // *Electrochem. Commun.* 2015. Vol. 59. P. 52–55.
38. *McCreery R. L.* Advanced Carbon Electrode Materials for Molecular Electrochemistry // *Chemical Reviews*. 2008. Vol. 108, No. 7. P. 2646–2687.
39. *Marton M., Michniak P., Behul M., Rehacek V., Vojs A., Redhammer R., Vojs M.* Bismuth modified boron doped diamond electrode for simultaneous determination of Zn, Cd and Pb ions by square wave anodic stripping voltammetry: Influence of boron concentration and surface morphology // *Vacuum*. 2019. Vol. 167. P. 182–188.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.06.012>
40. *Ěák T., Szabó O., Štenclová P., Potocký Š., Vyskočil V., Kromka A.* Fabrication of structured boron-doped diamond films for electrochemical applications // *Proceedings*. 2018. Vol. 2, No. 13. P. 984. DOI: <https://doi.org/10.3390/proceedings2130984>
41. *Li H., Zhou K., Cao J., Wei Q., Lin Ch., Pei Sh., Ma L., Hu N., Guo Y., Deng Z., Yu Z., Zeng S., Yang W., Meng L.* A novel modification to boron-doped diamond electrode for enhanced, selective detection of dopamine in human serum // *Carbon*. 2021. Vol. 171. P. 16–28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.08.019>
42. *Pei J., Yu X., Zhang Z., Zhang J., Wei S., Boukherroub R.* In-situ graphene modified self-supported boron-doped diamond electrode for Pb(II) electrochemical detection in seawater // *Applied Surface Science*. 2020. Vol. 527. No. 146761.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146761>
43. *Sadok I., Tyszczyk-Rotko K., Mroczka R., Staniszevska M.* Simultaneous voltammetric analysis of tryptophan and kynurenine in culture medium from human cancer cells // *Talanta*. 2020. Vol. 209, No. 120574.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120574>
44. *Stewart S., Scorson E., Hamel M.* Investigating electrochemiluminescence at surface modified boron doped diamond electrodes // *ECS Meeting Abstracts*. 2021. Vol. 61. P. 619–1619. DOI: <https://doi.org/10.1149/MA2021-01611619mtgabs>
45. *Feier B., Gui A., Cristea C., Săndulescu R.* Electrochemical determination of cephalosporins using a bare boron-doped diamond electrode // *Anal. Chim. Acta*. 2017. Vol. 976. P. 25–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2017.04.050>
46. *Li K., Kang X., Gou L.* Mechanical behavior of BDD films after different heat treatments // *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 427, No. 127780.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127780>
47. *Barbosa Lima A., Ferreira L., Barbosa S., de Souza Gil E., Amorim Bezerra da Silva R., Pio dos Santos W.* Selective determination of Verapamil in pharmaceuticals and urine using a boron-doped diamond electrode coupled to flow injection analysis with multiple-pulse amperometric detection // *Electroanalysis*. 2018. Vol. 30. P. 1872–1877. DOI: <https://doi.org/10.1002/elan.201800206>
48. *De Jesus Guedes T., Antônio Reis Andrade G., Barbosa Lima A., Amorim Bezerra da Silva R., Torres Pio dos Santos W.* Simple and fast determination of warfarin in pharmaceutical samples using boron-doped diamond electrode in BIA and FIA systems with multiple pulse amperometric detection // *Electroanalysis*. 2017. Vol. 29. P. 2340–2347. DOI: <https://doi.org/10.1002/elan.201700320>

49. *Bogdanowicz R., Fabiańska A., Golunski L., Sobaszek M., Gnyba M., Ryl J., Darowicki K., Ossowski T., Janssens S., Haenen K., Siedlecka E. M.* Influence of the boron doping level on the electrochemical oxidation of the azo dyes at Si/BDD thin film electrodes // *Diam. Relat. Mater.* 2013. Vol. 39. P. 82–88.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2013.08.004>
50. *Watanabe T., Honda Y., Kanda K., Einaga Y.* Tailored design of boron-doped diamond electrodes for various electrochemical applications with boron-doping level and sp²-bonded carbon impurities // *Phys. Status Solidi Appl. Mater. Sci.* 2014. Vol. 211. P. 2709–2717. DOI: <https://doi.org/10.1002/pssa.201431455>
51. *Němečková-Makrliková A., Navrátil T., Barek J., Štenclová P., Kromka A., Vyskočil V.* Determination of tumour biomarkers homovanillic and vanillylmandelic acid using flow injection analysis with amperometric detection at a boron doped diamond electrode // *Anal. Chim. Acta.* 2019. Vol. 1087. P. 44–50.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.08.062>
52. *Rossi Salamanca-Neto C., Yoshida F., Sartori E., Tobias Moraes J.* Boron-doped diamond electrode: A modification-free platform for sensitive square-wave voltammetric determination of indapamide hydrochloride // *Anal. Methods.* 2018. Vol. 10. P. 3347–3352. DOI: <https://doi.org/10.1039/c8ay01288a>
53. *Kondo T., Kodama Y., Ikezoe S., Yajima K., Aikawa T., Yuasa M.* Porous boron-doped diamond electrodes fabricated via two-step thermal treatment // *Carbon.* 2014. Vol. 77. P. 783–789.
54. *Sarakhman O., Dubenska L., Švorc L.* First voltammetric behavior study of non-narcotic analgesic drug nefopam and its reliable determination on boron-doped diamond electrodes // *J. Electroanal. Chem.* 2019. No. 113759.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.113759>
55. *Redivo L., Stredanský M., De Angelis E., Navarini L., Resmini M., Švorc L.* Bare carbon electrodes as simple and efficient sensors for the quantification of caffeine in commercial beverages // *R. Soc. Open Sci.* 2018. Vol. 5(5), No. 172146.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1098/rsos.172146>
56. *Raymakers J., Haenen K., Maes W.* Diamond surface functionalization: From gemstone to photoelectrochemical applications // *J. Mater. Chem.* 2019. Vol. 7, No. 10134–10165.
57. *Bouvier P., Delabouglise D., Denoyelle A., Marcus B., Mermoux M., Petit J.-P.* Photosensitization of boron-doped diamond by surface grafting of pyrene groups. // *Electrochemical and Solid-State Letters.* 2005. Vol. 8, No. 9. P. E57.
58. *Wenmackers S., Christiaens P., Daenen, M., Haenen, K., Nesládek, M., Van de Ven M., Wagner P.* DNA attachment to nanocrystalline diamond films // *Phys. Status Solidi (a).* 2005. Vol. 202, No. 11. P. 2212–2216.
59. *Marcon L., Wang M., Coffinier Y., Le Normand F., Melnyk O., Boukherroub R., Szunerits S.* Photochemical immobilization of proteins and peptides on benzophenone-terminated boron-doped diamond surfaces // *Langmuir.* 2010. Vol. 26, No. 2. P. 1075–1080.
60. *Wang J., Firestone M. A., Auciello O., Carlisle J. A.* Surface functionalization of ultrananocrystalline diamond films by electrochemical reduction of aryldiazonium salts // *Langmuir.* 2004. Vol. 20, No. 26. P. 11450–11456.
61. *Szunerits S., Boukherroub R.* Different strategies for functionalization of diamond surfaces // *J. of Solid State Electrochemistry.* 2007. Vol. 12, No. 10. P. 1205–1218.

62. *Cotchim S., Promsuwan K., Dueramae M., Duerama S., Dueraning An., Thavarungkul P., Kanatharana Pr., Limbut W.* Development and application of an electrochemical sensor for hydroquinone in pharmaceutical products // *J. Electrochem. Soc.* 2020. V. 167, No. 15.
63. *Ouattara K. M. K. L.* Differential pulse voltammetric determination of paracetamol on a boron-doped diamond electrode: application to natural tomato and carrot juices // *Rev. Ivoir. Sci. Technol.* 2019. Vol. 34. P. 44–66. <http://www.revist.ci>
64. *Chen P., Fryling M., McCreery R.* Electron transfer kinetics at modified carbon electrode surfaces: the role of specific surface sites // *Anal. Chem.* 1995. Vol. 67, No. 18. P. 3115–3122.
65. *Bogdanowicz A., Sobaszek M., Klimczuk T., Bogdanowicz R.* Enhanced electrochemical kinetics of highly-oriented (III)-textured boron-doped diamond electrodes induced by deuterium plasma chemistry // *Carbon.* 2021. Vol. 174. P. 594–604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.11.096>
66. *García-Miranda Ferrari A., Foster C., Kelly P., Brownson D., Banks C.* Determination of the electrochemical area of screen-printed electrochemical sensing platforms // *Biosensors.* 2018. Vol. 8, No. 2. P. 53.
67. *Alecrim M., Oliveira F., Guedes T., Neves C., Mendonça V., Gil E., dos Santos W.* Electrochemical behavior of the cotinine at a boron-doped diamond electrode and its determination in saliva by multiple-pulse amperometry in an FIA system // *Electrochim. Acta.* 2016. Vol. 222. P. 331–337. DOI: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.electacta.2016.10.177>
68. *Enache T., Oliveira-Brett A.* Boron doped diamond and glassy carbon electrodes comparative study of the oxidation behaviour of cysteine and methionine // *Bioelectrochemistry.* 2011. Vol. 81, No. 1. P. 46–52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2011.02.001>
69. *Švorc L., Sochr J., Svitkova J., Rievaj M., Bustin D.* Rapid and sensitive electrochemical determination of codeine in pharmaceutical formulations and human urine using a boron-doped diamond film electrode // *Electrochim. Acta.* 2013. Vol. 87. P. 503–510.
70. *Švorc L., Kalcher K.* Flow-injection amperometric determination of yohimbine alkaloid in dietary supplements using a boron-doped diamond electrode // *Sensors and Actuators B: Chemical.* 2014. Vol. 205. P. 215–218. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2014.08.071>
71. *Cinková K., Švorc L., Šatková P., Vojs M., Michniak P., Marton M.* Simple and rapid quantification of folic acid in pharmaceutical tablets using a cathodically pretreated highly boron-doped polycrystalline diamond electrode // *Anal. Lett.* 2015. Vol. 49, No. 1. P. 107–121. DOI: <https://doi.org/10.1080/00032719.2014.999272>
72. *Yardim Y., Şentürk Z.* Electrochemical behavior of folic acid at a boron-doped diamond electrode: its adsorptive stripping voltammetric determination in tablets // *Turk. J. Pharm. Sci.* 2014. Vol. 11. P. 87–100.
73. *Radičová M., Behúl M., Vojs M., Bodor R., Vojs Staňová A.* Voltammetric determination of erythromycin in water samples using a boron-doped diamond electrode // *Phys. Status Solidi (b).* 2015. Vol. 252, No. 11. P. 2608–2613. DOI: <https://doi.org/10.1002/pssb.201552245>

74. *Lourencao B. C., Medeiros R. A., Fatibello-Filho O.* Simultaneous determination of antihypertensive drugs by flow injection analysis using multiple pulse amperometric detection with a cathodically pretreated boron-doped diamond electrode // *J. Electroanal. Chem.* 2015. Vol. 754. P. 154–159.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2015.06.022>
75. *Pysarevska S., Dubenska L., Plotycya S., Švorc L.* A state-of-the-art approach for facile and reliable determination of benzocaine in pharmaceuticals and biological samples based on the use of miniaturized boron-doped diamond electrochemical sensor // *Sens. Actuators B: Chem.* 2018. Vol. 270. P. 9–17.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.05.012>
76. *Oliveira G. G., Azzi D. C., Silva T. A., de Oliveira P. R., Fatibello-Filho O., Janegitz B. C.* Sensitive voltammetric detection of chloroquine drug by applying a boron-doped diamond electrode // *C – Journal of Carbon Research.* 2020. Vol. 6, No. 4. P. 75. DOI: <https://doi.org/10.3390/c6040075>
77. *Kozak J., Tyszczyk-Rotko K., Wójciak M., Sowa I., Rotko M.* First screen-printed sensor (electrochemically activated screen-printed boron-doped diamond electrode) for quantitative determination of rifampicin by adsorptive stripping voltammetry // *Materials.* 2021. Vol. 14, No. 4231. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14154231>
78. *Aleksic M., Radulovic V., Lijesic N., Kapetanovic V.* Electrochemical response and determination of varenicline at boron doped diamond, glassy carbon and hanging mercury electrodes // *Curr. Anal. Chem.* 2012. Vol. 8, No.1. P.133–142.
DOI: <https://doi.org/10.2174/157341112798472152>
79. *Pınar P.* Electrochemical behaviour of ofloxacin in pharmaceutical and biological samples using a boron-doped diamond electrode in using anionic surfactant // *GU J. Sci.* 2018. Vol. 31, No.1. P. 66–80.
80. *Kowalcze M., Jakubowska M.* Voltammetric determination of nicotine in electronic cigarette liquids using a boron-doped diamond electrode (BDDE) // *Diam. Relat. Mater.* 2020. No. 107710. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.107710>
81. *Allahverdiyeva S., Pınar P., Keskin E., Yunusoglu O., Yardım Y., Sentürk, Z.* Adsorptive stripping voltammetric determination of higenamine on a boron-doped diamond electrode improved by the use of an anionic surfactant // *Sensor. Actuator. B Chem.* 2020. Vol. 303, No. 127174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.127174>
82. *Pınar P., Allahverdiyeva S., Yardım Y., Sentürk Z.* Voltammetric sensing of dinitrophenolic herbicide dinoterb on cathodically pretreated boron-doped diamond electrode in the presence of cationic surfactant // *Microchem. J.* 2020. Vol. 155, No. 104772. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.104772>
83. *Allahverdiyev Sh., Yunusoğlu O., Yardım Y., Şentürk Z.* First electrochemical evaluation of favipiravir used as an antiviral option in the treatment of COVID-19: A study of its enhanced voltammetric determination in cationic surfactant media using a boron-doped diamond electrode // *Anal. Chim. Acta.* 2021. Vol. 1159, No. 338418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.338418>
84. *Pınar P., Sentürk Z.* Electrochemical and analytical performance of cathodically pretreated boron-doped diamond electrode for the determination of oxazolidinone antibiotic linezolid in cationic surfactant media // *J. Electroanal. Chem.* 2020. Vol. 878, No. 11468. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2020.114681>

85. *Hoshyar S., Barzani H., Yardım Y., Sentürk Z.* The effect of CTAB, a cationic surfactant, on the adsorption ability of the boron-doped diamond electrode: application for voltammetric sensing of Bisphenol A and Hydroquinone in water samples // *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 2021. Vol. 610, No. 125916. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125916>
86. *Allahverdiyeva S., Yardım Y., Sentürk Z.* Electrooxidation of tetracycline antibiotic demeclocycline at unmodified boron-doped diamond electrode and its enhancement determination in surfactant-containing media // *Talanta.* 2021. Vol. 223, No. 121695. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121695>
87. *Pinar P. T., Yardım Y., Şentürk Z.* Square-wave voltammetric sensing of Lawsone (2-hydroxy-1,4-naphthoquinone) based on the enhancement effect of cationic surfactant on anodically pretreated boron-doped diamond electrode // *Acta Chim. Slov.* 2021. Vol. 68, No. 4. P. 1027–1032. DOI: <https://doi.org/10.17344/acs.2020.6617>

**BORON DOPED DIAMOND ELECTRODE IN ANALYTICAL
CHEMISTRY: METHODS OF ELECTRODE SURFACE ACTIVATION
(A SHORT REVIEW)**

O. Dushna^{1*}, L. Dubenska¹, M. Vojs²

¹*Ivan Franko National University of Lviv,
Kyryla i Mefodiya Str., 6, 79005 Lviv, Ukraine;*

²*Institute of Electronics and Photonics,
Slovak University of Technology in Bratislava,
Ilkovičova Str., 3, 812 19 Bratislava, Slovakia
e-mail: olha.dushna@lnu.edu.ua*

The review is presents to the feature of the use of a boron doped diamond electrode (BDDE) in analytical chemistry. BDDE –one of the most modern material, which is widely used in analytical chemistry and bioanalytical chemistry, as well as for organic synthesis, cleaning of the environment from pollution, medicine, etc. BDDE is becoming increasingly popular for voltammetric determination of residual amounts organic substances in complex objects (medicines, biological fluids, food). Nowadays use rod (disk) and film BDDE. The advantage of film electrodes is their portability and compactness, which, in turn, allows them to be used for rapid analysis of biological fluids, when one drop of sample is enough for analysis.

BDDE require surface cleaning and activation, as do other stationary electrodes. In this paper, the main attention is focused on the features of BDDE activation surface for use in the analysis. Activate the electrode surface potentiostatically, galvanostatically and under dynamic conditions. Also use different background electrolytes. BDDE is usually electrochemically treated in aqueous solutions, mostly the surface of the electrode is cleaned

and activated at the same time. Proper pre-electrochemical treatment can be a valuable way to achieve improved analytical properties of the methods of voltammetric determination. In this case, obtain a more intense analytical signal, a narrower, clearer peak and/or a useful shift of the peak potential, which increases the sensitivity and selectivity of the determination. For the most part, activation in a medium of sulfuric acid with a sufficiently high concentration of 0.5–1.0 M is chosen as the optimal one. The electrode is polarized alternately anode and cathode (regardless of the chemical structure of the analyte or the nature of the electrode process). However, the method of activation must always be chosen experimentally.

The review contains more than 80 references on the features of BDDE surface activation, including monographs, reviews, articles and original works.

Keywords: voltammetry, boron doped diamond electrode, activation surface polarization.

Стаття надійшла до редколегії 01.11.2021

Прийнята до друку 10.06.2022