

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Одеський національний університет  
імені І. І. Мечникова

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE  
OF UKRAINE  
Odesa I. I. Mechnykov National University

**СЕНСОРНА  
ЕЛЕКТРОНІКА  
І МІКРОСИСТЕМНІ  
ТЕХНОЛОГІЇ  
2023 – Т. 20, № 1**

**SENSOR  
ELECTRONICS  
AND MICROSYSTEM  
TECHNOLOGIES  
2023 – VOL. 20, No. 1**

*Науково-технічний журнал*

*Scientific and Technical Journal*

Заснований 13.11.2003 року  
Виходить 4 рази на рік

It is based 13.11.2003 року  
The Journal issue four times a year

УДК 681.586

UDC 681.586

Засновник Одеський національний  
університет імені І. І. Мечникова

Founded by Odesa I. I. Mechnykov  
National University

За підтримки Українського фізичного  
товариства

At support of the Ukrainian Physical  
Society

Свідоцтво про державну реєстрацію  
КВ № 8131

Certificate of State Registration  
KB № 8131

Журнал входить до переліку фахових видань  
ВАК України з фізико-математичних,  
технічних та біологічних наук

The Journal is a part of list of the issues  
recommended by SAK of Ukraine on physical  
and mathematical, engineering and biological  
sciences

Журнал реферується РЖ «Джерело»  
включено в міжнародні бази  
Index Copernicus, наукова електронна  
бібліотека Cross Ref. Elibrary, Directory of  
Research Journal Indexing, General Impact  
Factor EBSCO

The Journal is reviewed by RJ “Djerelo»  
is included in the International Base Index  
Copernicus, Cross Ref. Elibrary,  
Directory of Research  
Journal Indexing, General Impact Factor  
EBSCO

Видається за рішенням Вченої ради  
Одеського національного університету  
імені І. І. Мечникова  
*Протокол № 6 від 28 березня 2023 р.*

Publishes on the resolution of Odesa  
I. I. Mechnykov National University  
Scientific Council  
*Transaction No. 6, 28.03.2023*

Адреса редакції:  
вул. Дворянська, 2, МННФТЦ (НДЛІ-3),  
Одеський національний університет  
імені І. І. Мечникова, Одеса, 65082, Україна.  
Тел./Факс: +38(048)723-34-61

Editorial address:  
2, Dvoryanskaya Str., ISEPTC (RL-3),  
Odesa I. I. Mechnykov National University,  
Odesa, 65082, Ukraine.  
Ph./Fax: +38(048)723-34-61

## Редакційна колегія

Головний редактор – **В. А. Сминтина**  
Заступник головного редактора – **Я. І. Лепіх**  
**А. П. Балабан** (Одеса, Україна) –  
відповідальний секретар

**О. Є. Беляєв** (Київ, Україна)  
**І. В. Блонський** (Київ, Україна)  
**В. Г. Вербицький** (Київ, Україна)  
**Б. М. Галкін** (Одеса, Україна)  
**Ю. О. Гунченко** (Одеса, Україна)  
**А. Д'Аміко** (Рим, Італія)  
**Н. Джаффрезік Рене** (Ліон, Франція)  
**С. В. Дзядевич** (Київ, Україна)  
**Г. В. Єльська** (Київ, Україна)  
**В. О. Іваниця** (Одеса, Україна)  
**О. М. Калашніков** (Ноттінгем, Велика Британія)  
**О. В. Коваленко** (Дніпро, Україна)  
**І. А. Кравченко** (Одеса, Україна)  
**С. В. Ленков** (Київ, Україна)  
**Є. В. Малахов** (Одеса, Україна)  
**А. Медвідь** (Ріга, Латвія)  
**А. С. Опанасюк** (Суми, Україна)  
**С. М. Рябченко** (Київ, Україна)  
**В. А. Скришевський** (Київ, Україна)  
**О. П. Солдаткін** (Київ, Україна)  
**М. Ф. Стародуб** (Київ, Україна)  
**М. В. Стріха** (Київ, Україна)  
**М. В. Ткач** (Чернівці, Україна)  
**А. Чаудхрі** (Чандігар, Індія)  
**Є. М. Шерегій** (Жешув, Польща)

## Editorial Board

Editor-in-Chief – **V. A. Smyntyna**  
Vice Editor-in-Chief – **Ya. I. Lepikh**  
**A. P. Balaban** (Odesa, Ukraine) –  
responsible editor

**A. E. Belyaev** (Kyiv, Ukraine)  
**I. V. Blonskii** (Kyiv, Ukraine)  
**V. G. Verbitsky** (Kyiv, Ukraine)  
**B. M. Galkin** (Odesa, Ukraine)  
**Yu. O. Gunchenko** (Odesa, Ukraine)  
**A. D'Amiko** (Rome, Italy)  
**N. Jaffrezik Renault** (Lyon, France)  
**S. V. Dzyadevych** (Kyiv, Ukraine)  
**G. V. Elskaya** (Kyiv, Ukraine)  
**V. O. Ivanytsia** (Odesa, Ukraine)  
**O. M. Kalashnikov** (Nottingham, United Kingdom)  
**O. V. Kovalenko** (Dnipro, Ukraine)  
**I. A. Kravchenko** (Odesa, Ukraine)  
**S. V. Lenkov** (Kyiv, Ukraine)  
**E. V. Malakhov** (Odesa, Ukraine)  
**Arturs Medvids** (Riga, Latvia)  
**A. S. Opanasyuk** (Sumy, Ukraine)  
**S. M. Ryabchenko** (Kyiv, Ukraine)  
**V. A. Skryshevsky** (Kyiv, Ukraine)  
**A. P. Soldatkin** (Kyiv, Ukraine)  
**N. F. Starodub** (Kyiv, Ukraine)  
**M. V. Strikha** (Kyiv, Ukraine)  
**M. V. Tkach** (Chernivtsi, Ukraine)  
**A. Chaundhri** (Chandigarh, India)  
**E. M. Sheregii** (Rzeszow, Poland) 45

Науковий редактор випуску  
та відповідальний за випуск – **Я. І. Лепіх**

## ЗМІСТ CONTENTS

### **Фізичні, хімічні та інші явища, на основі яких можуть бути створені сенсори Physical, chemical and other phenomena, as the bases of sensors**

*M. V. Strikha, D. V. Antoniuk*

THE IMPACT OF ADSORBED MONOLAYERS WITH AN ARBITRARY CONCENTRATION RATIO OF OPPOSITE CHARGES ON THE ELECTRON AFFINITY OF A SEMICONDUCTOR ..... 4

*M. B. Стріха, Д. В. Антонюк*

ВПЛИВ АДСОРБОВАНИХ МОНОШАРІВ З ДОВІЛЬНИМ СПІВВІДНОШЕННЯМ КОНЦЕНТРАЦІЇ РІЗНОЙМЕННИХ ЗАРЯДІВ НА ЕЛЕКТРОННУ СПОРІДНЕНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКА

### **Проектування і математичне моделювання сенсорів Sensors design and mathematical modeling**

*Ya. I. Lepikh*

DETERMINATION OF THE OPTIMAL PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODEL AND WEIGHT FUNCTIONS FOR CALCULATING THE TOPOLOGY OF COUNTERPINE CONVERTERS OF SURFACE ACOUSTIC WAVES ..... 11

*Я. І. Леніх*

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ І ВАГОВИХ ФУНКЦІЙ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ТОПОЛОГІЇ ЗУСТРІЧНО-ШТИРЬОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ

### **Хімічні сенсори Chemical sensors**

*A. S. Chernenko, V. V. Kalinchak,*

*M. V. Roziznany, A. K. Kopyuka*

ABOUT THE POSSIBILITY OF USING THERMOCHEMICAL GAS ANALYZERS IN A MULTICOMPONENT MIXTURE .. 20

*O. S. Chernenko, V. V. Kalinchak,*

*M. V. Roziznany, O. K. Kopyuka*

ПРО МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОХІМІЧНИХ ГАЗОАНАЛІЗАТОРІВ В БАГАТОКОМПОНЕНТНІЙ СУМІШІ

*Ya. I. Lepikh, I. K. Doicho*

MOISTURE SENSITIVITY OF SILICATE GLASS AND CREATION OF A SENSOR BASED ON IT..... 31

*Я. І. Леніх, І. К. Дойчо*

ЧУТЛИВІСТЬ ДО ВОЛОГИ СИЛІКАТНОГО СКЛА І СТВОРЕННЯ НА ЙОГО ОСНОВІ СЕНСОРА

### **Біосенсори Biosensors**

*K. O. Berketa, O. Y. Saiapina, L. R. Fayura,*

*A. A. Sibirny, S. V. Dzyadevych, O. O. Soldatkin*

DEVELOPMENT OF CONDUCTOMETRIC ARGinine-SENSITIVE BIOSENSOR BASED ON ARGinine DEIMINASE ..... 36

*K. O. Беркета, О. Я. Саяпіна, Л. Р. Фаюра,*

*A. A. Сибірний, С. В. Дзядевич,*

*O. O. Солдаткін*

РОЗРОБКА КОНДУКТОМЕТРИЧНОГО АРГІНІН-ЧУТЛИВОГО БІОСЕНСОРА НА ОСНОВІ АРГІНІНДЕІМІНАЗИ

### **Відкритий лист науковців України та діаспори..... 54**

### **An open letter from scientists of Ukraine and diaspora ..... 61**

### **Інформація для авторів. Вимоги до оформлення статей у журнал..... 69**

### **Information for authors. The requirements on papers preparation ..... 72**

# ФІЗИЧНІ, ХІМІЧНІ ТА ІНШІ ЯВИЩА, НА ОСНОВІ ЯКИХ МОЖУТЬ БУТИ СТВОРЕНІ СЕНСОРИ

---

## PHYSICAL, CHEMICAL AND OTHER PHENOMENA, AS THE BASES OF SENSORS

---

---

PACS85.30.De, 85.30.Kk, 85.30.Mn  
DOI: 10.18524/1815-7459.2023.1.275941

### ВПЛИВ АДСОРБОВАНИХ МОНОШАРІВ З ДОВІЛЬНИМ СПІВВІДНОШЕННЯМ КОНЦЕНТРАЦІЇ РІЗНОЙМЕННИХ ЗАРЯДІВ НА ЕЛЕКТРОННУ СПОРІДНЕНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКА

*М. В. Стріха<sup>1,2</sup>, Д. В. Антонюк<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Київський національний університет ім. Тараса Шевченка,  
факультет радіофізики, електроніки і комп'ютерних систем,  
пр. Глушкова, 4г, Київ, Україна;

<sup>2</sup> Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,  
пр. Науки, 41, Київ, Україна.  
E-mail: maksym\_strikha@hotmail.com

### ВПЛИВ АДСОРБОВАНИХ МОНОШАРІВ З ДОВІЛЬНИМ СПІВВІДНОШЕННЯМ КОНЦЕНТРАЦІЇ РІЗНОЙМЕННИХ ЗАРЯДІВ НА ЕЛЕКТРОННУ СПОРІДНЕНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКА

*М. В. Стріха, Д. В. Антонюк*

**Анотація.** Наявність на поверхні напівпровідника дипольного шару за умови рівності концентрацій різнойменно заряджених адсорбованих атомів (напр., кисню й металу)  $N_s^{(-)} = N_s^{(+)}$  може призвести до зниження електронної спорідненості на величину до 3 еВ. У рамках здійсненого в цій роботі аналізу продемонстровано, що асиметрія поверхневих концентрацій кисню і металу може призвести до двох протилежних наслідків: при  $N_s^{(-)} > N_s^{(+)}$  зниження спорідненості робиться меншим через вигин зон угору в області просторового заряду напівпровідника, а при  $N_s^{(-)} < N_s^{(+)}$  зниження спорідненості стає більшим через вигин зон униз. Такий результат є вельми бажаним з огляду перспективи створення поверхонь з низькою роботою виходу для сучасних пристроїв емісійної електроніки.

**Ключові слова:** напівпровідник, робота виходу, електронна спорідненість, адсорбований моношар, кисень, метал

## THE IMPACT OF ADSORBED MONOLAYERS WITH AN ARBITRARY CONCENTRATION RATIO OF OPPOSITE CHARGES ON THE ELECTRON AFFINITY OF A SEMICONDUCTOR

*M. V. Strikha, D. V. Antoniuk*

**Abstract.** A dipole layer on the semiconductor's surface with the equal concentration of oppositely charged adsorbed atoms (e.g., oxygen and metal)  $N_s^{(-)} = N_s^{(+)}$ , can decrease the electron affinity by up to 3 eV. The analytical part of this paper demonstrates that the asymmetry in the surface concentration of oxygen and metal can impact the affinity in two ways: when  $N_s^{(-)} > N_s^{(+)}$ , the affinity's decrease is lower due to upward bending of the bands in the region of the space charge of the semiconductor, while when  $N_s^{(-)} < N_s^{(+)}$  the affinity's decreases greater due to the downward bending of the bands. Such impact is desirable as it facilitates fabrication of surfaces with low work function for modern emission electronic devices.

**Keywords:** semiconductor, work function, electron affinity, adsorbed monolayer, oxygen, metal

Триває інтенсивне вивчення матеріалів з низькими, або й від'ємними роботами виходу (для металів) чи електронними спорідненостями (для напівпровідників і діелектриків), які могли б забезпечити створення приладів емісійної електроніки нового покоління (див. напр. роботу [1] та посилання в ній). Тому актуальним є створення теоретичної моделі, яка б давала змогу оцінити перспективність різних матеріалів і покриттів для створення сучасних фотокатодів чи ефективних катодів для польової емісії зі зниженою чи нульовою роботою виходу.

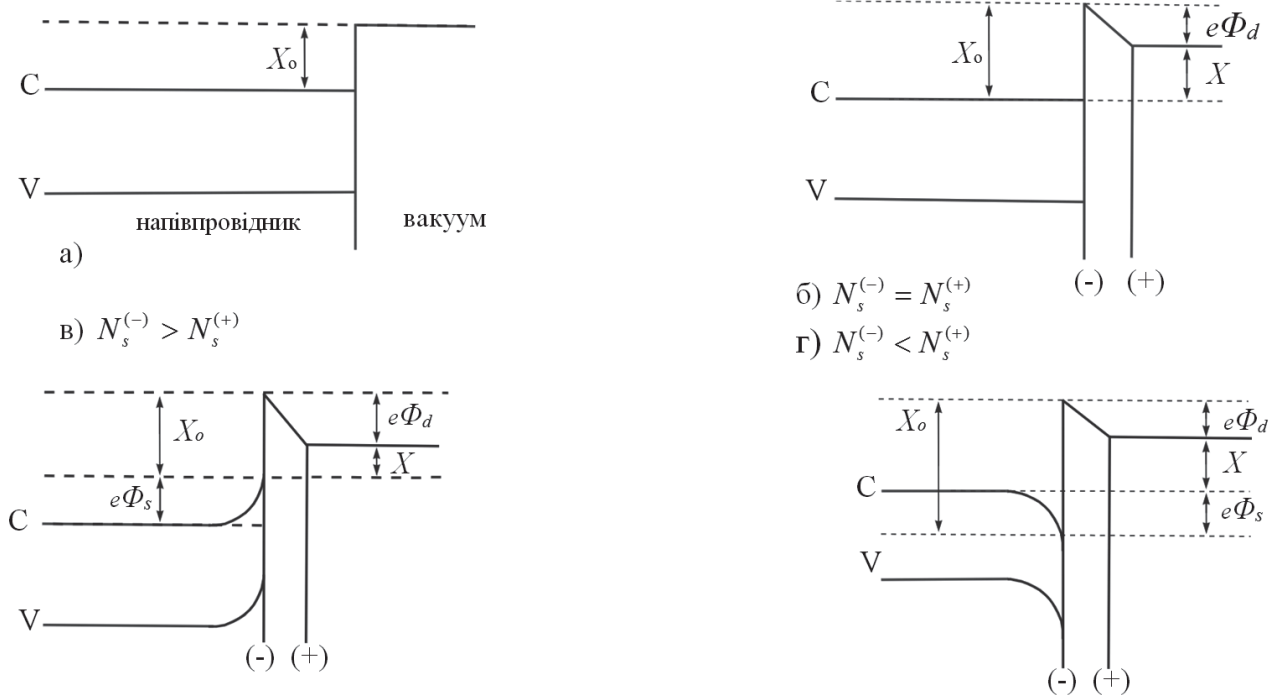
У роботі [2] розвинуто просту теоретичну модель, яка пов'язує зменшення електронної спорідненості напівпровідника (чи діелектрика) з такими параметрами, як поверхнева густина заряду, локалізованого на поверхневих станах чи адсорбованих атомах, та об'ємна густина заряду в області просторового заряду, які разом утворюють подвійний заряджений шар на поверхні.

Розглянуто, зокрема, випадок, коли на поверхню нанесено один по одному два шари двох сторонніх атомів, один з яких (безпосередньо на поверхні) виявляється внаслідок перерозподілу заряду негативно зарядженим, а другий (зовнішній) – позитивно зарядженим. Наявність електричного поля в міжшаровому проміжку призводить до зниження рівня вакуу-

уму поза твердим тілом на величину падіння потенціалу в міжшаровому проміжку (рис.1, а, б). Водночас подвійний шар має товщину порядку міжатомної відстані і тому створений ним бар'єр є тунельно прозорим для електронів, які виходять назовні. Це створює для електронів можливість виходити в вакуум за зниженої роботи виходу, або навіть за від'ємної спорідненості.

Було обговорено застосування розвинутої моделі до систем реальних матеріалів, описаних у літературі (див. напр. [3, 4]), з огляду на перспективність створення нових ефективних катодів. Ці системи включають іони рідкісноземельних елементів (Ce, Gd, Eu), коадсорбовані разом з киснем (іонами O та O<sup>2-</sup>) на поверхнях напівпровідників Si, Ge та металу Mo. Водночас слід зазначити: розгляд у [2] обмежувався випадком, коли поверхнева концентрація адсорбованих різнойменно заряджених іонів кисню та рідкісноземельного металу була однаковою,  $N_s^{(-)} = N_s^{(+)}$  (саме такий випадок зображено на рис.1, б).

Однак у реальних структурах забезпечити з високою точністю рівність  $N_s^{(-)} = N_s^{(+)}$  можливо тільки з використанням складної і витратної технології молекулярно-променевої епітаксії (якщо тільки не йдеться про адсорбацію поверхнею сталих диполів, – випадок максена, термінованого гідроксильними групами OH,



**Рис. 1. а).** Межа поділу між вакуумом і напівпровідником з атомарно чистою поверхнею та електронною спорідненістю  $X_0$ . **б).** Зниження спорідненості під впливом двох нанесених на поверхню напівпровідника різномірно заряджених шарів адсорбату з концентраціями  $N_s^{(-)} = N_s^{(+)}$ . **в).** Поява ОПЗ з вигином зон угору за умови  $N_s^{(-)} > N_s^{(+)}$ . **г).** Поява ОПЗ з вигином зон униз за умови  $N_s^{(-)} < N_s^{(+)}$ .

розглядався в [5, 6]). Використання простіших та доступніших технологій нанесення моношарів (CVD тощо) неминуче призводить до порушення рівності  $N_s^{(-)} = N_s^{(+)}$ . А відхилення концентрації одного адсорбата від другого лише на 0,1% при утворенні моношару призводить до появи поверхневого заряду зі значенням, що за порядком величин відповідає межі Вейца [7]. Це в свою чергу призводить до появи в напівпровіднику області просторового заряду (ОПЗ) й вигину зон, знак якого визначається тим, концентрація адсорбатів якого знаку заряду вища. Такий вигин зон суттєво впливає на величину спорідненості електронів, в одному випадку підвищуючи її, а в другому знижуючи (рис. 1 в, г).

У випадку, коли  $N_s^{(-)} = N_s^{(+)}$  (рис. 1 б), в силу того, що бар'єр міжатомної товщини є тунельно прозорим для електронів, розташованих біля дна зони провідності напівпровідника, зниження спорідненості електрона описується формулою [2]:

$$X = X_0 - e\Phi_d \quad (1)$$

Тут  $X_0$  – спорідненість у матеріалі з атомарно чистою поверхнею без адсорбатів, а падіння потенціалу в проміжку між площинами адсорбатів описується в простій моделі [2] формулою плоского конденсатора

$$\Phi_d = \frac{eN_s d}{\epsilon_0 \epsilon}, \quad (2)$$

де  $N_s \equiv N_s^{(-)} = N_s^{(+)}$ ,  $\epsilon_0$  – діелектрична стала вакууму,  $\epsilon$  – діелектрична проникність проміжку між площинами адсорбатів, ширина якого складає  $d$ .

Проведені в [2] оцінки для значень  $N_s \sim 5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}$ ,  $\epsilon \sim 5$  (ця величина лежить посередині між діелектричною проникністю об'єму напівпровідника  $\epsilon \sim 10$  і діелектричною проникністю вакууму  $\epsilon = 1$ ) і  $d \sim 2 \times 10^{-10} \text{ м}$  дали величину  $\Phi_d \sim 3 \text{ В}$ . Таким чином, зазначений механізм формування подвійного зарядженого шару може призвести до суттєвого зниження

роботи виходу, або й до реалізації від'ємної електронної спорідненості, якщо спорідненість атомарно чистої поверхні є невисокою. Це означає, що електрони можуть залишати таку поверхню навіть без прикладеного зовнішнього електричного поля.

Розглянемо тепер випадок  $N_s^{(-)} > N_s^{(+)}$  (рис. 1 в). Для цього випадку ліва «ефективна обкладинка» конденсатора в формулі (2) вже має заряд, що дорівнює негативному заряду площини адсорбатів мінус позитивний заряд ОПЗ в напівпровіднику, який урівноважує позитивний заряд правої обкладинки. Тому тепер

$$\Phi_d = \frac{eN_s^{(+)}d}{\varepsilon_o\varepsilon}, \quad (3)$$

а сумарному поверхневому заряду адсорбатів з густиною  $e(N_s^{(-)} - N_s^{(+)})$  відповідає протилежний за знаком заряд ОПЗ в напівпровіднику.

Такий заряд обумовлює вигин зон біля поверхні. В наближенні виснаження значення поверхневого потенціалу легко знайти за стандартною процедурою, викладеною в [2], інтегруючи відповідне рівняння Пуассона:

$$\Phi_s = \frac{e(N_s^{(-)} - N_s^{(+)})^2}{2(N_d - N_a)\varepsilon_o\varepsilon_s}. \quad (4)$$

Тут  $N_d, N_a$  – концентрації іонізованих донорів і акцепторів у напівпровіднику,  $\varepsilon_s$  – діелектрична проникність напівпровідника. Формулу (4) одержано для випадку помірного легування, коли рівень Фермі розташований достатньо глибоко в забороненій зоні напівпровідника, і навіть для найбільших вигинів зон все ще застосовне наближення виснаження.

Зазначимо, що ширина ОПЗ в напівпровіднику для стандартних не надто високих рівнів легування (мікрони) на порядки перевищує довжину хвилі де-Бройля теплових електронів (нанометри) [8]. Тому тунелювання електронів з об'єму напівпровідника через бар'єр ОПЗ неможливе, і, як видно з рис. 1 в, у такому випадку

$$X = X_o + e\Phi_s - e\Phi_d. \quad (5)$$

Отже, для випадку  $N_s^{(-)} > N_s^{(+)}$  значення спорідненості виявляється вищим, ніж для випадку  $N_s^{(-)} = N_s^{(+)}$ . З погляду завдання одержання мінімальної роботи виходу це є вочевидь небажаним ефектом.

У протилежному випадку  $N_s^{(-)} < N_s^{(+)}$  сумарний позитивний заряд адсорбатів компенсується утворенням негативно зарядженої ОПЗ в напівпровіднику, яку супроводжує вигин зон униз (рис. 1 г). Для такого випадку формула (3) далі чинна, а формули (4, 5) зазнають очевидної модифікації:

$$\Phi_s = \frac{e(N_s^{(+)} - N_s^{(-)})^2}{2(N_d - N_a)\varepsilon_o\varepsilon_s}, \quad (4a)$$

$$X = X_o - e\Phi_s - e\Phi_d. \quad (5a)$$

Як видно з (5a), для випадку  $N_s^{(-)} < N_s^{(+)}$  значення спорідненості виявляється нижчим, ніж для випадку  $N_s^{(-)} = N_s^{(+)}$ . З погляду завдання одержання поверхні з мінімальною роботою виходу для пристроїв сучасної емісійної електроніки такий ефект є вельми бажаним. Більше того, він підказує технологічний алгоритм для створення такої поверхні: в процесі коадсорбції атомів кисню та металу на поверхню напівпровідника забезпечити переважання концентрації металу.

Оцінимо величину такого ефекту. Підставляючи (3, 4a) до (5a), одержимо:

$$X = X_o - \frac{e^2 N_s^{(+)} d}{\varepsilon_o \varepsilon} \left( 1 + \frac{(N_s^{(+)} - N_s^{(-)})^2 \varepsilon}{2(N_d - N_a) N_s^{(+)} d \varepsilon_s} \right). \quad (6)$$

Звідси видно, що для помірного рівня легування  $N_d - N_a = 10^{22} \text{ м}^{-3}$ , концентрації поверхневого моношару металу  $N_s^{+} \sim 5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}$ , і концентрації кисню в моношарі, всього на 0,1% нижчої від цього значення,  $\varepsilon_s = 10$ ,  $\varepsilon \sim 5$  і  $d \sim 2 \times 10^{-10} \text{ м}$ , одержуємо значення другого доданку в круглих дужках (6) порядку 1. Таким чином, зниження спорідненості, зумовлене вигином зон униз в ОПЗ, робиться того ж порядку величин, що й зниження, зумовлене наявністю подвійно зарядженого шару адсорбатів за умови  $N_s^{(-)} = N_s^{(+)}$ , коли ОПЗ не утворюється. Однак при такому великому вигині зон вико-

ристане нами наближення виснаження перестає бути застосовним (біля поверхні з'являється область інверсної провідності), і формулу (6) можна використовувати тільки для якісної оцінки описуваного ефекту.

Таким чином, нами показано, що наявність на поверхні напівпровідника дипольного шару (напр., з негативно заряджених атомів кисню й позитивно заряджених атомів рідкісноземельного металу) за умови рівності концентрацій різнойменно заряджених адсорбованих атомів  $N_s^{(-)} = N_s^{(+)}$  може призвести до зниження спорідненості на величину до 3 еВ. Асиметрія поверхневих концентрацій кисню і металу може призвести до двох протилежних наслідків: при переважанні негативно зарядженого кисню  $N_s^{(-)} > N_s^{(+)}$  зниження спорідненості робиться меншим через вигин зон угору в ОПЗ напівпровідника, а при переважанні позитивно зарядженого металу  $N_s^{(-)} < N_s^{(+)}$  зниження спорідненості стає більшим через вигин зон униз. Такий результат дозволяє запропонувати технологічні рішення для одержання поверхонь з мінімальною роботою виходу для приладів сучасної емісійної електроніки. Отримана нами формула (6) може використовуватися для чисельного опису ефекту для випадку помірного легування, коли рівень Фермі залишається глибоко в забороненій зоні, і навіть для найбільших вигинів зон залишається справедливим наближення виснаження.

Автори вдячні А. М. Горячку за цінне обговорення.

## Список використаної літератури

[1]. Anatoliy Evtukh, Hans Hartnagel, Oktay Yilmazoglu, Hidenori Mimura and Dimitris Pavlidis. *Vacuum Nanoelectronic Devices: Novel Electron Sources and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd. (2015).

[2]. М. В. Стріха, А. М. Хоріацько. Теоретична модель для опису знизнення роботи виходу напівпровідника/діелектрика під впливом поверхневого подвійного зарядженого шару. *Sens. elektron. mikrosist. tehnol.* 19, No. 3, 23–29 (2022) (in Ukrainian).

[3]. М. Н. Накходкін, М. І. Федорченко. Vzaiemodiiia kysniu ta hadoliniu z Si(100)-2 × 1. Utvorennia systemy z robotoiu vykhodu 1 eV. *UFZh*, 60, 97–103 (2015) (in Ukrainian).

[4]. Т. В. Афанасієва, А. Г. Федорус, А. М. Горіацько et al. Mesoscopic self-ordering in oxygen doped Ce films adsorbed on Mo(112). *Surface Science*, 705, 121766 (2021).

[5]. М. Khazaei, М. Arai, Т. Sasaki, А. Ranjbar, Y. Liang, and S. Yunoki. OH-terminated two-dimensional transition metal carbides and nitrides as ultralow work function materials. *Phys. Rev. B* 92: 075411 (2015).

[6]. М. В. Стріха, Д. В. Антонюк. Теоретична модель для отсинки знизнення роботи виходу максенів з гідроксильною термінацією. *Physics and Chemistry of Solid State*, 23, 102 – 105 (2023) (in Ukrainian).

[7]. V. A. Smyntyna. *Fizyko-khimichni yavyscha na poverkhni tverdykh til*. Odesa: Astroprint (2009) (in Ukrainian).

[8]. Н. Р. Пекка, В. І. Стріха. *Poverkhnevi ta kontaktni yavyscha v napivprovodnykakh*. K.: Lybid (1992) (in Ukrainian).

Стаття надійшла до редакції 22.02.2023 р.



PACS85.30.De, 85.30.Kk, 85.30.Mn  
DOI: 10.18524/1815-7459.2023.1.275941

## THE IMPACT OF ADSORBED MONOLAYERS WITH AN ARBITRARY CONCENTRATION RATIO OF OPPOSITE CHARGES ON THE ELECTRON AFFINITY OF A SEMICONDUCTOR

*M. V. Strikha<sup>1,2</sup>, D. V. Antoniuk<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Radiophysics, Electronics and Computer Systems, pr. Akademika Hlushkova 4g, 03022 Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, pr. Nauky 41, 03028 Kyiv, Ukraine.

E-mail: maksym\_strikha@hotmail.com

### Summary

The constructed simple theoretical model shows that a dipole layer on the semiconductor's surface with the equal concentration of oppositely charged adsorbed atoms (e.g., negatively charged oxygen atoms and positively charged atoms of rare earth metals Ce, Gd, Eu)  $N_s^{(-)} = N_s^{(+)}$ , can decrease the electron affinity by up to 3 eV when two differently charged atomic monolayers are deposited on the surface. The analytical part of this paper demonstrates that the asymmetry in the surface concentration of oxygen and metal can impact the affinity in two ways. When negatively charged oxygen is predominant  $N_s^{(-)} > N_s^{(+)}$ , the affinity's decrease is lower due to upward bending of bands in the sufficiently wide region of the semiconductor's space charge, which is not transparent for tunneling of electrons near the bottom of conduction band. Oppositely, the prevalence of the positively charged metal  $N_s^{(-)} < N_s^{(+)}$  makes the affinity's decrease greater due to the downward bending of the bands, which might be of significantly greater magnitude compared to the case when  $N_s^{(-)} = N_s^{(+)}$ . Such effect is desirable as it suggests a technological algorithm for obtaining a minimal electronic affinity, which is beneficial for creating surfaces with low work function for modern emission electronic devices. The formula obtained in this paper can be applied to describe quantitatively the effect under moderate doping, when the Fermi level stays deeply in the band gap, and even in the cases with the largest band bends, the depletion approximation remains valid.

**Keywords:** semiconductor, work function, electron affinity, adsorbed monolayer, oxygen, metal

PACS85.30.De, 85.30.Kk, 85.30.Mn  
DOI: 10.18524/1815-7459.2023.1.275941

## ВПЛИВ АДСОРБОВАНИХ МОНОШАРІВ З ДОВІЛЬНИМ СПІВВІДНОШЕННЯМ КОНЦЕНТРАЦІЇ РІЗНОЙМЕННИХ ЗАРЯДІВ НА ЕЛЕКТРОННУ СПОРІДНЕНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКА

*М. В. Стріха<sup>1,2</sup>, Д. В. Антонюк<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Київський національний університет ім. Тараса Шевченка,  
факультет радіофізики, електроніки і комп'ютерних систем,  
пр. Глушкова, 4г, Київ, Україна;

<sup>2</sup> Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,  
пр. Науки, 41, Київ, Україна.

E-mail: maksym\_strikha@hotmail.com

### Реферат

У рамках побудованої простої теоретичної моделі показано, що наявність на поверхні напівпровідника дипольного шару (напр., з негативно заряджених атомів кисню O й позитивно заряджених атомів рідкісноземельного металу Ce, Gd, Eu) за умови рівності концентрацій різнойменно заряджених адсорбованих атомів  $N_s^{(-)} = N_s^{(+)}$  може призвести до зниження електронної спорідненості на величину до 3 еВ при нанесенні на поверхню двох різнойменно заряджених атомних моношарів. У рамках здійсненого в цій роботі аналізу продемонстровано, що асиметрія поверхневих концентрацій кисню і металу може призвести до двох протилежних наслідків: при переважанні негативно зарядженого кисню  $N_s^{(-)} > N_s^{(+)}$  зниження спорідненості робиться меншим через вигин зон угору в достатньо широкій області просторового заряду напівпровідника, яка не є тунельно прозорою для електронів поблизу дна зони провідності, а при переважанні позитивно зарядженого металу  $N_s^{(-)} < N_s^{(+)}$  зниження спорідненості стає більшим через вигин зон униз, і цей додатковий ефект може виявитися істотнішим за зменшення спорідненості для випадку  $N_s^{(-)} = N_s^{(+)}$ . Такий результат є вельми бажаним з огляду перспективи створення поверхонь з низькою роботою виходу для сучасних пристроїв емісійної електроніки, бо підказує технологічний алгоритм для одержання мінімальної електронної спорідненості. Отримана нами формула може використовуватися для чисельного опису ефекту для випадку помірного легування, коли рівень Фермі залишається глибоко в забороненій зоні, і навіть для найбільших вигинів зон залишається справедливим наближення виснаження.

**Ключові слова:** напівпровідник, робота виходу, електронна спорідненість, адсорбований моношар, кисень, метал

# ПРОЕКТУВАННЯ І МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЕНСОРІВ

---

## SENSORS DESIGN AND MATHEMATICAL MODELING

---

---

УДК 621.37/39:534

DOI: 10.18524/1815-7459.2023.1.275943

### ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ І ВАГОВИХ ФУНКЦІЙ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ТОПОЛОГІЇ ЗУСТРІЧНО- ШТИРЬОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ

*Я. І. Леніх*

Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України  
при ОНУ ім. І. І. Мечникова  
Email: ndl\_lepikh@onu.edu.ua

### ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ І ВАГОВИХ ФУНКЦІЙ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ТОПОЛОГІЇ ЗУСТРІЧНО- ШТИРЬОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ

*Я. І. Леніх*

**Анотація.** Стаття присвячена аналізу існуючих фізико-математичних моделей, що описують роботу зустрічно-штирєвих перетворювачів (ЗШП) поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) Релея, які широко застосовуються в акустоелектроніці при створенні мікроелектронних пристроїв різного функціонального призначення. Аналізуються також вагові функції, за допомогою яких коригується топологія ЗШП з метою зменшення впливу пульсацій Гіббса.

Розглянуті також переваги і недоліки кожної з фізико-математичних моделей, а також вагові функції з позицій досягнення заданих вимог до характеристик пристроїв на ПАХ.

**Ключові слова:** пристрої на поверхневих акустичних хвилях, фізико-математичні моделі, вагові функції

## DETERMINATION OF THE OPTIMAL PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODEL AND WEIGHT FUNCTIONS FOR CALCULATING THE TOPOLOGY OF COUNTERPINE CONVERTERS OF SURFACE ACOUSTIC WAVES

*Ya. I. Lepikh*

**Abstract.** The article is devoted to the analysis of existing physical and mathematical models describing the operation of Rayleigh's counter-pin converters of surface acoustic waves (SAW), which are widely used in acoustoelectronics in the creation of microelectronic devices of various functional purposes. The weighting functions are also analyzed, with the help of which the topology of the counter-pin converters is adjusted in order to reduce the influence of Gibbs pulsations.

The advantages and disadvantages of each of the physical and mathematical models, as well as weighting functions from the point of view of achieving the specified requirements for the characteristics of devices on the characteristic curve, are also considered.

**Keywords:** devices on surface acoustic waves, physical and mathematical models, weight functions

### Вступ

Пристрій на ПАХ класичної структури вважається повністю описаним, коли точно визначена його передатна або імпульсна характеристика. Ці характеристики залежать від структури пристрою основними елементами якого є перетворювач ПАХ – топології ЗШП, які і визначають передатну і пов'язану з нею через перетворення Фур'є імпульсну характеристику, а також від електрофізичних і акустичних параметрів п'єзоелектричного звукопроводу [1–2].

Зазначимо, що точного і послідовного математичного опису роботи ЗШП не знайдено через складність врахування вторинних ефектів, що супроводжують генерацію і поширення ПАХ в п'єзоелектриках, особливо в анізотропних: взаємодія електродів ЗШП між собою, генерація паразитних об'ємних мод, регенерація, дифракція, дисперсія, крайові ефекти, різниці швидкості ПАХ на вільній і металізованій поверхні звукопроводу та ін.

Більшість фізико-математичних моделей, що описують генерацію, поширення і детектування ПАХ базуються на представленні пристрою на ПАХ з ЗШП у вигляді трансверсального фільтра [1,3–7].

Розглянемо цю задачу на прикладі звукопроводу з монокристалічного матеріалу і двох еквідистантних ЗШП, один з яких апоподизований – другий неапоподизований.

На основі вказаного вище представлення ЗШП у вигляді пристрою з дискретизованою імпульсною характеристикою в роботі здійснено системний аналіз різних фізико-математичних моделей, що описують роботу ЗШП, з метою вибору їх для синтезу пристрою на ПАХ того чи іншого функціонального призначення з заданою точністю необхідних характеристик з оптимізацією в залежності від електрофізичних параметрів (ЕФП) і акустичних характеристик п'єзоелектричних звукопроводів.

### Аналіз фізико-математичних моделей ЗШП

Модель еквівалентних схем описує ЗШП у вигляді каскадного з'єднання шести-полюсників (еквівалентних схем Мезона для перетворювачів об'ємних акустичних хвиль (ОАХ) з поперечним полем) з двома акустичними і одним електричним входами. Ця модель дозволяє розрахувати передатну функцію перетворювача з врахуванням електричного навантаження, визначити його вхідну провідність, оцінити електричну взаємодію електродів ЗШП і рівень відбитих сигналів. Однак при розробці цієї моделі передбачалось, що вона не являється точним відображенням реальних фізичних процесів в ЗШП.

Для випадку коли ширина електрода  $a_n$  дорівнює проміжку між ними  $b_n$  і дорівнює

ють половині довжини ПАХ  $\lambda_n$ , кожний основний елемент моделі складається з пари двох  $\delta$ -функцій

$$Q_{e.l.n}(t) = \sqrt{\omega/\omega_0} \left[ \delta \left( t + \frac{\pi}{2\omega_n} \right) - \delta \left( t - \frac{\pi}{2\omega_n} \right) \right] \quad (1)$$

зі спектром

$$A_{e.l.n}(\omega) = i2\sqrt{\omega/\omega_0} \sin\left(\frac{\pi}{2}\omega/\omega_n\right), \quad (2)$$

де  $\omega_0$  – центральна частота.

Ця модель свідчить про свою ефективність не стільки для синтезу пристроїв на ПАХ скільки для їх аналізу. Крім того, вона більш придатна при використанні в якості звукопроводів пристроїв сильних п'єзоелектриків.

**Імпульсна модель.** У відповідності до неї для періодичного ЗШП визначається положення нулів його імпульсної характеристики у вигляді модульованої по амплітуді синусоїдальної хвилі в центрах проміжків між електродами

$$h(t) = 4k_s \sqrt{C_s W_0} (\omega_0/2\pi)^{3/2} h_0 t \sin(\omega_0 t), \quad (3)$$

де  $h_0(t)$  – функція перекриття електродів  $e(t) = y_n W_0$  в момент часу  $t_n$  відповідним центром електродів,  $W_0$  – максимальна довжина електрода. Таким чином, структура ЗШП являється просторовим відображенням його імпульсної характеристики.

В цій моделі має місце залежність  $h(t)$  від частоти у вигляді  $\omega_n^{3/2}$ , яка отримана з закону збереження енергії і масштабного множника. Кінцева формула для розрахунку перекриття електродів ЗШП  $e(t_n)$  має вигляд

$$e(t_n) = y_n/W_0 \approx h(t_n)/(\omega_n/\omega_0)^{3/2}. \quad (4)$$

Ця модель дозволяє розрахувати передатну функцію і топологію ЗШП зі зважуванням довжини і періоду розстановки електродів і врахувати ефект електричного навантаження.

Модель дозволяє досягти результатів порівняних з результатами моделі еквівалентних схем при менших затратах на обчислення, однак також більше підходить не для синтезу пристроїв на ПАХ, а для їх аналізу і не відображає належним чином дійсних механізмів

перетворення акустичних і електричних сигналів.

**Модель  $\delta$ -функцій (джерел).** У цій моделі враховується розподілення електричних полів в ЗШП (рис. 1). При цьому  $\delta$ -функції розташовуються на краях електродів і описують неоднорідність тангенційної складової електричного поля між електродами, але на зовнішніх краях ЗШП  $\delta$ -функції відсутні. Вважалося, що ця модель точно відображає фізичний зміст аналогової вибірки при своїй простоті. Але практика її застосування показала, що вона дає добрі результати головним чином для слабких п'єзоелектриків в межах центральної частоти, а для гармонік вона є неточною.

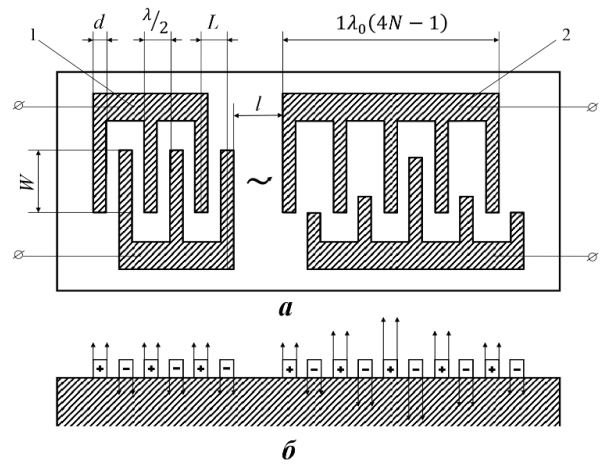


Рис. 1. Конструкція пристрою на ПАХ, що містить аподизований і неаподизований ЗШП – а, схема моделі  $\delta$ -джерел ЗШП- б.

**Модифікована модель  $\delta$ -функції,** зберігає її позитивні властивості і дозволяє більш точно врахувати фізичні процеси в ЗШП. Для цього на основі об'єднання в пари і перегрупування  $\delta$ -функцій в модель введена акустична функція вибірки виду

$$a_{e.l.n}(t) = \sqrt{\omega_n/\omega_0} e^{i\omega_n t} \left[ \delta \left( t + \frac{\pi d_n}{2\omega_n} \right) + \delta \left( t - \frac{\pi d_n}{2\omega_n} \right) \right]. \quad (5)$$

Основним недоліком модифікованої моделі  $\delta$ -функцій являється неможливість врахування реального розподілу поля на краях ЗШП, що обмежує застосування моделі для секціонованих або зважуваних розстановкою електродів ЗШП.

Для пристрою на ПАХ з аподизованим і неаподизованим ЗШП (рис.1) і вибраного в якості звукопровода монокристалічного п'єзокварца  $\text{SiO}_2$  – STзрізу, що відноситься до слабких п'єзоелектриків, але з високою стабільністю електрофізичних і акустичних параметрів і малим впливом вторинних ефектів на основні характеристики сенсора, модель  $\delta$ -функцій є оптимальною.

В цій моделі допускається, що при генерації ЗШП електричною напругою його електроди являються дискретними джерелами акустичної енергії, що описується  $\delta$ -функціями, заданими на краях кожного електрода. З кожного електрода випромінюється плоска хвиля, що поширюється вздовж нормалі до краю електрода. Амплітуда  $a_n$   $\delta$ -функцій пропорційна електричному заряду, що визначається ступенем перекриття електродів і ЕФП п'єзоелектрика, а хвиля на виході випромінюючого ЗШП є суперпозицією плоских хвиль, які генеруються кожним  $\delta$ -джерелом і слідує з затримкою  $T_0$ . Сигнал же на виході приймального ЗШП представляється сумою сигналів, що виникають в результаті проходження всіх зазначених хвиль повз кожного з його електродів, які в цьому випадку являються дискретними детекторами ПАХ і діють як відводи трансверсального фільтра, який являється нерекурсивним цифровим фільтром.

Амплітудне зважування електродів ЗШП, як відводів трансверсального фільтра легко здійснюється аподизацією, тобто ефективність відводів визначається тією частотою падаючої хвилі, яка пересікає електроди, що перекриваються.

Як зазначено вище, передатна характеристика пристрою на ПАХ при його синтезі знаходиться з імпульсної характеристики, яка відповідає структурі ЗШП. В задачу синтезу пристрою на ПАХ входить розрахунок вибраної структури ЗШП по заданій передаточній АЧХ. При розрахунку на основі моделі  $\delta$ -функцій АЧХ зв'язана з імпульсною характеристикою відповідною до структури ЗШП через Фур'є-перетворення.

Частіше за все необхідно отримати пристрій на ПАХ з АЧХ близькою до прямокутної у вигляді

$$H(f) = \begin{cases} h(t), & \text{при } |f| \leq \frac{\Delta f}{2} \\ 0 & \text{при } |f| > \frac{\Delta f}{2} \end{cases} \quad (6)$$

Імпульсний відгук для такої функції отримаємо через Фур'є-перетворення

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H(f) \exp(i2\pi ft) dt \quad (7)$$

буде мати вигляд залежності  $(\sin x)/x$  (рис. 2).

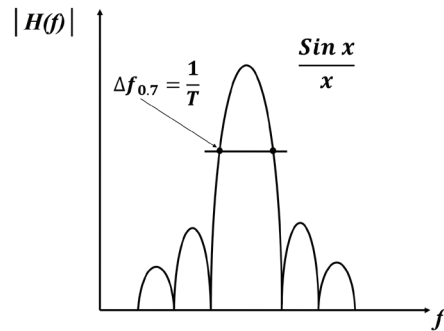


Рис. 2. Імпульсний відгук в моделі  $\delta$ -функцій.

Функція, що описує ступінь перекриття електродів аподизованого ЗШП, яка називається функцією анодизації, буде мати такий же вигляд. При цьому розподіл джерел по амплітуді буде відповідати довжині кожної пари електродів, що визначається квантуванням імпульсної характеристики по закону

$$a_n = (-1)^n h(nT), \quad (8)$$

а фаза джерел визначається розташуванням на поверхні звукопровода в точках  $nT$ , де  $T=1/2f_0$ . Множник  $(-1)^n$  вказує на перемену полярності електродів, що відповідає нулям Фур'є-образу. Оскільки фізично реалізувати ЗШП у вигляді (7) неможливо, бо границі інтегрування в реальності обмежуються, що і відповідає обмеженості протяжності ЗШП. Наслідком такого обмеження є виникнення пульсацій АЧХ і ФЧХ, які отримали назву пульсацій Гіббса.

Одним із способів зменшення величини цих пульсацій є використання додаткової аподизації ЗШП «ваговою» функцією, або функцією «вікна». Ваговою є симетрична відносно центральної частоти функція, що плавно зменшується до країв перетворювача. Згортка основної функції з ваговою дозволяє отримати

кращу вибірковість і зменшення бокових пелюсток імпульсної характеристики, а також дає аналітичну залежність між цими параметрами. Вибір тої чи іншої вагової функції обумовлюється вимогами, що ставляться до характеристик пристрою.

В даний час відомо і використовується значне число різних вагових функцій.

Функція Кайзера має вигляд

$$W(t) = \begin{cases} \frac{I_0[\omega_\alpha \sqrt{\tau^2 - t^2}]}{I_0(\omega_\alpha \tau)}, & \text{при } |t| < \tau, \\ 0, & \text{при } |t| > \tau \end{cases}, \quad (9)$$

де  $I_0$  – модифікована функція Бесселя першого роду нульового порядку;

$2\tau$  – тривалість імпульсного відгуку;

$r = \omega_\alpha \tau$  – параметр, пов'язаний з шириною основної пелюстки функції згортки;

$\omega_\alpha = K_1 B$  – кратне полосі пропускання і вибирається з врахуванням необхідного рівня подавлення бокових пелюсток;

$\tau = \frac{K_2}{B}$  – кратна декільком значенням зворотної полоси

$K_1$  і  $K_2$  – постійні коефіцієнти.

Достоїнством функції Кайзера є забезпеченість мінімального рівня бокових пелюсток до 80 дБ. До недоліків слід віднести неоднозначність в визначенні коефіцієнтів «вікна» і висока чутливість АЧХ до технологічних похибок відтворення коефіцієнтів аподизації.

Функція Дольфа-Чебишева має вигляд

$$W(f) = \begin{cases} \gamma I_1(N\gamma\alpha) & , \quad -2f_0\tau < N < 2f_0\tau \\ \left[ \frac{ch(2\gamma_0)+1}{2} \right]^{\tau/T_0}, & N \geq 2f_0\tau \end{cases}, \quad (10)$$

де  $I_1$  – модифікована функція Бесселя першого роду першого порядку;

$$\gamma = [1 - (N/2f_0\tau)^2]^{1/2}; \quad \alpha = \cos^{-1} \left[ \frac{3 - ch(2\gamma_0)}{1 - ch(2\gamma_0)} \right];$$

$N = 2f_0T$  – число електродів ЗШП відповідне дискретизації імпульсного відгуку в будь-який бік від його центра;

$N = \sqrt{\pi/4K_p^2}$  – оптимальна кількість електродів ЗШП;  $\gamma_0 = \frac{ch^{-1}R}{2(2N)}$ ;

$R$  – відношення амплітуд основного і бокового пелюсток.

Функція Дольфа-Чебишева забезпечує мінімальну ширину перехідної смуги при заданому рівні бокових пелюсток, що важливо для частотно-часових селективних пристроїв, однак має ті ж недоліки, що і функція Кайзера і, крім того, у неї досить складний для розрахунку вигляд.

Широке застосування отримала вагова функція у вигляді квадрата косинуса на п'єдесталі

$$h(t) = \left[ k + (1 - k) \cos^2 \frac{\pi t}{2\tau} \right] [U_{-1}(t + \tau) - U_1(t - \tau)], \quad (11)$$

де  $U_{-1}$  – одинична сходинка,  $\tau$  – тривалість імпульсного відгуку секції ЗШП.

При  $k=0,08$  відома як функція Хеммінга. Значне придушення бокової пелюстки досягається при коефіцієнті  $k=0,54$ .

Функція Хеммінга є досить простою в реалізації і дає тим кращі результати, чим більша протяжність перетворювача (при  $T=102\lambda$  придушення бокових пелюсток перевищує 40 дБ). Недоліком цієї функції є низька ефективність при малому числі електродів ЗШП.

Значне придушення сигналу в полосі затримки забезпечує функція Блекмана:

$$h(t) = 0,42 + 0,5 \cos\left(\frac{\pi t}{\tau}\right) + 0,08 \cos\left(2\pi \frac{t}{\tau}\right), \quad -\tau \leq t \leq \tau. \quad (12)$$

В деяких випадках буває зручно використовувати більш просту функцію, наприклад, функцію Фейсра:

$$h(t) = \begin{cases} 1 - 2t/T, & |t| \leq 0,5T \\ 0, & |t| > 0,5T \end{cases}, \quad (13)$$

де  $T$  – період дискретизації імпульсного відгуку,

або функцію Ланцоша:

$$h(t) = \begin{cases} \sin c\left(\frac{\pi t}{T}\right), & |t| < 0,5T \\ 0, & |t| \geq 0,5T \end{cases}, \quad (14)$$

де  $c = \frac{\sin x}{x}$ .

Обидві останні функції забезпечують незначне збільшення затухання в смузі затримання, але при цьому погіршують коефіцієнт прямокутності.

На практиці інколи виникає необхідність синтезу пристрою на ПАХ з перехідною характеристикою  $H(\omega)$ , що відрізняється від прямокутної. Наприклад, для забезпечення мінімальних спотворень радіоімпульса оптимальною АЧХ  $H(\omega)$  є характеристика вигляду функції Гаусса:

$$|H(\omega)| = 2A\sqrt{\pi/\alpha} \exp[-(\omega - \omega_0)^2/4\alpha], \quad (15)$$

де  $\alpha$  – параметр зв'язаний з розладом  $\Delta f$ , що відповідає ослабленню сигналу в  $\alpha$  разів співвідношенням

$$\Delta f = (2/\pi)\sqrt{\alpha \ln d},$$

де  $d = \lambda/2$ .

Гаусовій  $H(\omega)$  відповідає імпульсний відгук вигляду

$$h(t) = A \exp(-at^2), \quad -\infty < t < +\infty. \quad (16)$$

Окрім наведених вище використовуються також інші функції, наприклад Вейерштрасса, Діріхле, але значно рідше.

Слід зазначити, що функції Хеммінга, Фейера і Гаусса дозволяють досягнути мінімальної нерівномірності  $H(\omega)$  ( $< 0,5$  дБ) в полосі пропускання, що в багатьох випадках задовольняє задані вимоги.

Оптимальними з точки зору придушення бокових пелюсток і мінімальної перехідної полоси являються функції Кайзера і Дольфа-Чебишева. Всі вагові функції (крім функцій Фейера) не вносять значних втрат сигнаду в полосі пропускання.

Слід зазначити, що фізичного обґрунтування вибору тої чи іншої віконної (вагової) функції немає. Тобто можна стверджувати про їх емпіричний вибір, а не застосування як таких, що враховують фізико-математичні особливості роботи ЗШП в наслідок його обмеженості і дискретності. Тому, при симетричній відносно центральної частини АЧХ  $H(\omega)$ , ваговою (віконною) функцією може бути будь-яка функція, що монотонно спадає від центра ЗШП до країв і на краях дорівнює нулю.

Виходячи з цього ми отримали і дослідили вагову функцію, що враховує дискретність

і обмеженість імпульсної характеристики [8] у вигляді

$$|H(\omega)| = \left| \frac{1 + 2 \sum_{k=1}^{n-1} W_{n-k} \cos \frac{\omega}{\omega_0}}{1 + 2 \sum_{k=1}^{n-1} W_{n-k} \cos k\pi} \right|, \quad (17)$$

де  $W_{n-k}$  – коефіцієнт аподизації в  $k$ -й точці дискретизації;

$n$  – число електродів розташованих з кожної сторони від центрального;

$k$  – поточний номер електрода ЗШП.

Використання віконної функції (17) для аподизації ЗШП дозволяє досягнути суттєво кращих результатів по затуханню сигналу за полосою пропускання на 5 дБ і по зниженню бокових пелюсток на 7 дБ краще ніж, наприклад, по функції Кайзера при менших затратах на обчислення.

В описаних методах розрахунку пристроїв на ПАХ передбачалось, що один ЗШП широкосмуговий і він не впливає на загальну  $H(\omega)$ . Якщо ж неаподизований ЗШП недостатньо широкосмуговий і відбувається завал  $H(\omega)$  пристрою на краях смуги пропускання, то необхідно розраховувати пристрій з врахуванням неаподизованого перетворювача.  $H(\omega)$  в цьому випадку визначається добутком передатних характеристик обох перетворювачів:

$$H(\omega) = H_1(\omega) H_2(\omega), \quad (18)$$

де  $H_1(\omega)$  і  $H_2(\omega)$  – передатні характеристики аподизованого і неаподизованого перетворювачів.

Відповідно при цьому імпульсна характеристика пристрою визначається згортокою імпульсних характеристик ЗШП

$$h(t) = \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} h_1(m) h_2(n - m), \quad (19)$$

де  $n = 0, 1, \dots, m-1$ .

Для випадку найбільш поширених до пристроїв на ПАХ вимог мати прямокутну  $H(\omega)$  з придушенням бокових пелюсток не менше 40 дБ і високою стабільністю характеристик оптимальним є звукопровід з п'єзоелектричного матеріалу –  $\text{SiO}_2$  ST-зрізу та синтезовані за фізико-математичною моделлю  $\delta$ -функцій зі структурою з двох ЗШП – аподизованого і неаподизованого.



Для зменшення ефектів, викликаних необхідністю обмежувати в часі імпульсну характеристику (пульсації Гіббса), оптимальною є вагова функція Хеммінга.

Для розрахунку ЗШП вхідними даними програми є:  $v$  – швидкість поширення ПАХ,  $k_p^2$  – коефіцієнт електромеханічного зв'язку п'єзоелектричного матеріалу звукопроводу,  $L_0$  – початкове значення апертури ЗШП,  $R_0$  – необхідний опір випромінювання,  $\epsilon$  – діелектрична проникність матеріалу звукопроводу,

$f_0$  – центральна частота,  $B$  – смуга пропускання пристрою на ПАХ,  $B_1$  – перехідна смуга,  $p$  – рівень бокових пелюсток. Оптимізація  $H(\omega)$  здійснюється з врахуванням запасу немінучих технологічних похибок і вторинних ефектів шляхом варіації коефіцієнтів вагової функції до отримання заданих  $H(\omega)$  і  $p$  для обраної структури ЗШП. Коли при оптимізації отримані необхідні електричні характеристики, програма приступає до розрахунку топології ЗШП виду, наприклад, представленому на рис. 3.

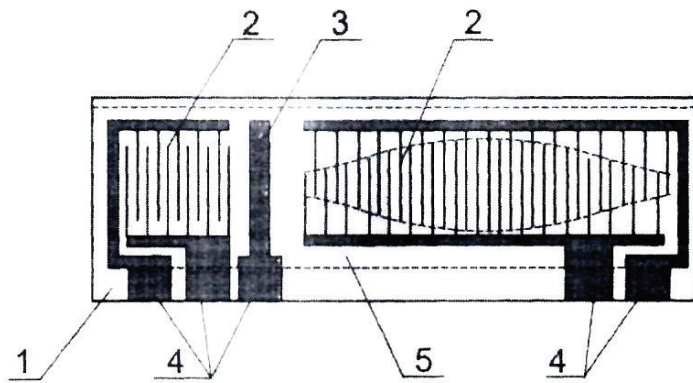


Рис. 3. Топологія розрахованого аподизованого ЗШП. 1- п'єзоелектричний звукопровід, 2 – ЗШП, 3 – плівковий електричний екран, 4 – електричні виводи, 5 – пристрій в цілому.

На рис. 4 представлені розрахована і експериментальна характеристики  $H(\omega)$  (АЧХ).

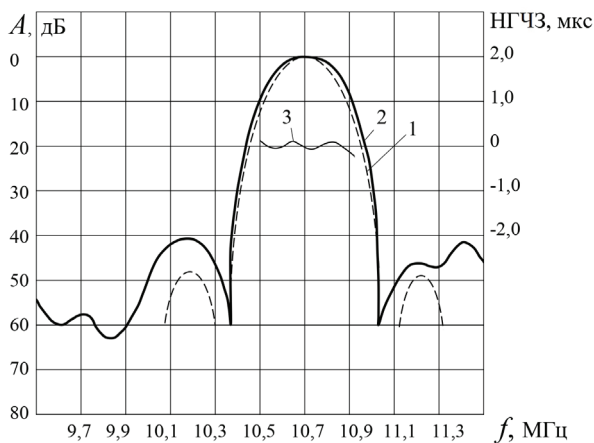


Рис. 4. Розрахована і експериментальна характеристика  $H(\omega)$  (АЧХ). 1 – розрахована АЧХ, 2 – експериментальна АЧХ, 3 – НГЧЗ (нерівномірність групового часу затримки).

### Висновки

На основі проведеного системного аналізу різних фізико-математичних моделей, що описують роботу ЗШП ПАХ, як пристрою з дискретизованою імпульсною характеристикою, оптимальною може вважатися модель яка найбільше враховує вторинні ефекти, що супроводжують генерацію і поширення ПАХ в п'єзоелектричних звукопроводах, залежних від топології ЗШП, ЕФП і акустичних характеристик п'єзоелектрика.

Такою, зокрема, є модель еквівалентних схем для випадку застосування при необхідності сильних п'єзоелектриків, наприклад,  $\text{LiNbO}_3$  з високими значеннями  $K_p^2$ ,  $\epsilon$ .

Для звукопроводу зі слабких п'єзоелектриків, наприклад  $\text{SiO}_2$ , оптимальною може бути модель  $\delta$ -функцій.

В одному і другому випадку оптимальними можуть вважатися відповідно вагові функції Кайзера і функція Хеммінга.

Отримані результати можуть бути корисними при створенні акустoeлектронних пристроїв на ПАХ різного функціонального призначення.

### Список використаної літератури:

[1]. Lepikh Ya. I., Kalashnikov A. N., Litvinov V. F., Nazarenko A. F. Comparative analysis of AFR of the Butterworth LC-filters and of the SAW-filters with regard to technological factors // By Allerton Press. Inc. 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923.–1996.–P. 37–40

[2]. Lepikh Ya. I., Lienkov S. V., Mokrytskyi V. A., Seliukov O. V., Smyntyna V. A. Napivprovodnykovi ta akustoelektronni optychni sensory i systemy // Monohrafiia. Odesa: Astroprint,–2009.–275 s. (in Ukrainian).

[3]. Morgan D. Surface acoustic wave filters with applications to electronics communications and signal processing// Elsevier, 2007,– 448 p.

[4]. Hasimoto K. -Y., Omori T., Yamaguchi M. Analysis of SAV excitation and propagation

under periodic metallic grating structures// Int. J of High Speed Electronics and Systems.– 2000.– V. 10, N3.– P. 686–734.

[5]. Finger N., Kovacs G., Shoberl S., Langer U. Accurate FFM/BEM-simulation of surface acoustic wave filters// IEEE Ultras. Symp.– 2003.– P. 1680–1685.

[6]. Frommelt T., Gogel D., Koctur M. et al. Flow patterns and transport in Rayleigh surface acoustic wave streaming: combined finite element method and ray tracing numeric versus and experimental validation// IEEE Ultras. Symp.– 2008.– P. 1932–1935.

[7]. Lepikh Ya. I. Acoustoelectronic devices with controlled characteristics// «Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics» (UkrMiCo), Odesa, Ukraine, 201, 11–15 Sept. 2017, International Conference.

[8]. Lepikh Ya. I. Vesovaya funkciya, uchityvayushchaya diskretizatsiyu i ogranichenost' impul'snoj harakteristiki fil'trov na poverhnostnyh akusticheskikh volnah// Radioelektronika ta informatika.– 2000.– No 1.– S. 4–8 (in Russian).

Стаття надійшла до редакції 09.03.2023 р.

UDC621.37/39:534

DOI: 10.18524/1815-7459.2023.1.275943

## DETERMINATION OF THE OPTIMAL PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODEL AND WEIGHT FUNCTIONS FOR CALCULATING THE TOPOLOGY OF COUNTERPINE CONVERTERS OF SURFACE ACOUSTIC WAVES

*Ya. I. Lepikh*

Interdepartmental scientific-educational physics and technical center of MES and NAS of Ukraine at Odesa I. I. Mechnikov National University  
Email: ndl\_lepikh@onu.edu.ua

### Summary

The article is devoted to the analysis of existing physical and mathematical models describing the operation of Rayleigh's counter-pin converters of surface acoustic waves (SAW), which are widely used in acoustoelectronics in the creation of microelectronic devices of various functional purposes. Analyzing also the weighting functions with the help of which the topology of the counter-pin converters is adjusted in order to reduce the influence of Gibbs pulsations.

The advantages and disadvantages of each of the physical and mathematical models, as well as weighting functions from the point of view of achieving the specified requirements for the characteristics of devices on the characteristic curve, are also considered.

The possibility of optimal use of a specific model of the weight function, taking into account the electro-physical and acoustic characteristics of the piezoelectric material, is shown on the example of a specific monocrystalline piezoelectric material of the sound pipe for the classical structure of the counter-pin converters.

**Keywords:** devices on surface acoustic waves, physical and mathematical models, weight functions

УДК 621.37/39:534

DOI: 10.18524/1815-7459.2023.1.275943

## **ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ І ВАГОВИХ ФУНКЦІЙ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ТОПОЛОГІЇ ЗУСТРІЧНО- ШТИРЬОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ**

*Я.І. Леніх*

Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України  
при ОНУ ім. І.І. Мечникова  
Email: ndl\_lepikh@onu.edu.ua

### **Реферат**

Стаття присвячена аналізу існуючих фізико-математичних моделей, що описують роботу зустрічно-штирєвих перетворювачів (ЗШП) поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) Релея, які широко застосовуються в акустoeлектроніці при створенні мікроелектронних пристроїв різного функціонального призначення. Розглянуто вагові функції за допомогою яких коригується топологія ЗШП з метою зменшення впливу пульсацій Гіббса.

Розглянуто також переваги і недоліки кожної з фізико-математичних моделей, а також вагових функцій з позицій досягнення заданих вимог до характеристик пристроїв на ПАХ.

На прикладі конкретного монокристалічного п'єзоелектричного матеріалу звукопроводу для класичної структури ЗШП показана можливість оптимального використання певної моделі вагової функції з врахуванням електро-фізичних і акустичних характеристик п'єзоелектричного матеріалу.

**Ключові слова:** пристрої на поверхневих акустичних хвилях, фізико-математичні моделі, вагові функції

# ХІМІЧНІ СЕНСОРИ

---

## CHEMICAL SENSORS

---

---

PACS: 72.20.Dp, UDC 536.4

DOI: 10.18524/1815-7459.2023.1.275944

### ПРО МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОХІМІЧНИХ ГАЗОАНАЛІЗАТОРІВ В БАГАТОКОМПОНЕНТНІЙ СУМІШІ

*О. С. Черненко, В. В. Калінчак, М. В. Розізнаний, О. К. Копійка*

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова  
teplophys@onu.edu.ua

### ПРО МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОХІМІЧНИХ ГАЗОАНАЛІЗАТОРІВ В БАГАТОКОМПОНЕНТНІЙ СУМІШІ

*О. С. Черненко, В. В. Калінчак, М. В. Розізнаний, О. К. Копійка*

**Анотація.** В роботі описано метод пошуку кінетичних параметрів гетерогенно-каталітичних реакцій окислення малих домішок горючого газу в повітрі на тонкому платиновому дроті. Він полягає в отриманні з вольт-амперної характеристики дроту залежності критичних значень струму, що відповідають каталітичному займанню та погасанню домішки газу, від її масової частки в повітрі.

Запропоновано методику визначення вмісту двох горючих газів в повітрі на основі обробки вольт-амперної характеристики платинового дроту. В залежності від рівня сумарної концентрації газів в повітрі визначальними експериментальними характеристиками є не лише перегрів дроту (каталізатора) відносно інертного дроту в умовах каталітичного займання, але і перегрів дроту при каталітичному погасанні або в умовах само підтримуючого каталітичного горіння (без нагріву електричним струмом).

**Ключові слова:** газоаналізатор, каталізатор, багатокомпонентна суміш, займання, згасання

### ABOUT THE POSSIBILITY OF USING THERMOCHEMICAL GAS ANALYZERS IN A MULTICOMPONENT MIXTURE

*A. S. Chernenko, V. V. Kalinchak, M. V. Roziznany, A. K. Kopyka*

**Abstract.** Kinetic parameters finding's method of heterogeneous catalytic oxidation reactions of combustible gas's small impurities in air on a thin platinum wire was described.

It consists in obtaining from the wire's current-voltage characteristic the dependence of the critical current values on its mass fraction in air. They corresponding to the catalytic ignition and extinction of the gas impurity.

A method of determining the content of two combustible gases in the air, what based on processing the platinum wire's current-voltage characteristic, was proposed. Depending on the level of the total gases concentration in the air, the determining experimental characteristics are not only the wire (catalyst) overheating relative to the inert wire under the conditions of catalytic ignition, but also the wire overheating during catalytic extinguishing or under conditions of self-sustaining catalytic combustion (without electric current heating).

**Keywords:** gas analyzer, catalyst, multicomponent mixture, ignition, extinction

**Вступ.** Чисті метали, особливо платина, є найбільш поширеними каталізаторами окислення летючих органічних сполук. Часто на поверхню оксидного каталізатора додають наночастинки платини, що значно прискорює окислення сполуки [1–4]. Платина є каталізатором повного окислення органічних парів чи газів, тобто одним і продуктів згорання являється  $\text{CO}_2$  [4]. При цьому авторами [4] вводиться поняття низьких температурах (до  $300\text{ }^\circ\text{C}$ ) для такого процесу.

Платина є найбільш раннім каталізатором для однокомпонентного каталізу в реакції окислення етанолу [5, 6]. Автори [5] вказують що таке окислення може бути повним (при повільному окисленні) до  $\text{CO}_2$  та частковим до оцтового альдегіду чи кислоти.

Автори [7] вказують на високий відсоток (вище 90%) утворення  $\text{CO}_2$  при окисленні метанолу та етанолу на платиновому каталізаторі. Вивчаючи зміну концентрації метанолу та етанолу, яка експоненціально зменшувалася в часі при каталітичному окисленні з киснем на платиновому каталізаторі при кімнатних температурах знайдені енергії активації цих реакцій. Зокрема для етанолу  $E = 143\text{ кДж/моль}$ .

Дослідження гетерогенного окислення горючих газів на довгій та тонкій дротині з металів платинової групи, що нагрівається електричним струмом, продовжуються і в наш час [8]. Для виникнення стійкого безполум'яного каталітичного горіння газу при нагріванні силою струму каталізатора необхідний правильний вибір діаметру і довжини каталізатора, діапазону концентрацій горючого газу, температури та швидкості газоповітряного потоку [9].

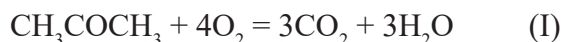
Призначення газоаналізатора зрозуміло з назви приладу: визначення наявності концентрації газів. Випускаються газоаналізатори як одного газу (детектори кисню, датчики витоку), так і більш складні моделі, здатні фіксувати склад газової суміші, процентне співвідношення компонентів, температуру і тиск газового потоку. В залежності від поставлених завдань можуть використовуватися як окремі газоаналізатори системи газового контролю, що об'єднують потрібну кількість приладів. При виборі того чи іншого газоаналізатора можна опиратися на різні критерії, але критично важливо підібрати відповідний для поставленої задачі принцип вимірювання, керуючись типом газу, що вимірюється, середовищем, в якій виконуються вимірювання, і метою.

До недоліків термохімічних газоаналізаторів відносяться обмежений діапазон вимірювань; відсутність селективності; обмежений термін служби, низька швидкодія і чутливість; зменшення чутливості з плином часу. В даній роботі буде запропоновано метод, що дозволить спробувати вирішити проблеми селективності такого типу газоаналізатору.

**Метою даної роботи** є дослідження неізотермічного окислення (горіння) малих домішок **ацетону, етанолу та ізопропанолу** в повітрі на **платиновому** дроті, аналіз критичних умов каталітичного займання і погасання, оцінка кінетичних параметрів реакцій окислення в повітрі, а також встановлення оптимальних параметрів системи, в межах яких можна визначати концентрації газових домішок в суміші газів.

З огляду на вищевказане в даній роботі приймалося, що каталітичне горіння ацетону,

етанолу та ізопропанолу в повітрі на платиновій нитці є повним окислення і протікає по реакціям:



Тепловий ефект реакції (I) 1829.4 кДж/моль, (II) 1370 кДж/моль, (III) 2046 кДж/моль.

**1. Експериментальна установка.** Для експериментального дослідження окислення органічних парів був узятий і перероблений перетворювач манометричний термопарний ПМТ-2 (рис.1). В ньому в якості нагрівача ви-

користується платиновий дріт (діаметром  $d = 95$  мкм і довжиною  $L = 56$  мм), який був зігнутий у вигляді змійки і розміщений в площині, перпендикулярній осі лампи. Колба розташовувалася вертикально. Це дозволяло не накопичуватися всередині лампи газоповітряній суміші при подачі її в верхній частині. Для створення газоповітряної суміші в колбу 8 наливалась невелика кількість рідини. Всередину рідини за допомогою компресора подавався потік повітря. На виході отримували повітряну суміш з парами горючої рідини. Частку пару в суміші регулювали двома ротаметрами. Для забезпечення сталості температури на стінках реакційної камери вона ззовні між колбою 1 та зовнішньою камерою 10 продувалася потоком

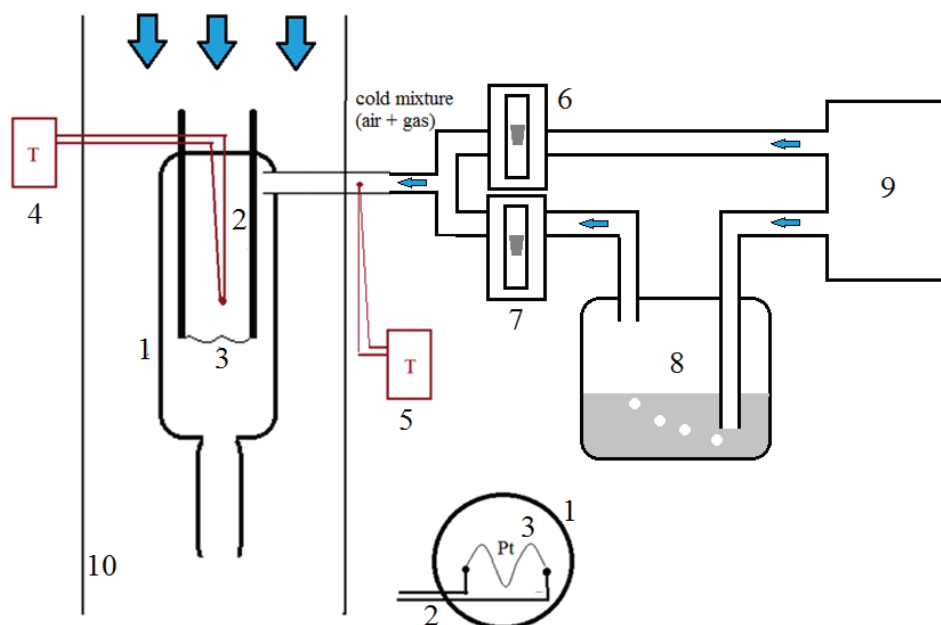


Рис. 1. Схема експериментальної установки: 1 – скляна колба ПМТ-2, 2 – підведені контакти, 3 – платинова нитка, 4, 5 – мілівольтметри з термопарами; 6, 7 – ротаметри поплавкового типу, 8 – смінь з рідиною; 9 – повітряний компресор; 10 – зовнішня камера.

холодного повітря. Температуру суміші до подачі в камеру і всередині неї визначалися по показам термопар.

Об’ємна витрата газової суміші, що поступала в колбу лампи 1 (рис. 1) з ниткою, складала 17–23 см<sup>3</sup>/с. Це відповідає швидкості ламінарного потоку всередині колби в 3 см/с (число Рейнольдса для колби лампи 58, а для нитки 0.18). Отже, в даному випадку впливом

вимушеної і природної конвекції можна знехтувати ( $m = 0$ ). Для тонкого довгого циліндру число Шервуда  $Sh = 0.5$  [10, С. 210; 11, С.42]. В режимі каталітичного горіння температура всередині колби (покази термопар над платиновою ниткою) збільшується на 20–40 К, що говорить про те, що в масштабах колби природна конвекція переважає вимушену конвекцію.

Платинова нитка через контакти лампи ПМТ-2 підключалася по трьох-провідній схемі до мультиметра Picotest 3510A, за допомогою якого визначалася вольт-амперна характеристика дроту в режимі стабілізації сили струму (рис. 2a). Опір платинового дроту визначалася згідно закону Ома (без урахування опору контактів лампи  $R_k = 0.105$  Ом, діаметр яких 1 мм), а середня температура дроту – з квадратичної залежності опору дроту від температури:

$$\frac{R_c}{R_{c0}} = 1 + \gamma(T - T_0) - \delta(T - T_0)^2, \quad R_{c0} = \eta_0 \frac{4L}{\pi d^2}.$$

Тут  $\gamma = 39.7 \cdot 10^{-4}$  1/К,  $\delta = 5.841 \cdot 10^{-7}$  1/К<sup>2</sup>,  $\eta_0 = 9.8 \cdot 10^{-8}$  Ом·м. Опір платинового дроту довжиною 5.6 см і діаметром 95 мкм при  $T_0 = 273$ К складає  $R_0 = 0.775$  Ом.

Таким чином температуро-струмова характеристика платинового дроту (рис.2b) в газоповітряній суміші знімалася при поступовому збільшенні сили протікаючого струму з кроком 0.1А (поблизу критичних процесів з кроком 0.01 А) і встановленні стаціонарного температурного режиму дроту для кожної сили струму. При 0.57–0.63 А в залежності від вмісту в суміші парів ізопропанолу відбувається каталітичне займання – перехід на режим каталітичного горіння. В подальшому сила струму збільшувалася до 0.7 А, а потім плавно знижувалася до 0.01 А. При зменшенні сили струму в режимі каталітичного горіння (високотемпературні режими) можливе каталітичне погасання [12] – зворотній перехід на низькотемпературний режим при більш низькому значенні сили струму.

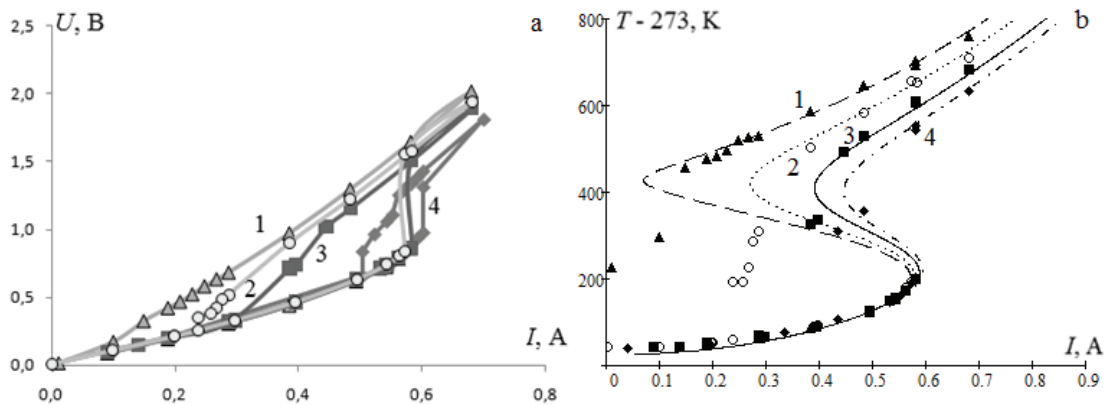


Рис. 2. Вольт-амперна (а) та температуро-струмова (б) залежності для платинової нитки (діаметр 95 мкм) в газоповітряній суміші ( $T_g = 296$  К) з домішками парів ізопропанолу.

▲, ○, ■, ◆ – експеримент. Криві 1–4 – теоретичні залежності (3):

▲ – 3.08%; ○ – 2.81%; ■ – 2.25%; ◆ – 2.00%.

Отже, залежність температури платинового дроту від сили струму проявляє гістерезисний характер. Він пов'язаний з протікання хімічної реакції в двох режимах при однакових зовнішніх умовах: кінетичному (низькотемпературному) та дифузійному (високотемпературному). При протіканні однієї реакції першого порядку згідно класичних уявлень [10, 13] різниця температур в високотемпературному (горіння)  $T_{bur}$  та низькотемпературному (окислення)  $T_{ox}$  режимах визначається тільки концентрацією горючої речовини в газі, в якому окислювач знаходиться в надлишку:

$$T_{bur} - T_{ox} = T_Q Y_f, \quad T_Q = \frac{Q_f Le^{1-m}}{c_{pg}}, \quad (1)$$

де  $Q_f$  – тепловий ефект реакції, розрахований на 1 кг горючого газу, Дж/кг;  $Y_f$  – відносна масова концентрація горючого газу в газовій суміші;  $c_{pg}$  – ізобарна питома теплоємність газової суміші;  $Le = D_f/a_g$  – число Льюїса;  $m$  – показник ступеня в залежності  $Nu$  від  $Pr$  і  $Sh$  від  $Sc$ .

Формула (1) та реакції (I)-(III) використовувалася для оцінки концентрації парів горючої рідини. Для цього визначалося середнє значення різниці температур  $\Delta T_{exp}$  на високо-

та низькотемпературному режимі при 3–4 значеннях сили струму неподалік від сили струму займання  $I_f$ . Концентрація горючого газу розраховувалася, як  $Y_f = \Delta T_{\text{exp}} / T_Q$ .

Аналогічні залежності були отримані і при каталітичному окисленні малих домішок етанолу та ацетону в повітрі на платиновому дроті.

**2. Аналітична модель.** Наявність в газовій суміші декількох газів, що здатні окис-

люватися на поверхні каталізатора, викликає необхідність розгляду паралельного протікання реакцій з різними тепловими ефектами та енергіями активації. Зміна температури каталізатора з часом відбувається за рахунок тепловиділення при протіканні хімічних реакцій  $q_{ch}$ , нагріву електричним струмом  $q_j$ , а також за рахунок теплообміну з навколишніми тілами  $q_h$ .

Тоді

$$\frac{V_c}{S_c} c_c \rho_c \frac{\partial T}{\partial t} = q_{\text{eff}} = q_{ch} - q_h + q_j, \quad T(t=0) = T_b.$$

$$q_{ch} = Q_{f1} k_1 \rho_g Y_{f1} \frac{1}{1 + Se_1} + Q_{f2} k_2 \rho_g Y_{f2} \frac{1}{1 + Se_2}, \quad Se_1 = \frac{k_1}{\beta}, \quad Se_2 = \frac{k_2}{\beta}, \quad q_h = \alpha (T - T_g),$$

$$\alpha = \frac{\lambda_g Nu}{d} = \beta c_g \rho_g Le^{-1+m}, \quad \beta = \frac{D_f}{d} Sh, \quad k_1 = k_{01} \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), \quad k_2 = k_{02} \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right).$$

Тут  $V_c$ ,  $S_c$  – об'єм і бічна поверхня каталізатора;  $c_c$ ,  $\rho_c$  – питома теплоємність і густина матеріалу каталізатора,  $d$  – діаметр каталізатора,  $Sh$  – число Шервуда.

Умову стаціонарності температури каталізатора  $q_{\text{eff}} = 0$  представимо у вигляді залежності квадрата сили струму від стаціонарної температури при сталій концентрації горючого газу в повітрі:

$$\frac{I}{I_0} = \sqrt{\frac{T - T_g}{T_0} - \frac{Y_{f1}}{1 + Se_1} \frac{T_{Q1}}{T_0} \frac{k_{01}}{\beta} \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) - \frac{Y_{f2}}{1 + Se_2} \frac{T_{Q2}}{T_0} \frac{k_{02}}{\beta} \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right)}, \quad (2)$$

$$I_0 = \sqrt{\frac{\pi^2 d^2 \lambda_g Nu T_0}{4\eta}}, \quad T_{Q1} = \frac{Q_{f1} Le_1^{1-m}}{c_{pg}}, \quad T_{Q2} = \frac{Q_{f2} Le_2^{1-m}}{c_{pg}}.$$

Залежність (2) описує експериментальні низько і високотемпературні стаціонарні стани. На рис. 2б представлені розрахункові залежності сили струму від стаціонарної температури для випадку протікання однієї реакції ( $Y_{f2} = 0$ ). Максимум на цій залежності визначає

каталітичне самозаймання горючого газу, а мінімум – каталітичне згасання. Застосуємо умову екстремуму  $\partial I / \partial T = 0$  до залежності (2). В результаті отримаємо, спільно з (2), систему рівнянь для визначення критичних умов каталітичного самозаймання (і) та погасання (е):

$$\left\{ \begin{aligned} I_{i,e} &= I_0 \sqrt{\frac{T_{i,e} - T_g}{T_0} - \frac{RT_{i,e}^2}{ET_0} (1 + Se_{i,e})}, & Y_{f,i,e} &= \frac{RT_{i,e}^2 (1 + Se_{i,e})^2}{T_0 E Se_{i,e}}. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

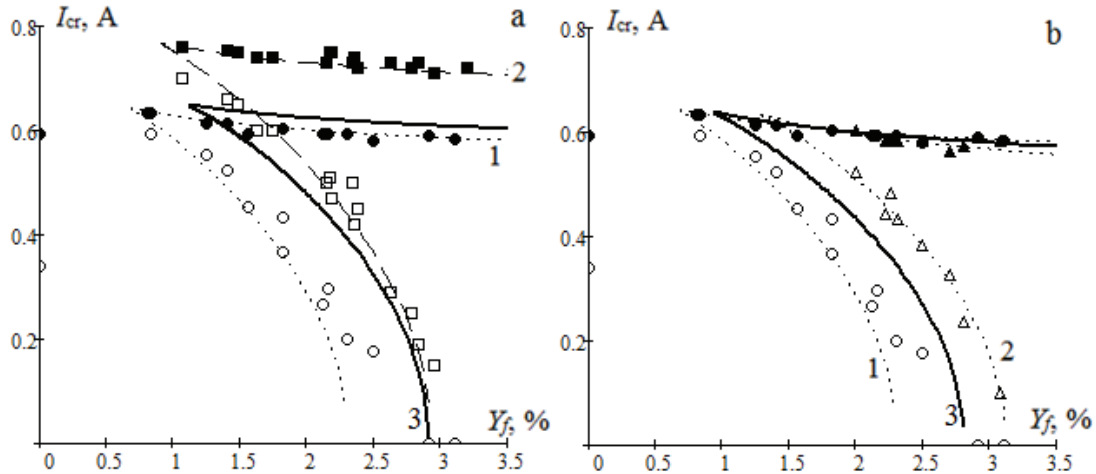
На рис. 3 представлено розв'язок системи (3). В якості параметру використовується температура каталізатора  $T_{i,e}$ , яка є критичною температурою. Узгодження аналітичних залежностей (3) з експериментальними точками дозволило визначити енергії активації  $E$  і пе-

редекспонентного множника  $k_0$ . Нахил кривої згасання істотний в порівнянні з кривою самозаймання. В результаті для розрахунків аналітичних залежностей прийняті наступні параметри: **ацетон**:  $Q_f = 31.5$  МДж/кг,  $E = 84$  кДж/моль,  $k_0 = 1.5 \cdot 10^6$  1/с,



$D_{f0} = 0.109 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $Le = 0.586$ ,  $m = 0$ ,  
 $n = 1.82$ ; **етанол**:  $Q_f = 29.8 \text{ МДж/кг}$ ,  
 $E = 92 \text{ кДж/моль}$ ,  $k_0 = 4 \cdot 10^7 \text{ л/с}$ ,  
 $D_{f0} = 0.10 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $Le = 0.578$ ; **ізопропанол**:  
 $Q_f = 34.1 \text{ МДж/кг}$ ,  $E = 54 \text{ кДж/моль}$ ,  
 $k_0 = 8 \cdot 10^3 \text{ л/с}$ ,  $D_{f0} = 0.099 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $Le = 0.531$ .

**Інші параметри**:  $\rho_{g0} = 1.293 \text{ кг/м}^3$ ,  $c_{g0} = 1005 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ . Отримані ефективні енергії активації близькі до енергії активації повного окислення ацетону на катализаторі  $\text{Cu}_{0.13}\text{Ce}_{0.87}\text{O}_y$   $E = 96\text{--}109 \text{ кДж/моль}$  [14], та повного окислення етанолу  $E = 143 \text{ кДж/моль}$  [7].



**Рис. 3.** Залежність критичного значення сили нагрівуючого струму (самозаймання та згасання каталітичної реакції окислення на платиновій нитці діаметром 95 мкм) в повітрі кімнатної температури  $T_g = 296 \text{ К}$ .  
**а)** 1) етанол ( $\circ, \bullet$ ) та 2) ацетон ( $\square, \blacksquare$ ), 3) 50%/50% етанол та ацетон  
**б)** 1) етанол ( $\circ, \bullet$ ) та 2) ізопропанол ( $\Delta, \blacktriangle$ ), 3) 50%/50% етанол та ізопропанол.

При деякому значенні концентрації  $Y_{f, sb}$  ( $sb$  – *self-supporting burning*) горючого газу критичне значення сили струму погасання зменшується до нуля. Тоді при концентраціях горючого газу  $Y_f > Y_{f, sb}$  при вимкненні сили струму каталітичне горіння продовжується (самопідтримується) [15].

Таким чином, отримані кінетичні параметри можна використати в подальшому для визначення вмісту домішок двох горючих газів в повітрі.

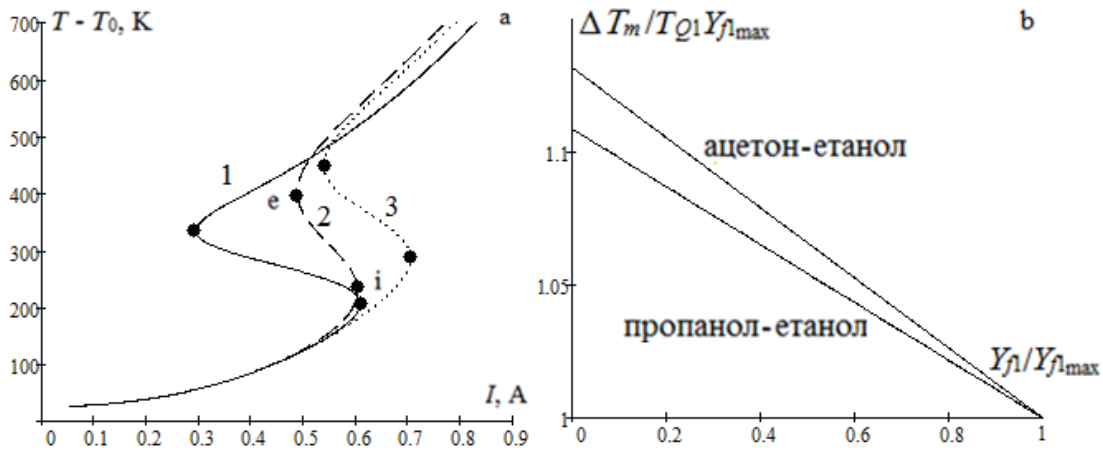
**3. Визначення вмісту суміші двох горючих газів.** На рис. 4а представлені залежності стаціонарної температури платинового дроту діаметром 95 мкм в повітрі кімнатної температури з вмістом пари горючих газів від сили протікаючого струму. Для етанолу, ацетону та ізопропанолу спостерігаються близькі значення величини  $T_Q$ : при концентрації 1% для етанолу  $T_Q Y_f = 148 \text{ К}$ , для ацетону – 168 К, для пропанолу – 164 К). Зміна складу суміші

суттєво не впливає на рівень температури при каталітичному горінні.

Використаємо до (2) умову, що при каталітичному горінні газів спостерігається дифузійний режим реагування ( $\beta \ll k$ ) [16]. Маємо

$$T_m = \left( T_g + \frac{I^2}{I_0^2} T_0 \right) + T_{Q1} Y_{f1} + T_{Q2} Y_{f2}. \quad (4)$$

В дужках правої частини стоїть температура інертного платинового провідника при даній силі струму (відповідає температурі низькотемпературного окислення). Різниця температур каталітичного горіння та низькотемпературного окислення  $\Delta T_m = T_{Q1} Y_{f1} + T_{Q2} Y_{f2}$  визначається лише концентраціями газових компонент. Якщо ж використовувати відношення перепаду температур суміші до такого ж перепаду тільки для однієї з компонент  $\Delta T_m / T_{Q1} Y_{f1 \max}$  (за умови однакової сумарної концентрації горючих газів  $Y_{f1} + Y_{f2} = Y_{f \max}$ ), то ця величина не залежить від вмісту речовин,



**Рис. 4.** Залежність стаціонарної температури платинового каталізатора від сили струму. Масові частки етанолу  $Y_{f1}$  та ацетону  $Y_{f2}$ : 1)  $Y_{f1} = 2\%$ ,  $Y_{f2} = 0\%$ ; 2)  $Y_{f1} = 1\%$ ,  $Y_{f2} = 1\%$ ; 3)  $Y_{f1} = 0\%$ ,  $Y_{f2} = 2\%$ . б) Залежності температурного перепаду на платиновому дроті від частки етанолу  $Y_{f1}$  в суміші за умови, що загальна концентрація горючих компонент залишається сталою  $Y_{f1} + Y_{f2} = Y_{f1max}$ . Діаметр каталізатора 95 мкм. Температура газоповітряної суміші  $T_g = 293$  К.

а лише від складу та типу газової системи (рис. 4б) горючого газу.

рації газів в суміші при знайдених значеннях струму займання та погасання.

$$\frac{\Delta T_{\text{exp}}}{T_{Q1} Y_{f1max}} = \frac{T_{Q1} Y_{f1} + T_{Q2} Y_{f2}}{T_{Q1} (Y_{f1} + Y_{f2})} = \frac{T_{Q2}}{T_{Q1}} \frac{(T_{Q2} - T_{Q1})}{T_{Q1}} \frac{Y_{f1}}{Y_{f1max}}$$

На критичні значення каталітичного займання та погасання вплив складу суміші суттєвий (рис. 4а), що дозволяє оцінювати концент-

Для визначення критичних умов застоуємо умову екстремуму  $\partial I / \partial T = 0$  до залежності (2):

$$\begin{cases} I_{i,e} = I_0 \sqrt{\frac{T_{i,e} - T_g}{T_0} - \frac{Y_{f1} T_{Q1}}{T_0} \frac{Se_{1i,e}}{1 + Se_{1i,e}} - \frac{Y_{f2} T_{Q2}}{T_0} \frac{Se_{2i,e}}{1 + Se_{2i,e}}} \\ 1 = Y_{f1} T_{Q1} \frac{Se_{1i,e}}{(1 + Se_{1i,e})^2} \frac{E_1}{RT_{i,e}^2} + Y_{f2} T_{Q2} \frac{Se_{2i,e}}{(1 + Se_{2i,e})^2} \frac{E_2}{RT_{i,e}^2} \end{cases} \quad (5)$$

$$Se_{1i,e} = \frac{k_{01}}{\beta} \exp\left(-\frac{E_1}{RT_{i,e}}\right), \quad Se_{2i,e} = \frac{k_{02}}{\beta} \exp\left(-\frac{E_2}{RT_{i,e}}\right).$$

Отриману залежність на відміну від суміші з одним горючим газом вкрай важко використовувати для суміші горючих газів. Однак, при рівних концентраціях двох горючих газів  $Y_{f1} = Y_{f2}$  залежність критичного значення сили струму від концентрації знаходиться аналітично (рис. 3а, б). Так видно, що в принципі отримані залежності можна використовувати для визначення частки кожного горючого газу. Але в загальному випадку це зробити аналітично важко.

Проаналізуємо залежності (5). Аналіз критичних точок [9, 16] показує, що на віддаленні від виродження критичних умов для умов каталітичного займання характерно  $Se_i \ll 1$ , а для погасання  $Se_e \gg 1$ . При наближенні до критичної точки  $Se_{ie}$  близькі до 1.

З огляду на вищесказане для визначення концентрацій в бінарній суміші горючих газів можна використати наступну систему рівнянь при наявності каталітичного погасання:

$$\begin{cases} \Delta T_m = Y_{f1}T_{Q1} + Y_{f2}T_{Q2} \\ \Delta T_e = Y_{f1}T_{Q1} \frac{Se_{1e}}{1 + Se_{1e}} + Y_{f2}T_{Q2} \frac{Se_{2e}}{1 + Se_{2e}} \end{cases}$$

$$Y_{f1} = \frac{\Delta T_e - \Delta T_m \frac{Se_{2e}}{1 + Se_{2e}}}{T_{Q1} \left( \frac{Se_{1e}}{1 + Se_{1e}} - \frac{Se_{2e}}{1 + Se_{2e}} \right)}, \quad Y_{f2} = \frac{\Delta T_e - \Delta T_m \frac{Se_{1e}}{1 + Se_{1e}}}{T_{Q1} \left( \frac{Se_{2e}}{1 + Se_{2e}} - \frac{Se_{1e}}{1 + Se_{1e}} \right)}. \quad (6)$$

Наприклад, для кривої 2 (рис. 4а), де представлено залежність для суміші 50%/50% етанол/ацетон ( $T_{Q1} = 15515$  К,  $T_{Q2} = 17560$  К) з сумарною відносною масовою концентрацією в 2%, маємо  $\Delta T_m = 342$  К,  $\Delta T_e = 285$  К,  $T_e = 677$  К. Тоді числа Семенова в точці погасання рівні  $Se_{1e} = 29.9$  та  $Se_{2e} = 1.47$ . В результаті розрахунків за формулою (6) отримуємо  $Y_{f1} = 1.06\%$ ,  $Y_{f2} = 0.95\%$ .

У випадку самопідтримуючого каталітичного горіння (математично  $T_e < T_g$ ) можна використати перепад температур при вимкненому струмі:

$$\begin{cases} \Delta T_m = Y_{f1}T_{Q1} + Y_{f2}T_{Q2} \\ \Delta T_{ab} = Y_{f1}T_{Q1} \frac{Se_{1ab}}{1 + Se_{1ab}} + Y_{f2}T_{Q2} \frac{Se_{2ab}}{1 + Se_{2ab}} \end{cases}$$

Звідси можна отримати аналогічні до (6) вирази для визначення концентрації.

**Висновки.** Отже, маючи ефективні (видимі) кінетичні параметри окислення низки органічних летючих сполук на платиновому тонкому циліндричному каталізаторі, можна визначати частки двох горючих газів в суміші з повітрям. Для цього можна дослідити вольтамперну характеристику платинового дроту в цій суміші. В якості експериментальних значень, що потрібні для розрахунку потрібен не лише різниця температури каталітичного горіння та окислення (високо- і низькотемпературного режиму), але і температурний перепад при температурі погасання для порівняно малої сумарної концентрації горючих газів або при самопідтримуючому каталітичному горінні при більш високому вмісті горючих газів.

Тут  $\Delta T_e = T_e - \left( T_g + \frac{I_e^2}{I_0^2} T_0 \right)$  – температурний перепад в точці погасання, знаходиться експериментально;  $T_e$  – температура погасання. Звідси шукані концентрації можна визначити за формулами:

Для визначення видимих значень енергії активації та передекспоненційного множника реакції окислення горючого газу достатньо обробити залежність критичних значень сили струму займання та погасання від концентрації горючого газу.

### Список використаної літератури

- [1]. N. S. Marinkovic, M. Li & R. R. Adzic. Pt-based catalysts for electrochemical oxidation of ethanol // *Topics in Current Chemistry*, 377(3), pp. 11(2019).
- [2]. R. Rizo, S. Pérez-Rodríguez, G. García. Well-defined platinum surfaces for the ethanol oxidation reaction // *Chem. Electro. Chem*, 6(18), pp. 4725–4738 (2019).
- [3]. Guangxing Yanga, Qiao Zhanga, HaoYua, Feng Pengc. Platinum-based ternary catalysts for the electrooxidation of ethanol // *Particuology* 58, pp. 169–186 (2021)
- [4]. Yunli Ge, Kaixuan Fu, Qian Zhao, Na Ji, Chunfeng Song, Degang Ma, Qingling Liu. Performance study of modified Pt catalysts for the complete oxidation of acetone // *Chemical Engineering Science*. 206. pp. 499–506. (2019) <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.05.051>
- [5]. Guangxing Yang, Qiao Zhang, HaoYua, Feng Peng. Platinum-based ternary catalysts for the electrooxidation of ethanol // *Particuology*. 58. pp. 169–186. (2021). <https://doi.org/10.1016/j.partic.2021.01.007>
- [6]. Babu S. G., Priyadarsini P. A., Karvem-bu R. Copper on boehmite: A simple, selective, efficient and reusable heterogeneous catalyst for oxidation of alcohols with periodic acid in water at room temperature // *Appl. Catal. A Gen*. 392 (1–

- 2). pp. 218–224 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2010.11.012>.
- [7]. F. J. Morales–Leal, J. Rivera De la Rosa, C. J. Lucio–Ortiz, D. A. De Haro Del Río, M. A. Garza–Navarro, W. Tian, J. E. Herrera. Monometallic platinum and palladium-based catalysts in the competitive oxidation of methanol over the liquid-phase methanol-ethanol mixtures // *Chemical Engineering Journal*. 426. pp. 131623 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131623>
- [8]. M. Mitu, D. Razus, D. Oancea Gas Phase Ignition of Propane-Oxygen-Inert Mixtures on an Isothermally Heated Platinum Filament Supported on Quartz Bar // *Revista de Chimie (Bucharest)*. 69(4). pp. 870–874 (2018).
- [9]. V. V. Kalinchak, O. S. Chernenko. *Теплофизика безполум'яного горіння*. Astroprint, Odesa. 200 s (2020) {В. В. Калінчак, О. С. Черненко Теплофізика безполум'яного горіння газів (монографія). Астропринт, Одеса. 200 с.}
- [10]. Frank-Kamenetskiy D. A. *Diffusia I teploperedacha v chimiceskoy kinetike*. Nauka, M. 502 s. (1987). {Франк-Каме́нецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. Москва: Наука. 502 с.}
- [11]. Zukauskas A. A. *Konvektivniy perenos v teploobmennikah*. Nauka, M. 472 s. (1982). {Жукаускас А. А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 472 с.}
- [12]. Kalinchak V. V., Chernenko A. S., Sikorsky M. V., Brytavsky E. V., Stukalov S. A. Experimental studies of the flameless combustion of gas mixtures with impurities of ammonia, hydrogen and acetone on a platinum wire // *Physics of Aerodisperse Systems*. 55. pp. 71–79 (2018). {Калінчак В. В., Черненко О. С., Сікорський М. В., Бритавський Е. В., Стукалов С. А. Експериментальні дослідження безполум'яного горіння газових сумішей з домішками аміаку, водню та ацетону на платиновому дротику // *Фізика аеродисперсних систем*. 55. С. 71–79 (2018)}.
- [13]. Pomerantsev V. V. *Osnovi prakticheskoy teorii gorennya*. Energoatomizdat, Leningrad. 312 s. (1986). {Основы практической теории горения: Учеб. пособие для вузов / под ред. В. В. Померанцева – Л.: Энергоатомиздат, Ленинград. отд-ние, 1986. – 312 с.}
- [14]. Chaoquan Hu. Catalytic combustion kinetics of acetone and toluene over  $\text{Cu}_{0.13}\text{Ce}_{0.87}\text{O}_y$  catalyst // *Chemical Engineering Journal*. 168. pp. 1185–1192 (2011).
- [15]. V. V. Kalinchak, A. S. Chernenko, A. N. Sofronkov, A. V. Fedorenko. Ignition and Self-Supporting Burning of Gas-Air Mixtures with Hydrogen Admixtures on Platinum Wire // *Physics and chemistry of solid state*. 18(4). pp. 449–454 (2017).
- [16]. V. V. Kalinchak, A. S. Chernenko, A. N. Sofronkov, A. V. Fedorenko. Influence of Thermal Diffusion on the Hysteresis's Area of Hydrogen Impurities's Catalytic Combustion on Platinum Wire // *Physics and chemistry of solid state*. 18(1). pp. 52–57 (2017).

Стаття надійшла до редакції 31.01.2023 р.

PACS: 72.20.Dp, UDC 536.4  
DOI: 10.18524/1815-7459.2023.1.275944

## ABOUT THE POSSIBILITY OF USING THERMOCHEMICAL GAS ANALYZERS IN A MULTICOMPONENT MIXTURE

*A. S. Chernenko, V. V. Kalinchak, M. V. Roziznany, A. K. Kopyyka*

Odesa I. I. Mechnikov National University  
teplophys@onu.edu.ua

### Summary

The purpose of this work is the study of non-isothermal oxidation (combustion) of small impurities of acetone, ethanol and isopropanol in air on a platinum wire, analysis of critical conditions for catalytic ignition and extinction, assessment of kinetic parameters oxidation reactions in air; and evaluation of optimal system parameters, within which it is possible to determine gas impurities concentration in a mixture gases.

Kinetic parameters finding's method of heterogeneous catalytic oxidation reactions of combustible gas's small impurities in air on a thin platinum wire was described.

It consists in obtaining from the wire's current-voltage characteristic the dependence of the critical current values on its mass fraction in air. They corresponding to the catalytic ignition and extinction of the gas impurity. The analytical dependence of the platinum wire' temperature on the current shows a hysteresis character. The extrema on the inverse dependence correspond to the critical conditions of vapor' catalytic ignition and extinction. Combined analysis of experimental and analytical critical dependencies allows to estimate the effective values of kinetic parameters (activation energy and pre-exponential factor) of the reaction full oxidation of organic liquid vapors on a solid catalyst.

A method of determining the content of two combustible gases in the air, what based on processing the platinum wire's current-voltage characteristic, was proposed. Depending on the level of the total gases concentration in the air, the determining experimental characteristics are not only the wire (catalyst) overheating relative to the inert wire under the conditions of catalytic ignition, but also the wire overheating during catalytic extinguishing or under conditions of self-sustaining catalytic combustion (without electric current heating).

**Keywords:** gas analyzer, catalyst, multicomponent mixture, ignition, extinction

PACS: 72.20.Dp, UDC 536.4  
DOI: 10.18524/1815-7459.2023.1.275944

## ПРО МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОХІМІЧНИХ ГАЗОАНАЛІЗАТОРІВ В БАГАТОКОМПОНЕНТНІЙ СУМІШІ

*О. С. Черненко, В. В. Калінчак, М. В. Розізаний, О. К. Конійка*

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова  
teplophys@onu.edu.ua

### Реферат

Метою даної роботи є дослідження неізотермічного окислення (горіння) малих домішок ацетону, етанолу та ізопропанолу в повітрі на платиновому дроті, аналіз критичних умов каталітичного займання і погасання, оцінка кінетичних параметрів реакцій окислення в повітрі, а також встановлення оптимальних параметрів системи, в межах яких можна визначити концентрації газових домішок в суміші газів.

В роботі описано метод пошуку кінетичних параметрів гетерогенно-каталітичних реакцій окислення малих домішок горючого газу в повітрі на тонкому платиновому дроті. Він полягає в отриманні з вольт-амперної характеристики дроту залежності критичних значень струму, що відповідають каталітичному займанню та погасанню домішки газу, від її масової частки в повітрі. Аналітична залежність температури платинового дроту від сили струму проявляє гістерезисний характер. Екстремуми на оберненій залежності відповідають критичним умовам каталітичного займання і погасання парів. Сумісний аналіз експериментальних та аналітичних критичних залежностей дозволяє оцінити ефективні значення кінетичних параметрів (енергії активації та передекспоненційного множника) реакції повного окислення парів органічної рідини на твердому каталізаторі.

Запропоновано методику визначення вмісту двох горючих газів в повітрі на основі обробки вольт-амперної характеристики платинового дроту. В залежності від рівня сумарної концентрації газів в повітрі визначальними експериментальними характеристиками є не лише перегрів дроту (каталізатора) відносно інертного дроту в умовах каталітичного займання, але і перегрів дроту при каталітичному погасанні або в умовах само підтримуючого каталітичного горіння (без нагріву електричним струмом).

**Ключові слова:** газоаналізатор, каталізатор, багатокомпонентна суміш, займання, згасання

УДК 53.01/07:620.3

DOI: 10.18524/1815-7459.2023.1.275946

## ЧУТЛИВІСТЬ ДО ВОЛОГИ СИЛІКАТНОГО СКЛА І СТВОРЕННЯ НА ЙОГО ОСНОВІ СЕНСОРА

*Я. І. Леніх, І. К. Дойчо*

Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України  
при ОНУ ім. І. І. Мечникова  
Email: ndl\_lepikh@onu.edu.ua

## ЧУТЛИВІСТЬ ДО ВОЛОГИ СИЛІКАТНОГО СКЛА І СТВОРЕННЯ НА ЙОГО ОСНОВІ СЕНСОРА

*Я. І. Леніх, І. К. Дойчо*

**Анотація.** Стаття присвячена дослідженню адсорбції вологи на шпаристе силікатне скло. Розглянуто способи створення і керування параметрами шпаристості скла. Встановлені оптимальні процеси формування розмірів шпарин при яких чутливість до вологості є найвищою. Визначено діапазон робочих температур сенсора, який перевищує за цією характеристикою існуючі аналоги. Наведена структурна схема створеного на шпаристому склі сенсора вологості.

**Ключові слова:** шпаристе силікатне скло, вологочутливість, сенсор вологості

## MOISTURE SENSITIVITY OF SILICATE GLASS AND CREATION OF A SENSOR BASED ON IT

*Ya. I. Lepikh, I. K. Doicho*

**Abstract.** The article is devoted to the study of moisture adsorption on porous silicate glass. The ways of creating and controlling the parameters of the glass porosity are considered. The optimal processes of formation of the sizes of the pores, in which the sensitivity to humidity is the highest, have been established. The operating temperature range of the sensor has been determined, which exceeds existing analogs in terms of this characteristic. The structural diagram of the humidity sensor created on porous glass is given.

**Keywords:** porous silicate glass, moisture sensitive, humidity sensor

### Вступ

Створення досконалих мікроелектронних сенсорів вологості залишається актуальною задачею [1–2]. При цьому дослідження спрямовуються на підвищення чутливості сенсора, розширення діапазону робочих температур, спрощення конструктивно-технологічних рішень і разом з тим покращення експлуатаційних і економічних характеристик. Дослідженню цих задач і створенню сенсора вологості

на основі шпаристого силікатного скла присвячена дана робота.

### Дослідження і обговорення їх результатів

Відомою є низка сенсорів вологості, які здебільшого працюють за емнісним принципом. Найтипівіший з них [3] являє собою конденсатор, один з електродів якого виконано

з цирконію у вигляді прямокутної матриці, і він одночасно відіграє роль підігрівача для інтенсифікації випаровування вологи з поверхні чутливого шару, який являє собою тонку плівку оксиду цирконію, що має електретні властивості і вирощується під дією потоку розігрітого кисню безпосередньо на поверхні матриці. Як підігрівач цирконієвий електрод працює за рахунок електричного струму, що тече крізь нього. Другий електрод виконується шляхом нанесення пасти оксиду нікелю, легovanого літєм, із наступним впіканням. Цей вологопроникний матеріал має електропровідність, що суттєво перевищує провідність вологочутливого діелектричного шару. В електричному полі електрету відбувається дипольна поляризація молекул води, що дійшли до нього крізь вологопрониклий шар. При цьому вони притягаються до електрету із наступною сорбцією на його поверхні. Інтенсивність процесу сорбції зростає при зростанні вологості середовища. Спеціальним пристроєм вона фіксується і за допомогою калібрувальної шкали перетворюється на відносну вологість довкілля. Недоліком такого сенсора є, перш за все, його низька чутливість, а також, складна технологія виготовлення із використанням дорогих матеріалів, що обумовлює високу вартість виробу.

Є сенсор вологості, що працює за п'єзоелектричним принципом [4]. В якості чутливого елементу в ньому використовується вологочутлива п'єзоелектрична полімерна плівка з нейлону-7 або нейлону-11, до якої прилаштовано дві пари електродів, що являють собою прямокутні однорідні шпаристі графітові плівки. На першу пару подається початкова напруга збудження, а з другої фіксується її змінення при зміні вологості довкілля і внаслідок зміни величини п'єзоелектричного ефекту. За допомогою попереднього калібрування вихідний сигнал перетворюється у величину відносної вологості середовища. Недоліком сенсору такого типу є нестабільність основних його характеристик внаслідок температурної залежності електро-фізичних параметрів п'єзополімерних плівок і ефективність його роботи лише при досить високих температурах.

Є також ємнісний сенсор вологості із наношпаристим гідрофільним діелектриком [5]. Цей сенсор являє собою конденсатор із діелектриком, який із метою створення штучного розподілення шпарин за розмірами для покращення гідрофільних властивостей, формується особливим, досить складним способом.

Спочатку на кремнієвій пластині, яка відіграє роль однієї обкладинки конденсатора, шляхом термічного окислення формується ізолюючий шар. Надалі різні ділянки цього шару шляхом маскування обробляються потоками  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}_2$  та  $\text{O}_2$  у чистому стані або у вигляді суміші зазначених речовин із аргоном або азотом. На оброблених в такий спосіб ділянках діелектрика виникає ізолююче утворення  $\text{SiOCH}$ , що в залежності від використаного реагента матиме різну шпаристість, а через те і неоднакову гідрофільність, що негативно відображається на основних характеристиках сенсора. До того ж така складна обробка негативно відображається на вартості приладу.

Зрозуміло, що сорбція вологості з довкілля має вплинути на ємність діелектрика, до того ж, чим дрібніші шпарини він містить, тим до меншої відносної вологості він виявиться чутливим.

На створений зазначеним способом діелектрик наноситься додатковий шар кремнію, який відіграє роль другої обкладинки конденсатора. До обох обкладинок сформованого в такий спосіб конденсатора впікаються металічні контакти на основі золота і надалі він являє собою вологочутливий сенсор, змінення ємності якого відповідно до зміни відносної вологості середовища фіксується стандартним вимірювачем ємності.

Усі ці складні технологічні операції є зайвими, як показали наші дослідження, при використанні шпаристого силікатного скла [6]. Оскільки будь-який тип скла *a priori* містить певне розподілення шпарин за розмірами, отже є досить гідрофільним і вологочутливим у широкому діапазоні вологостей і не потребує окремої операції.

Як показали наші дослідження замість кремнієвої пластини з діелектриком, виконаної за складною багатоопераційною технологією,



можна використати стандартну пластину з готового шпаристого силікатного скла, шпарини в якому, в залежності від його типу, по різному розподілені за розміром і можуть містити різну кількість залишкового силікагелю або бути взагалі позбавленими від цього утворення. До того ж, будь-який з типів скла у певній кількості містить будь-які шпарини від близько 10 до понад 100 нанометрів. Отже умова гідрофільності такого сенсора у широкому діапазоні вологостей досягається автоматично.

Тим не менш, на заваді використання нанорозмірної системи на базі шпаристого скла, як активного елементу сенсора вологості резистивного типу, стоїть надто великий електричний опір цих сполук. Він досягає кількох тераОм і зменшення його при підвищенні вологості докільля навіть на десятки гігаОм залишиться майже непомітним на цьому тлі.

Проте, якщо штучно зменшити власний опір скла, то його залежність від вологості докільля стає більш виразною без втрати якихось суттєвих властивостей системи. Для цього слід сформувати всередині шпаристої матриці провідну фазу у вигляді ансамблю наночастинок речовини із високою провідністю.

Найбільш слушною з таких речовин є вуглець у формі графіту. Для створення провідної фази у шпаристім склі на базі цієї речовини слід занурити відповідний зразок скла у розчин глюкози, витримати в ньому певний час, а потім піддати цей зразок низькотемпературному відпалу. Завдяки провідним властивостям графіту зазначена операція здатна знизити початковий опір здобутої системи на кілька порядків.

Слід відзначити, що не будь-який тип скла є придатним для використання його як матриці для активного елементу сенсора вологості. Так, дрібношпаристе скло збагачене силікагелем не є придатним оскільки, якщо його наситити недостатньою кількістю глюкози, то його опір після відпалу залишиться високим, а надлишок глюкози, перетворившись після відпалу на наночастилки графіту, укупі із великою кількістю залишкового силікагелю захарастить шпарини і зробить систему невологочутливою.

До крупношпаристого скла, до того ж, збагаченого силікагелем, важко буде забезпечити надійний контакт через підвищену ніздрюватість поверхні. А всередині крупношпаристого скла без силікагелю провідна фаза взагалі здатна шунтувати зразок. Отже, придатним для використання як матриці для сенсора вологості слід вважати дрібношпаристе скло, збіднене силікагелем. Воно містить дрібні шпарини із незначною кількістю силікагелю і для нього є типовою помірна ніздрюватість поверхні. Виконані експерименти цілком це підтверджують.

Сенсор запропонованої конструкції, блок-схема якого представлена на (рис.1), є суттєво простішою за відомі аналоги як і технологія виготовлення, а сам сенсор має вищі основні параметри, в тому числі, при вимірюванні в широкому діапазоні робочих температур. Зменшення опору сенсора при збільшенні відносної вологості докільля від 10 до 99% сягає двох порядків.

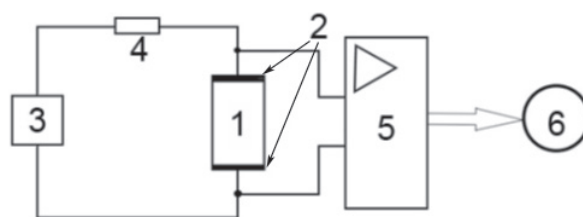


Рис. 1. Структурна схема сенсора вологості на шпаристому склі. 1 – пластина шпаристого скла із вбудованою провідною фазою; 2 – електричні контакти; 3 – джерело живлення; 4 – опір навантаження; 5 – підсилювач постійного струму; 6 – вимірювальний пристрій із перераховувачем опору сенсора у відносну вологість докільля.

Відзначимо, що сенсор є працездатним за будь-яких температур, які не руйнують систему, включно із негативними, що є додатковою перевагою перед аналогами, адже при негативній температурі вологість повітря визначається сублімацією льоду. А окремі наночастилки води, що сорбуються системою, є відокремленими одна від одної силікагелем та наночастинками графіту, отже для них немає значення, яка температура навколо і для них не існує агрегатного стану.

## Висновки

Силікатне скло із наношпаристою структурою має гідрофільні властивості, що є достатніми для створення сенсора вологості. Досягнення максимальної чутливості шпаристого скла до вологи може бути здійснено простими операціями формування необхідних параметрів шпаристості в межах від 10 до 100 нанометрів варіюючі введеною провідною фазою.

Чутливий елемент вологості на основі шпаристого скла дозволяє створити сенсор відносної вологості, з високою чутливістю в широкому діапазоні робочих температур від негативних до високих температур руйнації чутливого елементів зі шпаристого скла.

## Список використаної літератури

[1]. Lepikh Ya. I., Hordiienko Yu. O., Lienkov S. V., Protsenko V. O. Mikrokhyvlyovi datchyky dlia hihrometrii ta volohometrii// Zb. nauk. prats Viiskovoho instytutu Kyivskoho nats. un-tu im. T. Shevchenka. Vyp. No. 30,-2011.– S. 14–20 (in Ukrainian).

[2]. Lepikh Ya. I., Hordiienko Yu. O., Dziadevych S. V. ta in. Intelektualni vymiriuvalni systemy na osnovi mikroelektronnykh datchykv novoho pokolinnia// Monohrafiia. Odesa: Astroprint.–2011.– 352 s. (in Ukrainian).

[3]. Matveev A. V., Vovk S. M., Koshelev V. L. Patent RF № 2096777, 20. 11. 1997, МПК: G01N27/22 (in Russian).

[4]. Jerry I. Scheinbeim, Brian A. Newman. US patent 5369995A, Apr. 21, 2013, МПК G01N29/11.

[5]. Hubert Grange, Jean-Sebastien Danel, Brigitte Desloges, and Vincent Jousseume. US patent 8739622 B2, Jun. 3, 2014, G01N27/001.

[6]. Lepikh Ya., Doycho I., Filevska L., Rysiakiewicz-Pasek E., Grinevych V. Formation of a conducting phase in Porous Glasses// International research and practice conference «nanotechnology and nanomaterials» (The NANO-2022). Conference is dedicated to the International Year of Basic Sciences for Sustainable Development. 25–27 of August 2022 Lviv, Ukraine, book Of Abstracts, P. 52.

Стаття надійшла до редакції 16.02.2023 р.

UDC 53.01/07:620.3

DOI: 10.18524/1815-7459.2023.1.275946

## MOISTURE SENSITIVITY OF SILICATE GLASS AND CREATION OF A SENSOR BASED ON IT

*Ya. I. Lepikh, I. K. Doicho*

Interdepartmental scientific-educational physics and technical center of MES and NAS of Ukraine at Odesa I. I. Mechnikov National University

### Summary

This paper is devoted to research of the moisture adsorption on the silica porous glass. Methods of creation of glass and control of parameters of its porosity are considered. Optimal processes of formation of pore sizes with best sensibility to moisture are estimated. The work temperature range of sensor is revealed. This range is better than at existing analogues.

Block-diagram of the humidity sensor, which created on the silica porous glass, is shown. The sensor has the best sensibility and it can work by negative temperature due to feature of its construction. Absent of difficult technological processes by product manufacturing makes the created sensor cheaper of its analogues. It also has the better metrological parameters due to the pore size distribution of raw material.

**Keywords:** porous silicate glass, moisture sensitive, humidity sensor

УДК 53.01/07:620.3

DOI: 10.18524/1815-7459.2023.1.275946

## ЧУТЛИВІСТЬ ДО ВОЛОГИ СИЛІКАТНОГО СКЛА І СТВОРЕННЯ НА ЙОГО ОСНОВІ СЕНСОРА

*Я. І. Леніх, І. К. Дойчо*

Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України  
при ОНУ ім. І. І. Мечникова  
Email: ndl\_lepikh@onu.edu.ua

### Реферат

Стаття присвячена дослідженню адсорбції вологи на шпаристому силікатному склі. Розглянуто способи створення і керування параметрами шпаристості скла. Встановлені оптимальні процеси формування розмірів шпарин, при яких чутливість до вологості є найвищою. Визначено діапазон робочих температур сенсора, який перевищує за цією характеристикою існуючі аналоги.

Наведена структурна схема створеного на шпаристому склі сенсора вологості. Сенсор має підвищену чутливість і, через особливості своєї конструкції, зберігає працездатність при негативних температурах. Відсутність складних технологічних операцій при виробництві робить створений сенсор вологості суттєво дешевшим за аналоги і внаслідок широкого розподілу за розміром шпарин він має кращі метрологічні характеристики.

**Ключові слова:** шпаристе силікатне скло, вологочутливість, сенсор вологості

# БІОСЕНСОРИ

# BIOSENSORS

---

---

УДК 543.06:577.15:543.553

DOI: 10.18524/1815-7459.2023.1.275947

## РОЗРОБКА КОНДУКТОМЕТРИЧНОГО АРГІНІН-ЧУТЛИВОГО БІОСЕНСОРА НА ОСНОВІ АРГІНІНДЕІМІНАЗИ

*К. О. Беркета<sup>1</sup>, О. Я. Саяпіна<sup>1</sup>, Л. Р. Фаюра<sup>2</sup>, А. А. Сибірний<sup>2,3</sup>,  
С. В. Дзядевич<sup>1</sup>, О. О. Солдаткін<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Інститут молекулярної біології і генетики НАН України, 03143,  
вул. Заболотного-150, м. Київ, Україна

<sup>2</sup> Інститут біології клітини НАН України, 79005, вул. Драгоманова 14/16 м. Львів, Україна

<sup>3</sup> Жешувський університет, вул. Зельверовича 4, 35–601, м. Жешув, Польща

ksenya.berketa.10@gmail.com; osayapina4@gmail.com; fayural@gmail.com; sibirny@yahoo.com;  
dzyad@yahoo.com; soldatkinsasha@gmail.com

## РОЗРОБКА КОНДУКТОМЕТРИЧНОГО АРГІНІН-ЧУТЛИВОГО БІОСЕНСОРА НА ОСНОВІ АРГІНІНДЕІМІНАЗИ

*К. О. Беркета, О. Я. Саяпіна, Л. Р. Фаюра, А. А. Сибірний, С. В. Дзядевич, О. О. Солдаткін*

**Анотація.** В роботі розроблено аргінін-чутливий кондуктометричний біосенсор. Як кондуктометричний перетворювач використовували дві пари золотих гребінчастих електродів, нанесених на ситалову підкладинку. Для створення біоселективної мембрани використовували фермент аргініндеїміназу, яку іммобілізували шляхом ковалентного зшивання глутаровим альдегідом на чутливу поверхню однієї пари електродів кондуктометричного перетворювача, на другу пару електродів наносили референтну мембрану на основі бичачого сироваткового альбуміну. Визначено оптимальні умови іммобілізації ферменту. Вивчено вплив параметрів розчину (іонна сила, буферна ємність, рН та концентрація білка) на роботу розробленого біосенсора. Досліджено стабільність функціонування та зберігання запропонованого біосенсора. Вивчено селективність біосенсора та його основні аналітичні характеристики (мінімальна границя визначення, лінійний та динамічний діапазон роботи біосенсора тощо). Показано, що розроблений біосенсор є перспективним для кількісного визначення вмісту аргініну в реальних зразках.

**Ключові слова:** біосенсор, кондуктометричний перетворювач, аргініндеїміназа, аналіз L-аргініну, іммобілізація ферменту

## DEVELOPMENT OF CONDUCTOMETRIC ARGININE-SENSITIVE BIOSENSOR BASED ON ARGININE DEIMINASE

*K. O. Berketa, O. Y. Saiapina, L. R. Fayura, A. A. Sibirny, S. V. Dzyadevych, O. O. Soldatkin*

**Abstract.** An arginine-sensitive conductometric biosensor was developed. Two pairs of gold interdigitated electrodes deposited on the ceramic substrate were used as a conductometric transducer. Arginine deiminase was used to create a bioselective membrane. The enzyme was immobilized on the sensitive surface of one pair of electrodes of the conductometric transducer by covalent crosslinking with glutaraldehyde; a reference membrane based on bovine serum albumin was deposited on the second pair of electrodes.

The optimal conditions of enzyme immobilization (enzyme concentration, duration and method of immobilization) were determined. The influence of solution parameters (ionic strength, buffer capacity, pH and protein concentration) on the operation of the developed biosensor was studied as well as stability of its functioning and storage. The biosensor selectivity and main analytical characteristics (detection limit, linear and dynamic ranges of the biosensor operation etc.) were investigated. The proposed biosensor was shown to be promising for the quantitative determination of arginine content in real samples.

**Keywords:** L-arginine, biosensor, conductometric transducer, arginine deiminase, enzyme immobilization

### ВСТУП

Точне, швидке та вибіркоче визначення окремих компонентів амінокислотного складу функціональних харчових продуктів, харчових добавок та продуктів для спеціального харчування є важливим для розробки ефективних методів контролю якості. Продукти харчування, збагачені L-аргініном, набули широкого поширення за останні 10–15 років завдяки доведеній ефективності використання підвищених доз L-аргініну для поліпшення стану здоров'я та лікування ряду функціональних розладів організму [1–3]. Зокрема, було виявлено можливість використання L-аргініну для посилення позитивних ефектів від лікування ендотеліальної дисфункції атеросклерозу серцевої, церебральної та периферичної судин, гіпертонії (артеріальної, легеневої, ниркової), захворювань печінки, цукрового діабету, ожиріння, імунодефіциту, остеоартрозу тощо. [4–9]. Окрім того, що він є важливим компонентом білків, аргінін відіграє надзвичайно важливу роль в організмі, оскільки він також є попередником таких сполук, як сечовина, пролін, глутамат, креатин, агматин, оксид азоту (сигнальна сполука, яка забезпечує передачу нейронів, розширення судин, цитотоксичність

та інші функції). Підраховано, що добова потреба аргініну для здорової дорослої людини становить близько 5–6 грамів [10]. Найпоширеніші джерела отримання L-аргініну з їжею – це насіння рослин, зародки пшениці, овес, бобові (соя, горох, квасоля), м'ясо (качка, гусак, вівця), горіхи (волоський горіх, кедрові горішки, кокос, фундук, фісташки), молочні продукти і морепродукти.

При незначному дефіциті організм здорової людини може синтезувати достатню кількість аргініну самостійно. Однак при різних порушеннях та старінні цю здатність організм втрачає, через що суттєво зростає потреба в насичених аргініном продуктах. У ряді джерел зазначено використання підвищених доз аргініну (від 3 до 9 г і навіть до 16 г на добу курсом від 2 тижнів до 6 місяців) з лікувальною метою [11]. Оскільки ринок пропонує широкий вибір місцевих та імпортованих функціональних продуктів з природним високим вмістом аргініну (наприклад, насіння кунжуту, гарбуза чи коноплі), а також харчові добавки на основі аргініну, які, як стверджує виробник, приносять користь для здоров'я, необхідні надійні, швидкі та доступні методи контролю якості продукції та концентрації в них аргініну.

Методи кількісного та якісного визначення аргініну беруть свій початок з класичного хімічного аналізу на основі  $\alpha$ -нафтолу та гіпохлориту [12] або гіпоброміту та оксину (8-гідроксихіноліну) [13,14]. Наразі існує широкий спектр методів визначення аргініну: спектрофотометричне [15,16], флуориметричне [17] та хемілюмінесцентне [18] виявлення, іонообмінна та високоефективна рідинна хроматографія [19,20], капілярний електрофорез [21], мас-спектрометрія [22] та ферментні аналізи [23–25]. Відомі ферментативні аналізи зазвичай використовують одинарне або багаторазове ферментне перетворення аргініну з використанням аргінази, уреазы та глутаматдегідрогенази [23], аргініносукцинатсинтази, піруватфосфатдікінази, піруватоксидази та пероксидази хрому, ауреаргінази [24] або аргініндеімінази [25].

Незважаючи на задовільні критерії аналітичної ефективності, використання вищезазначених методів для складних матриць, таких як харчові продукти та дієтичні добавки, часто пов'язане з тривалою попередньою обробкою зразків, яка виконується кваліфікованим персоналом з використанням дорогого та громіздкого обладнання і коштовних реагентів. Ферментативні методи, хоча і є відносно простими, все ж вимагають автономного виявлення з використанням часто нестабільних хромогенних сполук або флуорофорів.

Таким чином, розробка нових методів для відповідності вищезазначеним вимогам може значно спростити аналіз таких зразків і залишається пріоритетним міждисциплінарним завданням у комплексній процедурі контролю якості харчових продуктів та дієтичних добавок, що використовуються для профілактики та/або усунення дефіциту аргініну.

Електрохімічні біосенсори можуть бути одним із перспективних методів для таких цілей, оскільки вони мають ряд переваг над звичайними аналітичними методами: вони є більш простими у використанні, недорогі, портативні та сумісні з різними лабораторними умовами; характеризуються коротким часом аналізу зразка і зазвичай не вимагають (або вимагають мінімальної) попередньої обробки зразка.

На сьогодні можна знайти відомості про розроблені біосенсори для визначення аргініну на основі одного або кількох ферментів (аргініндеіміназа, аргіназа, уреазы, L-аргініндекарбоксилаза) та різних перетворювачів (амперометричних, потенціометричних, кондуктометричних) [27].

Багатоферментні біосенсори для визначення аргініну мають ряд недоліків, найбільш істотним з яких є їхня не абсолютна селективність до цільового аналізу, яка виникає внаслідок позитивної реакції ферментного комплексу на сполуки гуанідину, сечовину тощо. Також, якщо використовується каскад з кількох ферментів, збільшується вартість біосенсора і ускладнює приготування його біоселективних елементів. З огляду на тип перетворювачів, які можуть використовуватися в біосенсорах, слід зазначити, що саме кондуктометричні перетворювачі надають додаткові переваги в електрохімічних біосенсорах. У порівнянні з іншими типами електрохімічних біосенсорів, які виготовляються за мікросистемними технологіями, кондуктометричні біосенсори не потребують використання дорогого і технологічно складного електрода порівняння; вони працюють на змінній напрузі низької амплітуди, що запобігає фарадеївським процесам на електродах; біосенсори світлонечутливі і їх робочий потенціал може бути знижений, що значно знижує споживання енергії. Крім того, кондуктометричні перетворювачі мають нижчу вартість, оскільки вони можуть бути виготовлені за допомогою недорогої тонкоплівкової стандартної технології, та придатні для мініатюризації [28].

Порівнюючи аналітичні характеристики існуючих біосенсорів для визначення аргініну, ми виявили, що кондуктометричний біосенсор на основі аргінази та уреазы [29] характеризувався однією з найнижчих меж виявлення, найширшим лінійним діапазоном та найкращою стабільністю роботи та зберігання, що важливо для застосування біосенсорів в аналізі реальних зразків. Зазначений біосенсор успішно застосовувався для кількісного визначення L-аргініну у фармацевтичних зразках. У той же час він мав недостатню селективність до аргініну у присутності інших амінокислот при ро-

боті в багатокомпонентних середовищах, таких як фруктові соки. Саме це обмеження спонукало авторів шукати інші рішення. Очевидно, що використання біоселективного елемента, який може забезпечити максимально можливу або абсолютну селективність до субстрату, завжди є вигідним для кількісного аналізу незалежно від природи зразка, що аналізується. Одним із можливих шляхів підвищення селективності біосенсорного аналізу може бути застосування одноферментного підходу. Коли біоселективний елемент біосенсора створюється на основі одного ферменту, легше контролювати чутливість біосенсора, його стабільність при зберіганні та інші важливі аналітичні характеристики шляхом налаштування каталітичної активності та інших властивостей ферменту, які визначають функціонування біосенсора.

У цій роботі ми пропонуємо новий кондуктометричний біосенсор для визначення L-аргініну на основі рекомбінантної аргініндеїмінази (АДІ), яка розкладає аргінін до амоніак-йону відповідно до реакції:

АДІ (Е.С. 3.5.3.6)



У такому біосенсорі кондуктометричний перетворювач реєструє зміну активної провідності розчину через утворення іонів  $\text{NH}_4^+$ , які мають високу іонну рухливість у водних розчинах.

Для розробки біосенсора ми використали високостабільну АДІ від *Mycoplasma hominis*. Повідомлена раніше процедура виробництва *M. hominis* АДІ [30], експресованого в *E. coli*, призвела до його високої вартості, тому необхідне було вдосконалення процедури виробництва. Для цієї роботи було сконструйовано рекомбінантний штам *E. coli*, який надекспресує ген *M. hominis*, що кодує АДІ. Розроблено протокол високорівневого виробництва АДІ на дешевому мінеральному середовищі. В результаті були отримані стабільні ферментні препарати з питомою активністю 30–34 од.акт./мг білка. Ферментні препарати, які зазвичай отримують за описаною проце-

дурою, зберігали свою специфічну активність протягом 5 років при зберіганні при 4 °С.

Метою роботи була розробка стабільного та високочутливого біосенсора на основі АДІ, який був би застосовний для селективного визначення L-аргініну в реальних зразках. Розробка включала виготовлення рекомбінантної АДІ, оптимізацію часу іммобілізації АДІ в селективному елементі біосенсора та пошук параметрів робочого буфера, оптимальних для роботи біосенсора. Досліджено аналітичні характеристики біосенсора в оптимізованому буферному розчині; оцінено селективність, відтворюваність сигналу, експлуатаційну та стабільність зберігання розробленого біосенсора. Розроблений біосенсор був апробований в аналізі аргініну в харчових добавках.

## МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

### Матеріали

Для створення біосенсора було використано фермент рекомбінантна аргініндеїміназа з *Escherichia coli* (АДІ) з активністю 147 од.акт./мл, що був люб'язно наданий Інститутом біології клітини НАН України. Бичачий сироватковий альбумін (фракція V) (БСА) та 25% водний розчин глутарового альдегіду (ГА) було отримано від фірми Sigma-Aldrich (США). Як стоковий розчин субстрату використовували 200 мМ розчин L-аргініну фірми Sigma-Aldrich (Німеччина). Для аналізу селективності біосенсора використовували: L-валін, L-глутамін, L-цистеїн, L-метіонін, L-серин, L-аланін, L-гліцин, L-ізолейцин, L-треонін, L-гістидин, L-аспарагін, L-пролін, L-фенілаланін, аскорбінову кислоту, лимонну кислоту, L-триптофан, L-аспарагінову кислоту, L-лізин та L-глутамінову кислоту фірми Sigma-Aldrich (Німеччина). Для виготовлення буферного розчину використовували  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , отриманий від фірми Helicon (Росія). Інші неорганічні сполуки, що використовувалися в роботі, були вітчизняного виробництва та мали ступінь чистоти «х.ч.» та «ч.д.а.».

### Кондуктометричні перетворювачі

В роботі використано кондуктометричні перетворювачі розміром 5 мм x 30 мм, які

складаються з двох ідентичних пар золотих гребінчастих електродів, що нанесені на ситалову підкладку. Ширина пальців гребінчастих електродів та зазор між ними – 20 мкм, а загальна площа чутливої поверхні пари електродів приблизно 1,5 мм<sup>2</sup>. Використання системи із двох пар електродів полягає в необхідності проводити вимірювання в диференційному режимі, коли на одну пару електродів наносять чутливу мембрану на основі ферменту АДІ, а на іншу – референтну на основі бичачого сироваткового альбуміну. При цьому загальна концентрація білків в обох мембранах має бути однаковою. Така методика вимірювання дозволяє суттєво зменшити вплив загальної провідності розчину, світла, температури та інших неінформативних параметрів на результати вимірювання.

#### **Стационарна установка для кондуктометричних досліджень**

Для проведення кондуктометричних вимірювань, з низькочастотного генератора сигналів ГЗ–118 на диференційну пару кондуктометричних електродів подавалась змінна напруга з частотою 100 кГц та амплітудою 10 мВ. Електроди були занурені у досліджуваний розчин. Для підвищення чутливості сенсора та мінімізації шумів, що виникають за рахунок загальної провідності розчину, застосовувався диференційний режим вимірювання. Отриманий на електродах сигнал знімався з опорів навантаження  $R_n = 1$  кОм та надходив через диференційний підсилювач «Unipan-233–6» на селективний нановольтметр «Unipan-232–В». Після вольтметра сигнал подавався на реєструючий самописець «АВВ Metrawatt SE120». Технічні деталі наведені в роботі [31].

#### **Експресія та виділення аргініндеїмінази**

Експресію, ренатурацію та очищення АДІ проводили, як повідомлялося раніше з деякими модифікаціями [32]. Клітини *E. coli* BL21 (DE3) fhuA2 [lon] ompT gal ( $\lambda$  sBamHI $\Delta$ EcoRI–В int::(lacI:: PlacUV5:: ген Т7) i21  $\Delta$ nin5) [dcm]  $\Delta$ hdsS [33] були трансформовані плазмідною рЕТ3d-ADІ (*Mycoplasma hominis*). Трансформанти відбирали на середовищі Лурія–Бертані при 37 °С, що містило 18 г/л

агару, 100 мг/л ампіциліну, 0,2% аргініну та 0,5% глюкози. Відібрані трансформанти культивували у середовищі С-750501, яке містило 1,25% гліцерину та 0,01% лактози згідно раніше модифікованого протоколу автоіндукції [30].

Індуковані клітини збирали за допомогою центрифугування (15 хв при 5000  $\times$  g та 4 °С), промивали 20 мМ натрій фосфатним буфером, рН 7,2 і зберігали при –70 °С. Для отримання суспензії мікротілець включень, що містили АДІ, біомасу бактерій ресуспендували в 50 мМ Tris-HCl буфері, рН 7,8, що містив 1 мМ ЕДТА та 0,2% лізоцим та інкубували, як описано раніше. Осад, що містив мікротілець включень осаджували та промивали 20 мМ фосфатним буфером рН 7,2, що містив 1 мМ ЕДТА, 4% тритон Х-100. Денатурацію, ренатурацію та очистку АДІ проводили, як це було описано раніше [32].

Після очистки АДІ концентрували за допомогою ультрафільтраційної спінової колонки Vivaspin-Turbo 15 (Sartorius Stedim Biotech GmbH, Німеччина), стерилізували за допомогою фільтрів 0,22 мкм (CE0459 MILLEX-GV, MILLIPORE, США) і зберігали при 4°С.

Концентрацію білка визначали методом Лоурі. Активність АДІ визначали, як описано [32]. За одну одиницю активності (U) приймали кількість ферменту, який перетворює 1 мкмоль L-аргініну в L-цитрулін за хвилину при 37 °С.

#### **Виготовлення біоселективних мембран (іммобілізація ферменту)**

Біоселективні мембрани отримували шляхом ковалентного зв'язування аргінінідеїмінази з бичачим сироватковим альбуміном (БСА) на поверхні однієї пари електродів кондуктометричного перетворювача. Зшиваючим агентом слугував глутаровий альдегід (ГА). Ферментний гель, що наносився на одну пару електродів, в своєму складі містить 88,2 од.акт./мл АДІ, 2% БСА, 6,7% гліцерину в 25 мМ фосфатному буфері з рН 6,2. Референтну мембрану отримували нанесенням на другу пару електродів гелю, що складається з 2% БСА, 6,7% гліцерину в 25 мМ фосфатному буфері із рН 6,2. Іммобілізація проводилася



в ексикаторі в парах глутарового альдегіду, для цього кондуктометричний перетворювач з нанесеними мембранами поміщали в ексикатор на 30 хвилин. Після іммобілізації перетворювач виймали з ексикатора, підсушували на повітрі впродовж 10 хвилин. Далі біосенсиори промивали в робочому буфері впродовж 5 хвилин, декілька разів змінюючи буфер, для звільнення мембран біосенсора від незв'язаних компонентів.

#### Методики біосенсорних вимірювань

Вимірювання проводились за кімнатної температури, у відкритій комірці об'ємом 2 мл при постійному перемішуванні. Для роботи був обраний 5 мМ фосфатний буферний розчин з рН 6,2. Концентрацію субстратів в комірці задавали додаванням до робочого буферу порцій стандартних концентрованих вихідних розчинів субстрату. Неспецифічні зміни вихідного сигналу, пов'язані з впливом коливання температури, рН середовища, електричними наводками, подавлялись завдяки використанню в роботі диференційного режиму вимірювань.

Всі розрахунки проводились в програмі OriginLab OriginPro 8.5.

## Результати та обговорення

### Принцип функціонування кондуктометричного біосенсора на основі АДІ для визначення аргініну

В основі роботи біосенсора для визначення L-аргініну лежить ферментативна реакція за участі аргініндеімінази, зображена на рис. 1а. АДІ – фермент класу гідролаз, який каталізує реакцію незворотного гідролізу L-аргініну до L-цитруліну та аміаку. Таким чином, в ході ферментативної реакції утворюються нові йони, що призводить до зміни електропровідності розчину в приелектродному просторі біосенсора, яку і фіксує кондуктометричний перетворювач.

На рис. 1б наведений типовий відгук біосенсора на добавку 1,5 мМ L-аргініну, отриманий на стаціонарній вимірювальній установці. З графіку, що відтворюється реєструвальним пристроєм, можна визначити не тільки величину відгуку біосенсора на певну концентрацію субстрату, а й час його отримання, шум та дрейф базової лінії, а також кутовий коефіцієнт відгуку. Все це дає можливість розраховувати теоретично можливі відгуки на добавку інших

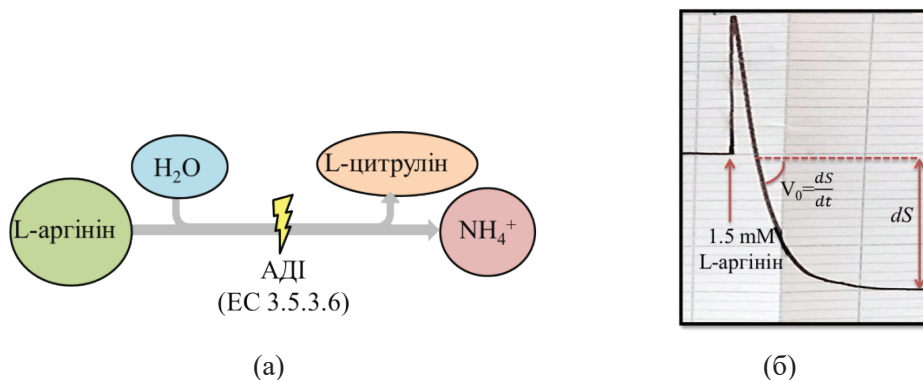


Рисунок 1. Схема ферментативної реакції (а) та типовий відгук (б).

концентрацій для аналізу без побудови калібрувальних кривих.

#### Підбір оптимальних параметрів іммобілізації ферменту

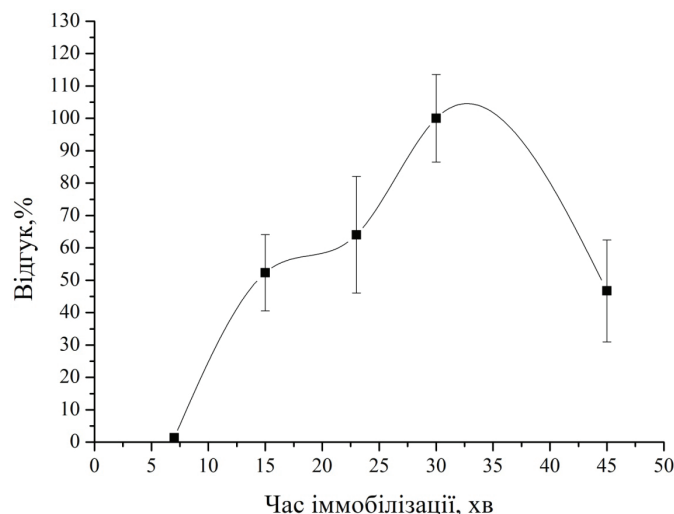
Важливим завданням при розробці будь-якого біосенсора є визначення оптимальних параметрів процесу іммобілізації задля досягнення максимальної ефективності роботи іммобілізованого ферменту. Одним з головних

параметрів іммобілізації, що обов'язково вивчають під час розробки біосенсора, є її тривалість. Оптимізація даного параметру забезпечує найбільшу чутливість і стабільність роботи та збереження біосенсорів. Недостатній час витримки ферменту із зшиваючим агентом в ексикаторі призведе до зменшення стабільності функціонування біосенсора, а надлишковий час – до зниження його чутливості (вна-

слідок зашивки активного центру ферменту). Відповідно, в роботі було перевірено вплив тривалості іммобілізації на ефективність роботи біосенсора. Результати дослідження наведені на рис. 2. Оптимальним часом іммобілізації

ферментної мембрани в парах глютарового альдегіду є 30 хвилин.

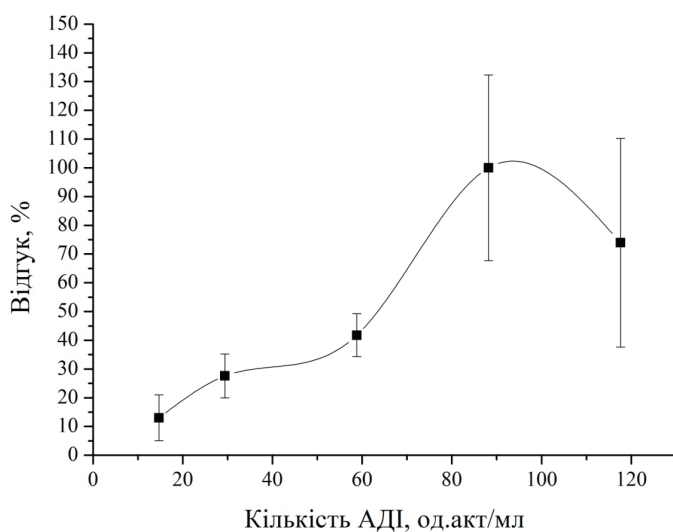
Ще одним дуже важливим параметром іммобілізації ферментів при розробці біосенсора є активність ферменту в складі біосе-



**Рисунок 2.** Залежність величини відгуку біосенсора від тривалості іммобілізації ферменту. Концентрація L-аргініну – 1,5 мМ. Дослідження проводились в 5 мМ фосфатному буфері за рН 7,35.

лективного елементу. Препарат ферменту, що нам було люб'язно надано Інститутом біології клітини НАН України, мав базову активність 147 од.акт/мл в розчині. В роботі ми дослідили як зміна активності ферменту в гелі для іммобілізації буде впливати на чутливість біо-

сенсора до аргініну. Для підбору оптимальної концентрації АДІ ми виготовляли біоселективні елементи з розчинів із концентрацією ферменту 14,7 од.акт/мл, 29,4 од.акт/мл, 58,8 од.акт/мл, 88,2 од.акт/мл та 117,6 од.акт/мл. Результати експерименту наведені на рис.3. Як



**Рисунок 3.** Залежність величини відгуків біосенсора від концентрації АДІ. Концентрація L-аргініну – 1,5 мМ. Вимірювання проводились у 5 мМ фосфатному буфері за рН 6,2.

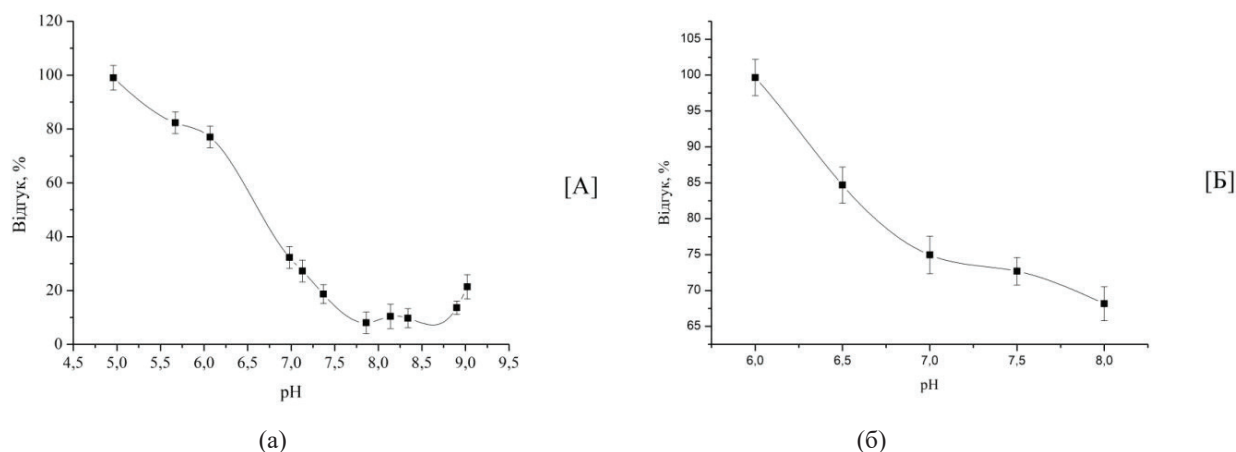
можемо побачити, при концентрації ферменту в 14,7 од.акт/мл, 29,4 од.акт/мл та 58,8 од.акт/мл відгуки на L-аргінін є низькими, а при концентрації АДІ 88,2 од.акт/мл та 117,6 од.акт/мл відгуки є достатніми для вимірювання. Для подальшої роботи нами була обрана концентрація в 88,2 од.акт/мл з метою економії ферменту.

#### **Дослідження впливу параметрів розчину на функціонування біосенсора**

Відомо, що робота будь-якого біосенсора є залежною як від характеристик самого біосенсора, так і від характеристик розчину, в якому плануються вимірювання. Відповідно в нашій роботі необхідно було дослідити, як впливають основні характеристики розчину на функціонування розробленого біосенсора на основі АДІ.

Звісно, кожний фермент має рН оптимум роботи, але відомо, що після іммобілізації цей оптимум може змінюватись, тому необхідно було дослідити вплив рН розчину на роботу аргінін-чутливого біосенсора. Для його визначення було проведено ряд експериментів

з використанням 2-х типів буферних розчинів: 5 мМ фосфатного та 2,5 мМ Polymix з різними рН. Polymix буфер застосовувався для дослідження рН оптимуму роботи біосенсора, оскільки цей буфер є багатосольовим і характеризується однаковою буферною ємністю в широкому діапазоні рН. Фосфатний буфер було використано для аналізу залежності роботи біосенсора від рН, оскільки саме з цим буфером планувалась подальша робота біосенсора з реальними зразками. Роботу біосенсора перевіряли у фосфатному буфері в діапазоні рН від 5,5 до 8,0, а для Polymix – від 5,03 до 9,11. Результати експериментів ви можете побачити на рис. 4. Як видно з рис. 4а найвища величина відгуку біосенсора спостерігалась при роботі в Polymix за рН 5,35. А з рис.4б видно, що найбільший відгук біосенсора на 1,5 мМ аргініну спостерігався у фосфатному буфері за рН 6,0. Проте, внаслідок того, що при рН 6,0 фосфатний буфер має низькі буферні властивості, для подальшої роботи був обраний буфер з рН 6,2.

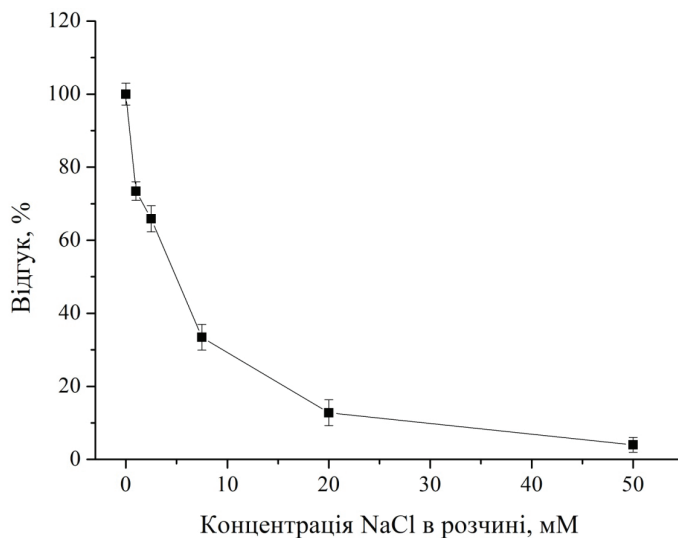


**Рисунок 4. Залежність величини відгуків біосенсора від рН робочого буферного розчину. Концентрація L-аргініну – 1,5 мМ. Дослідження проводились в 2,5 мМ Polimix буфері (а) та 5 мМ фосфатному буфері (б).**

Робота кондуктометричних біосенсорів є сильно залежною від іонної сили буферного розчину. Іонна сила (як і фонові провідність розчину) може зростати внаслідок збільшення буферної ємності. Також, при вимірюванні реальних зразків, іонна сила може змінюватись внаслідок додавання досліджуваного зразка (в нашому випадку – складних діабетичних

добавок, речовини в складі яких можуть змінювати провідність). Відповідно, обов'язковим є дослідження впливу іонної сили розчину на роботу розробленого кондуктометричного біосенсора для визначення аргініну.

Ми перевірили чутливість біосенсора до аргініну за різної іонної сили буферного розчину (рис.5). Іонну силу розчину змінювали



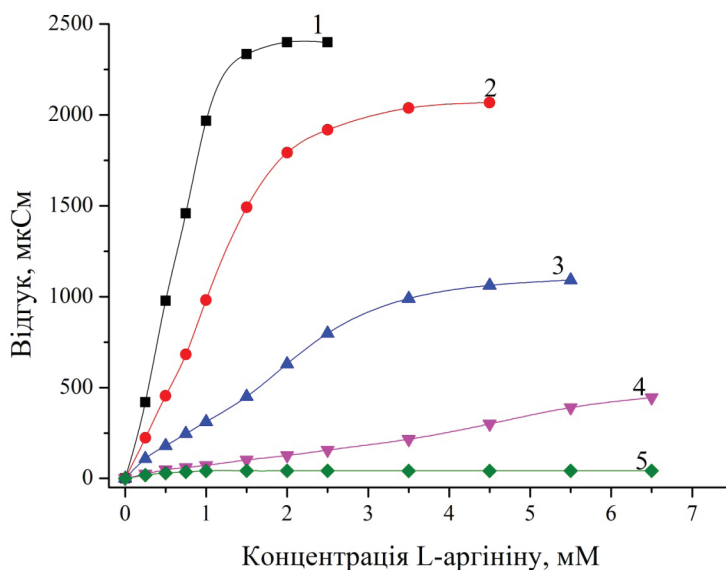
**Рисунок 5.** Залежність величини відгуку біосенсора від зміни іонної сили розчину (концентрації NaCl в розчині). Концентрація L-аргініну – 1,5 мМ. Вимірювання проводились в 5 мМ фосфатному буфері за рН 6,2.

додаванням до буферу NaCl з концентрацією від 0 мМ до 50 мМ.

З графіку, побудованого на основі результатів вимірювання видно, що із зростанням іонної сили розчину за експонентою зменшується відгук на субстрат. В основному така залежність спостерігається за рахунок зростання фонові провідності розчину. Саме тому, важливо проводити контроль іонної сили при роботі з кондуктометричними біосенсорами,

особливо при використанні їх для аналізу реальних фармацевтичних зразків.

Наступним параметром розчину, який слід враховувати при роботі з кондуктометричними біосенсорами є буферна ємність розчину. Тому були проведені вимірювання чутливості біосенсора до аргініну при роботі в фосфатних буферних розчинах з різною буферною ємністю (від 1 мМ до 20 мМ) (рис.6). Аналізуючи калібрувальні графіки, можна поба-



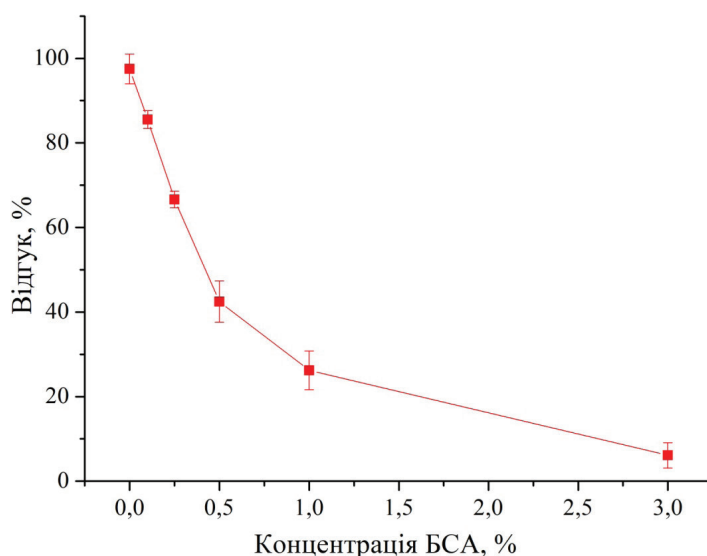
**Рисунок 6.** Залежність величини відгуків біосенсора від буферної ємності розчину. Дослідження проводились в 1 мМ (1), 2,5 мМ (2), 5 мМ (3), 10 мМ (4) та 20 мМ (5) фосфатному буфері за рН 7,35.

чити, що найбільші відгуки спостерігались при роботі біосенсора в 1 мМ ФБ, проте при вимірюваннях з використанням буферів з буферною ємністю 1 та 2,5 мМ спостерігались збільшені, порівняно з попередніми вимірюваннями, шуми, що досить сильно впливає на стабільність роботи біосенсора. Цей ефект можна пояснити тим, що низька концентрація солей в буферному розчині не може підтримувати його буферні властивості. При збільшенні буферної ємності робочого розчину суттєво зменшуються відгуки біосенсора на субстрат та розширюється лінійний діапазон роботи біосенсора, тому для подальшої роботи був обраний буфер з буферною ємністю 5 мМ.

Майже у всіх біологічних рідинах присутня висока концентрація білкових молекул, які при роботі можуть фізично забивати біоселективну мембрану, погіршуючи її проникність. Внаслідок цього ускладнюється дифу-

зія ферменту до активного центру субстрату і відгук сенсора падає. Ми провели ряд експериментів на дослідження впливу концентрації бичачого сироваткового альбуміну в розчині на величину відгуку біосенсора (рис.7). Концентрація білка варіювалась в межах від 0 до 3%. В ході експерименту додавали у вимірювальну комірку таку аліквоту L-аргініну, щоб концентрація субстрату в комірці дорівнювала 1,5 мМ. Таким чином, при підвищенні концентрації білка в розчині суттєво падала величина відгуку. Так, при концентрації білка в 3% відгук біосенсора зменшився більш ніж на 90%.

Таким чином, можна зробити висновок, що функціонування біосенсора є сильно залежним від концентрації білка і його використання не рекомендується для вимірювання вмісту аргініну у зразках з високою концентрацією білка.



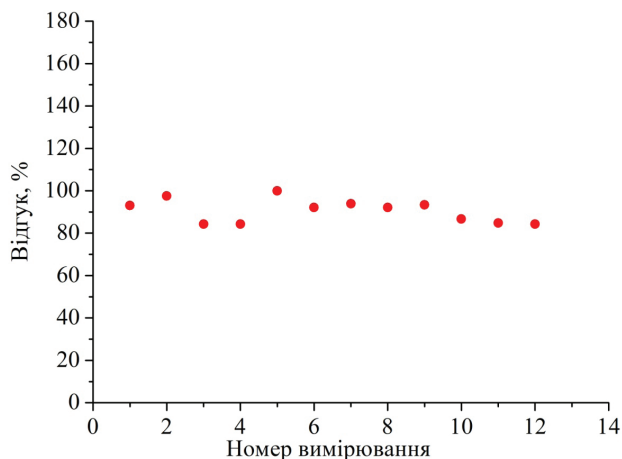
**Рисунок 7. Залежність величини відгуку біосенсора від концентрації білка в розчині (концентрація БСА). Концентрація L-аргініну – 1,5 мМ. Вимірювання проводились у 5 мМ фосфатному буфері за рН 6,2.**

### ***Вивчення стабільності функціонування та зберігання розробленого біосенсора на основі АДІ***

Дуже важливою характеристикою біосенсора є відтворюваність сигналів при безперервній роботі. Тому ми дослідили відгуки біосенсора на однакову концентрацію субстрату впродовж декількох годин. Тривалість

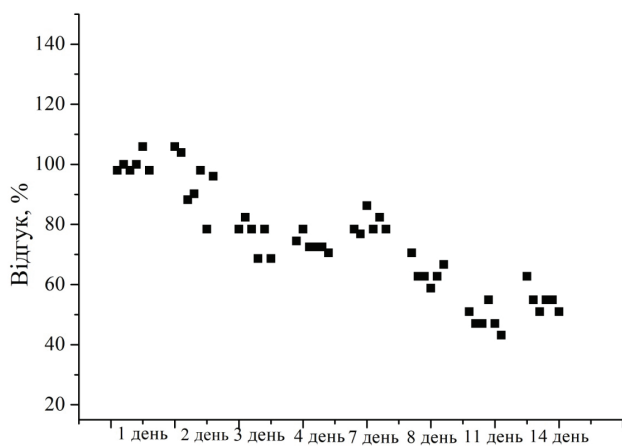
отримання одного відгуку складала 1–1,5 хвилини, часовий проміжок між вимірюваннями – 5 хвилин, за цей час біосенсор відмивали від субстрату, декілька разів змінюючи буфер у вимірювальній комірці при постійному перемішуванні. Відгуки отримували на 1,5 мМ L-аргініну (концентрація, що відповідає діапазону насичення калібрувальної кривої). Ре-

зультати вимірювання наведено на рис.8. За 12 вимірювань суттєвого падіння величини відгуку не спостерігалось, а відносне середньоквадратичне відхилення становило 6,1%.



**Рисунок 8. Відтворюваність відгуків біосенсора на основі АДІ при безперервній роботі. Концентрація L-аргініну – 1,5 мМ. Вимірювання проводились у 5 мМ фосфатному буфері за рН 6,2.**

Ще однією важливою характеристикою будь-якого біосенсора є операційна стабільність роботи (рис. 9).

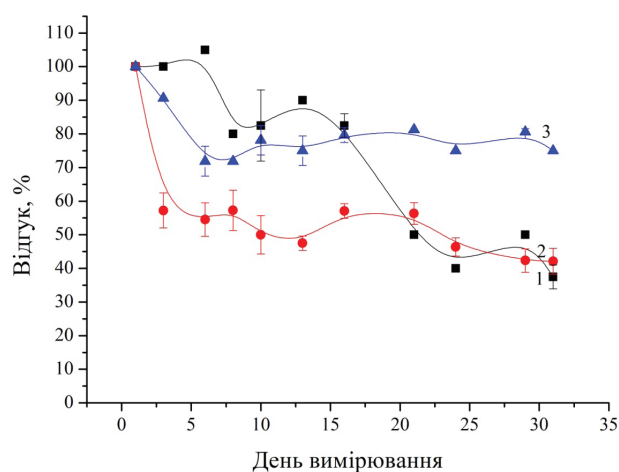


**Рисунок 9. Операційна стабільність відгуків біосенсора на основі АДІ впродовж 14 днів. Концентрація L-аргініну – 1,5 мМ. Вимірювання проводились у 5 мМ фосфатному буфері за рН 6,2.**

Дослідження проводили впродовж двох тижнів, кожного дня, отримували по 6 відгуків біосенсора на 0,25 мМ L-аргініну. Між вимірюваннями біосенсор зберігався в сухому стані

в холодильнику за температури + 8 °С. Після першого тижня роботи біосенсора, середня величина відгуку зменшилась на 20%, а після завершення експерименту (по проходженні двох тижнів) – на 45%. Таким чином, було показано, що біосенсор є досить стабільним при постійному використанні та характеризується гарною операційною стабільністю сигналів, щонайменше протягом двох тижнів.

З метою подальшої комерціалізації розробленого біосенсора, було вивчено стабільність біосенсора на основі АДІ при довгостроковому зберіганні (рис. 10).



**Рисунок 10. Стабільність біосенсора при довготривалому зберіганні в різних умовах: в сухому стані при +8 °С (1), у вологому стані при +8 °С (2) та у сухому стані при –18 °С (3). Концентрація L-аргініну – 1,5 мМ. Вимірювання проводились у 5 мМ фосфатному буфері за рН 6,2.**

Експеримент проводили наступним чином: виготовили низку біосенсорів, отримали по декілька відгуків на однакову концентрацію субстрату для кожного з них, після чого помістили в різні умови для зберігання: у вологому стані при +8 °С та в сухому стані при +8 °С та –18 °С. Експеримент тривав 31 день. По проходженні першого тижня суттєво зменшились відгуки на всіх досліджуваних біосенсорах. Після другого та третього тижнів відгуки біосенсорів, що зберігались в у вологому стані при +8 °С; та у сухому стані при –18 °С залишались відносно стабільними, в той час, як відгук біосенсора, що зберігався в сухому стані при +8 °С, зменшився на 60% відносно початкової

активності. Після завершення експерименту відгук біосенсора, що зберігався у сухому стані при  $-18^{\circ}\text{C}$ , становив приблизно 80% від початкового рівня сигналу. Відгук біосенсора, що зберігався у вологому стані при  $+8^{\circ}\text{C}$  продовжував зменшуватися (після 31 дня відгук дорівнює близько 40% від початкового), а величина відгуку біосенсора, що зберігався при  $+8^{\circ}\text{C}$  у сухому стані становила приблизно 35% відносно початкової активності. Найкращі результати виявились при зберіганні біосенсора у сухому стані при  $-18^{\circ}\text{C}$ .

#### **Перевірка селективності роботи біосенсора на основі АДІ**

Одним з найважливіших критеріїв аналізу перспективності застосування біосенсора, для подальшої роботи з реальними зразками, є його селективність відносно можливих інтерферуючих речовин. Було проведено низку дослідів з метою перевірки селективності розробленого біосенсора на основі АДІ. Спершу було перевірено як інші амінокислоти впливають на селективність біосенсора до аргініну (табл. 1).

Таблиця 1.

**Селективність біосенсора відносно можливих інтерферентів. Концентрація усіх аналітів – 100 мкМ. Вимірювання проводились в 5 мМ фосфатному буфері за рН 6,2.**

<i>Інтерферуючі речовини</i>	<i>Відгук біосенсора, %</i>
Триптофан	0
Фенілаланін	0
Пролін	0
Гістидин	0
Треонін	0
Ізолейцин	0
Гліцин	0
Аланін	0
Серин	0
Метіонін	0
Цистеїн	0
Валін	0
Аспарагін	0
Глутамін	0
Лізін	6,67
Аспарагінова кислота	20
Глутамінова кислота	20
<b>Аргінін</b>	<b>100</b>

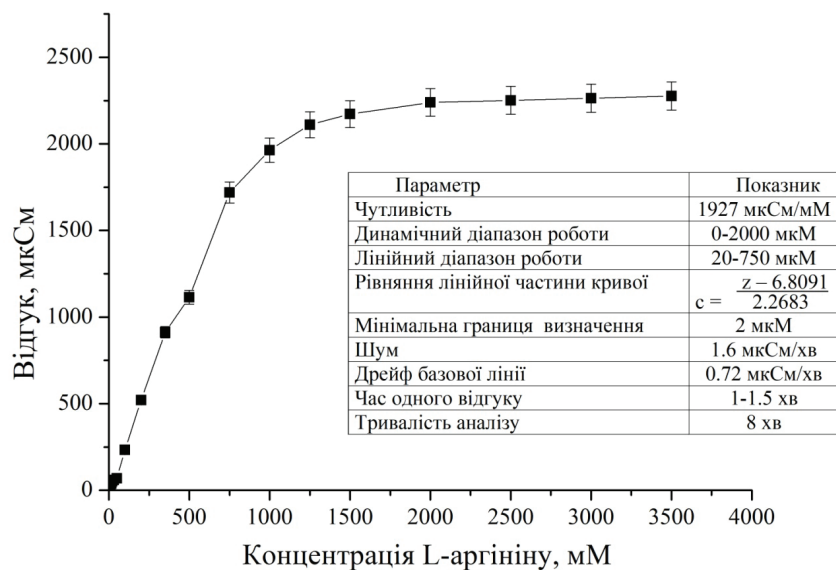
Дослідження проводились в 5 мМ фосфатному буфері за рН 6,2, при цьому у вимірвальну комірку вносились аліквоти концентрованих розчинів можливих інтерферуючих речовин (інші амінокислоти) до концентрації в 100 мкМ в комірці. Відгук біосенсора на інші амінокислоти розраховувався у відсотках, при цьому за 100% був взятий відгук на 100 мкМ L-аргініну. В цілому біосенсор виявився досить селективним до інших амінокислот, що можуть входити до складу фармацевтичних зразків, окрім аспарагінової та глутамінової кислоти (реакція біосенсора – 20%).

Крім того було перевірено селективність кондуктометричного біосенсора на основі АДІ відносно низки інших електроактивних речовин, що можуть бути присутні в біологічних зразках. Біосенсор був селективним відносно цих інтерферуючих речовин, за виключення аскорбінової та лимонної кислот. Величина відгуку біосенсора на лимонну кислоту становила 133,3%, а на аскорбінову – 53,3% у порівнянні з відгуком даного біосенсора на L-аргінін. Відповідно, наявність цих кислот у реальному зразку може спотворити результат біосенсорного аналізу концентрації L-аргініну в зразку, тому застосування розробленого біосенсора для аналізу реальних зразків, в яких є аскорбінова або лимонна кислота, є неможливим.

#### **Аналіз основних аналітичних характеристик розробленого біосенсора**

Останнім етапом створення та оптимізації роботи біосенсора на основі аргініндемінази для детектування аргініну було визначення його основних аналітичних характеристик. Для виконання цього завдання було побудовано калібрувальну криву визначення концентрації L-аргініну (рис. 11).

Проаналізувавши характер відгуків та калібрувальну криву біосенсора, отриманих після усіх оптимізацій, було визначено основні аналітичні характеристики біосенсора (рис. 11). Мінімальну границю біосенсорного визначення L-аргініну вимірювали як мінімальну концентрацію субстрату, на яку є можливим отримати відгук, що перевищує шум базової лінії в три рази. Таким чином, мінімальна гра-



**Рисунок 11. Калібрувальна крива біосенсора на основі АДП. Вимірювання проводились в 5 мМ фосфатному буфері за рН 6,2.**

ниця визначення для розробленого біосенсора становила 2 мкМ. Лінійний діапазон роботи біосенсора лежить в межах від 20 до 750 мкМ L-аргініну, а динамічний – від 0 до 2000 мкМ. Лінійна ділянка даної кривої описується рівнянням:

$$c = \frac{z - 6,8091}{2,2683},$$

де  $c$  – це концентрація L-аргініну в комірці (в мкМ), а  $z$  – відгук біосенсора на дану концентрацію (в мкСм).

Чутливість до L-аргініну для даного біосенсора становила 1927 мкСм/мМ. Шум та дрейф базової лінії для даного вимірювання становили 1,6 мкСм/хв та 0,72 мкСм/хв відповідно.

Відповідно до отриманих результатів, розроблений біосенсор є перспективним до застосування для подальшого кількісного аналізу L-аргініну в реальних фармацевтичних зразках.

## ВИСНОВКИ

В роботі було розроблено кондуктометричний аргінін-чутливий біосенсор на основі аргініндеімінази для кількісного визначення аргініну у фармацевтичних зразках. Проведено

оптимізацію умов іммобілізації ферменту на поверхні кондуктометричного перетворювача: спосіб іммобілізації – в парах глутарового альдегіду; концентрація ферменту в біоселективній мембрані – 88,2 од.акт/мл; тривалість іммобілізації – 30 хв. Визначено вплив основних параметрів розчину (іонної сили, буферної ємності, рН, температура та концентрації білка) на величину відгуків біосенсора на L-аргінін. Оптимальним буферним розчином для роботи аргінін-чутливого біосенсора був 5 мМ фосфатний буфер за рН 6,2.

Також в роботі була перевірена селективність біосенсора стосовно можливих інтерферуючих речовин. На жаль, біосенсор характеризувався незначною чутливістю до аспаргінової та глутамінової кислоти (реакція біосенсора – 20%) та сильною чутливістю до аскорбінової та лимонної кислот. Величини відгуків на інші речовини були мінімальними або не перевищували 20%.

Показано, що біосенсор характеризується високою відтворюваністю результатів впродовж одного дня активної роботи (RSD= 6,1% для 1,5 мМ субстрату), а також характеризується високою операційною стабільністю протягом двох тижнів. Було визначено найкращі умови довгострокового зберігання, а саме – в сухому стані за температурі –18 °С.



Після розробки біосенсора і оптимізації його роботи було досліджено основні аналітичні характеристики: чутливість, динамічний та лінійний діапазон роботи, мінімальна межа визначення, шум та дрейф базової лінії тощо. За результатами досліджень встановлено, що розроблений біосенсор можна з успіхом використовувати для кількісного визначення L-аргініну для контролю процесу виробництва діабетичних добавок, що містять L-аргініну.

Беркета Ксенія Олександрівна, ksenya.berketa.10@gmail.com

Саяпіна Ольга Ярославівна

Фаюра Любов Романівна

Сибірний Андрій Андрійович

Дзядевич Сергій Вікторович

Солдаткін Олександр Олексійович

## ПОДЯКИ

Робота профінансована за рахунок гранту НАН України для науково-дослідних лабораторій/груп молодих вчених НАН України для проведення досліджень у межах пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки. Частина досліджень було проведено завдяки фінансовій підтримці НАН України в рамках цільової програми наукових досліджень НАН України «Розумні» сенсорні прилади нового покоління на основі сучасних матеріалів та технологій»

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1]. P. Lucotti, L. Monti, E. Setola et al. Oral L-arginine supplementation improves endothelial function and ameliorates insulin sensitivity and inflammation in cardiopathic nondiabetic patients after an aortocoronary bypass. *Metabolism*, 58(9), pp. 1270–1276 (2009).
- [2]. C. Baylis. Nitric oxide deficiency in chronic kidney disease. *Am. J. Physiol. Renal Physiol*, 294, 1–9 (2008).
- [3]. F. Facchinetti, G. R. Saade, I. Neri et al. L-arginine supplementation in patients with gestational hypertension: a pilot study. *Hypertens. Pregnancy*, 26(1), 121–130 (2007).
- [4]. R. I. Yatsyshyn, M. Ya. Sukhorebska. Improving efficiency of treatment of patients suffering from osteoarthritis with co-existent abdominal obesity secondary to dyslipidemia. *Galician Medical Journal*, 22(1), 92–96 (2015).
- [5]. J. George, S. B. Shmuel, A. Roth et al. L-arginine attenuates lymphocyte activation and anti-oxidized LDL antibody levels in patients undergoing angioplasty. *Atherosclerosis*, 174(2), 323–327 (2014).
- [6]. F. Moutaouakil, H. El Otmani, H. Fadel et al. L-arginine efficiency in MELAS syndrome. A case report. *Rev. Neurol. (Paris)*, 165(5), 482–485 (2009).
- [7]. R. K. Oka, A. Szuba, J. C. Giacomini, J. P. Cooke. A pilot study of L-arginine supplementation on functional capacity in peripheral arterial disease. *Vasc. Med.*, 10(4), 265–274 (2005).
- [8]. Y. Ozsoy, M. Ozsoy, T. Coskun, K. Namli, A. Var, B. Ozyurt. The effects of L-arginine on liver damage in experimental acute cholestasis an immunohistochemical study. *HPB Surgery*, Article ID306069 (2011).
- [9]. J. K. Yoon, A. Frankel, L. G. Feun, S. Ekmekcioglu, K. B. Kim. Arginine deprivation therapy for malignant melanoma. *Clinical pharmacology: advances and applications*, 5(1), 11–19 (2013).
- [10]. M. M. Seliuk, M. M. Kozachok, I. M. Lyovkin, O. V. Seliuk. Optimal combinations of metabolic drugs for the treatment of cardiovascular disorders. *Family Medicine*, 2(70), 60–64 (2017).
- [11]. L. Voloshyna, L. Vlasyk, O. Voloshyn. Dietary supplements or parapharmaceuticals: products with high content of arginine in rehabilitation treatment in patients with osteoarthritis with high comorbidity level. *Problems of Nutrition*, 1, 31–39 (2017).
- [12]. S. Sakaguchi. A new color reaction of protein and arginine. *J. Biochem.*, 5, 25–31 (1925).
- [13]. C. J. Weber. A modification in Sakaguchi's reaction for the quantitative determination of arginine. *J. Biol. Chem.*, 86, 217–222 (1930).

- [14]. S. Sakaguchi. A new method for the colorimetric determination of arginine. *J. Biochem.*, 37(2), 231–236 (1950).
- [15]. Y. R. Tahboub, H. L. Pardue. A predictive-kinetic method for the quantitation of amino acids with ninhydrin. *Anal. Chim. Acta*, 173, 23–32 (1985).
- [16]. H. A. Medien. Spectrophotometric method for determination and kinetics of amino acids through their reaction with syringaldehyde. *Spectrochim. Acta A*, 54, 359–365 (1998).
- [17]. M. I. Parniak, G. Lange, T. Viswanatha. Quantitative determination of monosubstituted guanidines: a comparative study of different procedures. *J. Biochem. Biophys. Meth.*, 7(4), 267–276 (1983).
- [18]. M. E. Gange, P. S. Francis, J. W. Costin, N. W. Barnett, S. W. Lewis. Determination of arginine in dietary supplements. *J. Sci. Food Agric.*, 85, 1217–1221 (2005).
- [19]. J. Csapó, Cs. Albert, K. Lóki, Zs. Csapó-Kiss. Separation and determination of the amino acids by ion exchange column chromatography applying post column derivatization. *Acta Univ. Sapientiae Alimentaria*, 1, 5–29 (2008).
- [20]. V. Gopalakrishnan, P. J. Burton, T. F. Blaschke. High-performance liquid chromatographic assay for the quantitation of L-arginine in human plasma. *Anal. Chem.*, 68(19), 3520–3523 (1996).
- [21]. S. Zinellu, L. Sotgia, C. Carru Deiana. Quantification of arginine and dimethylated arginines in human plasma by field-amplified sample injection capillary electrophoresis UV detection. *Methods Mol. Biol.*, 984, 131–138 (2013).
- [22]. J. Martens-Lobenhoffer, S. M. Bode-Böger. Simultaneous detection of arginine, asymmetric dimethylarginine, symmetric dimethylarginine and citrulline in human plasma and urine applying liquid chromatography–mass spectrometry with very straightforward sample preparation. *J. Chromatogr. B*, 798(2), 231–239 (2003).
- [23]. R. M. de Ordunã. Quantitative determination of L-arginine by enzymatic end-point analysis. *J. Agric. Food Chem.*, 49, 549–552 (2001).
- [24]. M. Kameya, Y. Asano. Rapid enzymatic assays for L-citrulline and L-arginine based on the platform of pyrophosphate detection. *Enzyme Microbial Technol.*, 57, 36–41 (2014).
- [25]. N. Ye. Stasyuk, G. Z. Gayda, L. R. Fayura, Y. R. Boretsky, M. V. Gonchar, A. A. Sibirny. Novel arginine deiminase-based method to assay L-arginine in beverages. *Food Chem.*, 201, 320–326 (2016).
- [26]. N. Stasyuk, G. Gayda, H. Yepremyan, A. Stepien, M. Gonchar. Fluorometric enzymatic assay of L-arginine. *Spectrochim. Acta A*, 170, 184–190 (2017).
- [27]. N. Verma, A. K. Singh, M. Singh. L-arginine biosensors: A comprehensive review. *Biochem. Biophysics Reports*, 12, 228–239 (2017).
- [28]. S. Dzyadevych, N. Jaffrezic-Renault. Conductometric biosensors. *Biological Identification*, 153–193 (2014).
- [29]. O. Saiapina, S. Dzyadevych, Sergei, N. Jaffrezic-Renault, A. Soldatkin. Development and optimization of a novel conductometric bi-enzyme biosensor for L-arginine determination. *Talanta*, 92, 58–64 (2012).
- [30]. S. Misawa, M. Aoshima, H. Takaku, M. Matsumoto, H. Hayashi. High-level expression of Mycoplasma arginine deiminase in Escherichia coli and its efficient renaturation as an anti-tumor enzyme. *Biotechnol.* 36, 145–155 (1994).
- [31]. O. Y. Saiapina, V. M. Pyeshkova, O. O. Soldatkin. Conductometric enzyme biosensors based on natural zeolite clinoptilolite for urea determination. *Materials Science and Engineering: Vol. 31. № 7*, 1490–1497 (2011).
- [32]. L. R. Fayura, Y. R. Boretsky, Y. U. Pynyaha, D. N. Wheatley, A. A. Sibirny. Improved method for expression and isolation of the Mycoplasma hominis arginine deiminase from the recombinant strain of Escherichia coli. *J. Biotechnol.* 167(4), 420–6 (2013).
- [33]. F. W. Studier, B. A. Moffatt. Use of bacteriophage T7 RNA polymerase to direct selective high-level expression of cloned genes. *J. Mol. Biol.* 189(1), 113–130 (1986).

Стаття надійшла до редакції 05.01.2023 р.

UDC 543.06:577.15:543.553

DOI: 10.18524/1815-7459.2023.1.275947

## DEVELOPMENT OF CONDUCTOMETRIC ARGININE-SENSITIVE BIOSENSOR BASED ON ARGININE DEIMINASE

*K. O. Berketa<sup>a</sup>, O. Y. Saiapina<sup>a</sup>, L. R. Fayura<sup>b</sup>, A. A. Sibirny<sup>b,c</sup>, S. V. Dzyadevych<sup>a</sup>, O. O. Soldatkin<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> Laboratory of Biomolecular Electronics, Institute of Molecular Biology and Genetics, National Academy of Sciences of Ukraine, 150 Zabolotnogo Str., 03680, Kyiv, Ukraine

<sup>b</sup> Institute of Cell Biology, National Academy of Science of Ukraine, 14/16 Drahomanov Str., 79005, Lviv, Ukraine

<sup>c</sup> Rzeszow University, Zelwerowicza 4, 35–601 Rzeszow, Poland  
ksenya.berketa.10@gmail.com; osayapina4@gmail.com; fayural@gmail.com;  
sibirny@yahoo.com; dzyad@yahoo.com; soldatkinsasha@gmail.com

### Summary

Arginine is a conditionally irreplaceable amino acid, an active cellular regulator of a number of vital processes. To regulate the level of arginine in the body, bio-additives are used, so there is a need for reliable, fast and affordable quality control methods. Currently, there is a wide range of methods for the quantitative determination of arginine. The methods are effective in application, but have a number of disadvantages: high cost, long pre-treatment of samples, complexity of analysis. To solve these problems, we created a single-enzyme conductometric biosensor based on arginine deiminase for the selective determination of arginine in pharmaceutical samples.

During the research, we selected the optimal method and parameters of enzyme immobilization on the surface of the conductometric transducer; checked the influence of the main parameters of the solution on the functioning of the proposed biosensor based on arginine deiminase, such as the ionic strength of the solution, buffer capacity, pH, temperature, protein concentration in the solution, etc.; conducted a study of the stability of the developed biosensor during use and storage, its selectivity. The last stage was the determination of its analytical characteristics.

Thus, the optimal conditions for immobilization on the surface of the transducer are determined to be immobilization in glutaraldehyde vapors for 30 minutes, while the concentration of the enzyme in the membrane is 88.2 U/ml. The optimal buffer solution for the operation of an arginine-sensitive biosensor is 5 mM phosphate buffer with a pH of 6.2. When checking the selectivity to possible interferences, it was determined that the biosensor is characterized by a slight sensitivity to aspartic and glutamic acids (the reaction of the biosensor is 20%) and a strong sensitivity to ascorbic and citric acids. It is shown that the biosensor is characterized by high reproducibility of results during one day of active operation (RSD= 6,1% for 1.5 mM substrate), as well as good operational stability during two weeks. The best conditions for long-term storage were determined, namely, in a dry state at a temperature of –18 °C. Analytical characteristics of the biosensor developed in the work were analyzed. It was established that the minimum limit of determination of arginine is 2 μM. The linear range is from 20 to 750 μM L-arginine. The sensitivity to L-arginine is 1927 μS/mm. Baseline noise and drift are 1.6 μS/min and 0.72 μS/min, respectively.

Therefore, the developed biosensor can be successfully used for the quantitative determination of L-arginine to control the production process of diabetic supplements containing L-arginine.

**Keywords:** L-arginine, biosensor, conductometric transducer, arginine deiminase, enzyme immobilization

УДК 543.06:577.15:543.553

DOI: 10.18524/1815-7459.2023.1.275947

## РОЗРОБКА КОНДУКТОМЕТРИЧНОГО АРГІНІН-ЧУТЛИВОГО БІОСЕНСОРА НА ОСНОВІ АРГІНІНДЕІМІНАЗИ

*К. О. Беркета<sup>1</sup>, О. Я. Саяпіна<sup>1</sup>, Л. Р. Фаюра<sup>2</sup>, А. А. Сибірний<sup>2,3</sup>,  
С. В. Дзядевич<sup>1</sup>, О. О. Солдаткін<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Інститут молекулярної біології і генетики НАН України  
03680, вул. Заболотного-150, м. Київ, Україна.

<sup>2</sup> Інститут біології клітини НАН України  
79005, вул. Драгоманова 14/16 м. Львів, Україна.

<sup>3</sup> Жешувський університет,  
вул. Зельверовича 4, 35–601, м. Жешув, Польща.

ksenya.berketa.10@gmail.com; osayapina4@gmail.com; fayural@gmail.com;  
sibirny@yahoo.com; dzyad@yahoo.com; soldatkinsasha@gmail.com

### Реферат

Аргінін – умовно незамінна амінокислота, активний клітинний регулятор ряду життєво-важливих процесів. Для регуляції рівня аргініну в організмі використовують біологічно активні добавки та фармацевтичні препарати, тому існує потреба в надійних, швидких і доступних методах контролю їх якості. Наразі існує широкий спектр методів кількісного визначення аргініну. Вони ефективні у застосуванні, але мають ряд недоліків: високу вартість, тривалу попередню обробку проб, складність аналізу. Для вирішення цих проблем ми створили одноферментний кондуктометричний біосенсор на основі аргініндеїмінази для селективного визначення аргініну у фармацевтичних зразках.

В ході дослідження ми підібрали оптимальні метод і параметри іммобілізації ферменту на поверхні кондуктометричного перетворювача; перевірили вплив основних параметрів розчину на функціонування запропонованого біосенсора на основі аргініндеїмінази, таких як іонна сила розчину, буферна ємність, рН, температура, концентрація білку в розчині, тощо; провели дослідження стабільності розробленого біосенсора при використанні та зберіганні, його селективності. Останнім етапом було визначення його аналітичних характеристик.

Так, оптимальними умовами іммобілізації на поверхні перетворювача визначено іммобілізацію в парах глутарового альдегіду протягом 30 хвилин, при цьому концентрація ферменту в мембрані дорівнює 88,2 од.акт./мл. Оптимальний буферний розчин для роботи аргінін-чутливого біосенсора – 5 мМ фосфатний буфер з рН 6,2. При перевірці селективності стосовно можливих інтерферентів визначено, що біосенсор характеризується незначною чутливістю до аспаргінової та глутамінової кислоти (реакція біосенсора – 20%) та сильною чутливістю до аскорбінової та лимонної кислот. Показано, що біосенсор характеризується високою відтворюваністю результатів впродовж одного дня активної роботи (RSD= 6,1% для 1,5 мМ субстрату), а також гарною операційною стабільністю протягом двох тижнів. З'ясовано найкращі умови довгострокового зберігання, а саме – в сухому стані при температурі –18 °С. Проаналізовано аналітичні характеристики розробленого в роботі біосенсора. Встановлено, що мінімальна межа визначення аргініну – 2 мкМ. Лінійний діапазон знаходиться в межах від 20 до 750 мкМ

L-аргініну. Чутливість до L-аргініну становить 1927 мкСм/мМ. Базовий шум і дрейф становлять 1,6 мкСм/хв і 0,72 мкСм/хв відповідно.

Отже, розроблений біосенсор можна з успіхом використовувати для кількісного визначення L-аргініну для контролю фальсифікації або процесу виробництва діабетичних добавок, що містять L-аргінін.

**Ключові слова:** біосенсор, кондуктометричний перетворювач, аргініндеіміназа, аналіз L-аргініну, іммобілізація ферменту

## Відкритий лист науковців України та діаспори

***Минає рік від початку повномасштабного вторгнення Російської Федерації в Україну. Війна набуває довготривалого і надзорського терористичного характеру. Час переглянути роль російської науки у війні та посилити супротив кремлівському режиму на науковому фронті.***

Повномасштабна війна, яку розв'язала Російська Федерація проти України, триває уже майже рік. За підтримки небайдужих з усього світу, які передали та продовжують передавати військову техніку і зброю, надали гуманітарну допомогу, а також ввели економічні і фінансові санкції проти агресора, українцям вдалося вистояти та визволити більшу частину захоплених територій. Величезна подяка всім країнам, політикам і звичайним громадянам, які стали на бік України, активно діють та допомагають!

Війна в Україні є не лише найбільшою війною на території Європи після закінчення Другої світової війни, а й має чітко виражені риси геноциду українського народу. Генеральна прокуратура України розслідує десятки тисяч воєнних злочинів і злочинів проти людяності (див. посилання на першоджерела в<sup>1</sup>). Такі міста, як Буча, Ірпінь та Ізюм стали символами тортур і масових розстрілів цивільного населення.<sup>2</sup> Від початку російського вторгнення офіційно зафіксовано близько 7 тисяч вбивств мирних громадян, включно з дітьми, яких, за даними ООН,<sup>3</sup> на кінець грудня 2022 року було вбито понад 400.

На міжнародній арені дедалі голосніше і впевненіше лунає вимога створення міжнародного трибуналу для засудження воєнних злочинців,<sup>1</sup> як це було зроблено після закінчення Другої світової війни в Нюрнберзі. У листопаді 2022 року Європейська комісія заявила, що Європейський Союз працюватиме над створенням спеціалізованого суду для розслідування та переслідування РФ за злочини.<sup>4</sup> Проте російські правлячі кола залишаються рішуче налаштованими знищити Україну як незалежну державу. Особливо болючим і неприйнятним для українців є той факт, що соціологічні опитування, які періодично проводять серед росіян, свідчать, що абсолютна їх більшість, а саме 74 %, <sup>5</sup> підтримують війну в Україні.

Що стосується науки та освіти, РФ весь цей час докладає максимум зусиль до знищення української науки, бомбардуючи музеї, школи, університети, інститути та наукову інфраструктуру.<sup>6,7</sup> Багато українських науковців загинуло внаслідок воєнних дій, інші – змушені були емігрувати.<sup>8</sup> Різко скоротилася можливість нашої держави підтримувати наукові дослідження.<sup>9</sup> Багато країн започаткували численні програми щодо підтримки українських науковців в Україні та тих, що хто опинився за кордоном, тікаючи від російських бомб та ракет. Немає меж нашої вдячності за цю допомогу! Але ця допомога не вирішує саму проблему, а лише пом'якшує наслідки російського вторгнення. Глибинна причина полягає в кремлівському терористичному режимі, який милітаризує всі сфери життя, у тому числі й науку.

---

<sup>1</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/War\\_crimes\\_in\\_the\\_2022\\_Russian\\_invasion\\_of\\_Ukraine](https://en.wikipedia.org/wiki/War_crimes_in_the_2022_Russian_invasion_of_Ukraine)

<sup>2</sup> <https://www.ohchr.org/en/press-releases/2022/12/un-report-details-summary-executions-civilians-russian-troops-northern>

<sup>3</sup> <https://www.ohchr.org/en/news/2022/12/ukraine-civilian-casualty-update-26-december-2022>

<sup>4</sup> <https://www.washingtonpost.com/world/2022/11/30/eu-russia-ukraine-tribunal-war-crimes/>

<sup>5</sup> <https://www.understandingwar.org/backgrounder/russian-offensive-campaign-assessment-december-3>

<sup>6</sup> <https://www.science.org/content/article/hero-city-crippled-russian-attacks-ukraine-s-science-hotbed-refuses-give>

<sup>7</sup> <https://www.science.org/content/article/out-ashes-near-chornobyl-war-scarred-town-plans-nuclear-research-revival>

<sup>8</sup> <https://www.science.org/content/article/ukraine-s-mounting-death-toll-includes-growing-number-researchers>

<sup>9</sup> <https://svit.kpi.ua/2022/11/15/українська-наука-виклики-війни-потре/>

## Наука не поза політикою, наукові санкції потрібні

Усім відомі твердження: "наука поза політикою", "наука не має кордонів". У нинішніх обставинах із цим неможливо погодитися. Ми, як науковці, хочемо підкреслити неочевидну, проте вагомую роль російської науки в цій страшній війні.

По-перше, наука стала особливо важливою з огляду на той факт, що війна набирає затяжного характеру<sup>10</sup> і РФ продовжує інтенсивно посилювати свій оборонно-промисловий комплекс, використовуючи найновіші наукові досягнення. Наука є опорним стовпом технологій, без яких неможливо виготовляти зброю. В університетах і науково-дослідних лабораторіях готують висококваліфіковану робочу силу для відповідних підприємств. **У часи війни наука також стає зброєю.**

По-друге, не забуваймо, що сучасна війна – це не просто війна на полі бою. Це війна за думки і почуття людей. Медійна складова науки відіграє дуже важливу роль. Кожна нова стаття, в якій засвідчена афіліація Російської Федерації, кожна наукова презентація, зроблена "під прапором" РФ, демонструє, що країна-агресор, країна-терорист і надалі є повноправним членом наукової міжнародної спільноти. Це створює видимість нормальності та неявного прийняття смерті та руйнувань, що завдаються Україні та її громадянам. Але насправді РФ послідовно намагається знищити міжнародне право і повернути в сучасний світ "право сильного". Для російських лідерів наука є потужним інструментом для досягнення цієї мети.<sup>11</sup> Відразу після вторгнення РФ в Україну, Російський союз ректорів підписав спільну заяву про повну підтримку Путіна і всіх його дій.<sup>12</sup>

Тому **наукові санкції є такими ж доречними і необхідними, як і економічні**, накладені коаліцією країн, відданих справі миру. Наукові санкції повинні бути запроваджені демократичними силами вільного світу для стримування зростаючої агресії РФ.

Ми твердо переконані, що так само, як олімпійським спортсменам заборонено виступати під російським прапором, науковцям дослідницьких центрів Російської Федерації недопустимо брати участь у форумах, які забезпечують світовий обмін ідеями та інформацією. Подяки за державні гранти РФ також мають бути заборонені, оскільки підтримують режим, який веде і фінансує війну, вбиваючи, катуючи, гвалтуючи та депортуючи мирних людей. Такі заборони повністю відповідають постановам Європейського Союзу<sup>13</sup> та Конгресу Сполучених Штатів Америки.<sup>14</sup>

З перших днів російського вторгнення науковці в Україні та за її межами звертаються із закликами до міжнародної спільноти щодо накладення санкцій на російську науку.<sup>15,16,17</sup> Уже чимало зроблено на законодавчому рівні Європейського Союзу та національних рівнях.<sup>15,18,19,20</sup> Неодноразово організатори конференцій забороняли участь доповідачів з РФ і Білорусі. Добрим прикладом є безкомпромісний підхід Federation of European Biochemical Societies,<sup>21</sup> European Magnetism Association<sup>22</sup> та найбільшої європейської конференції з магнетизму Joint European Magnetic Symposia.<sup>23</sup> Перші кроки до бойкоту російської науки також здійснили провідні наукові

<sup>10</sup> <https://www.france24.com/en/live-news/20221216-putin-planning-for-a-long-war-in-ukraine-nato-chief>

<sup>11</sup> <https://ria.ru/20230208/putin-1850583456.html>

<sup>12</sup> <https://rsr-online.ru/news/2022/3/4/obrashenie-rossijskogo-soyuza-rektorov/>

<sup>13</sup> [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/RC-9-2022-0482\\_EN.html](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/RC-9-2022-0482_EN.html)

<sup>14</sup> <https://www.congress.gov/bills/117th-congress/senate-resolution/623/text>

<sup>15</sup> <http://anvsu.org.ua/2023/02/>

<sup>16</sup> <https://www.timeshighereducation.com/blog/russian-universities-must-suffer-tougher-sanctions>

<sup>17</sup> <https://www.nature.com/articles/d41586-022-00601-w>

<sup>18</sup> [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_22\\_1544](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_1544)

<sup>19</sup> <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurzmeldungen/de/2022/03/weitere-zusammenarbeit-mit-russland-belarus.html>

<sup>20</sup> <https://serwisy.gazetaprawna.pl/edukacja/artykuly/8387053,polskie-uczelnie-zawieszaja-wspolprace-naukowa-z-rosja.html>

<sup>21</sup> <https://www.febs.org/news/further-statement-from-febs-on-the-russia-ukraine-war/>

<sup>22</sup> <https://magnetism.eu/news/185/38-news.htm>

<sup>23</sup> <https://jems2022.pl>

видавництва.<sup>24</sup> Деякі журнали взагалі відмовились від розгляду рукописів, написаних вченими, що працюють в наукових закладах РФ.<sup>25</sup> Ми переконані, що ці практики повинні ширитися, а санкції щодо російської науки посилюватися.

Ми закликаємо редакційні колеги наукових журналів, організаторів міжнародних конференцій і лідерів наукових організацій:

- не приймати до розгляду наукові публікації, афілійовані з РФ, у будь-які наукові журнали або збірники конференцій;
- припинити всі передплати наукових установ РФ на будь-яку наукову літературу;
- припинити доступ наукових установ РФ до міжнародної дослідницької інфраструктури, у технічних ч. до наукового устаткування та наукових баз даних;
- заборонити продаж наукових приладів та витратних матеріалів до РФ;
- позбавити наукові організації РФ та пов'язаних із ними осіб доступу до будь-якого міжнародного фінансування наукових досліджень.

### **Внесок кожного важливий!**

Політичні процеси в суспільстві, як правило, дуже інертні. На рішучі кроки урядів країн часто доводиться дуже довго чекати. Тому надзвичайно ефективною є ініціатива знизу. Уже зараз у руках свідомих і відповідальних науковців (у Ваших руках!) є можливість долучитися до боротьби проти ворога і вплинути на якнайшвидше завершення кривавої війни та покарання агресора. Є багато варіантів дій:

- якщо Вам на рецензію приходить стаття з Російської Федерації, Ви завжди можете відмовитися від рецензування. Посилайтеся на цей відкритий лист та аргументуйте своє рішення небажанням сприяти нормалізації «образу» країни-агресора;
- уникайте спільних публікацій разом із ученими російських наукових установ та будь-яких візитів до них. Не підтримуйте російський режим своїм авторитетом;
- якщо на міжнародній конференції Ви стали свідком наукової доповіді, афілійованої з РФ, можете демонстративно покинути аудиторію, як це неодноразово робили політики та спортсмени різних країн під час виступів представників РФ.

Ми пишемо цього листа в час війни, коли люди змушені ставати на чийсь бік і бути або холодними, або гарячими, коли залишатися осторонь означає стати на бік агресора. Війна колись закінчиться. І в мирний час наукова співпраця з РФ може бути відновлена. Але це стане можливим тільки після повного виведення російських окупаційних військ з усієї міжнародно визнаної території України, припинення бойових дій і докорінної зміни політики РФ у напрямку мирного співіснування та дотримання фундаментальних прав та свобод людини. Лише тоді наука та наукова співпраця працюватимуть на вирішення глобальних проблем людства, а наукові здобутки слугуватимуть виключно мирним цілям, як до цього закликали Нобелівські лауреати відразу після початку війни.<sup>26</sup> Але до того часу обставини вимагають від кожного вирішити, як реагувати на війну. Дії, які ми пропонуємо, спрямовані проти інституцій агресора. Ми щиро закликаємо вас розглянути їх і зробити свій внесок у боротьбу проти війни і терору.

**Якщо Ви підтримуєте цей лист, підписатися можна [тут](#).**

**Повний список науковців, які підтримують лист, можна побачити [тут](#).**

---

<sup>24</sup> <https://mailchi.mp/4851e2a74119/joint-publisher-statement>

<sup>25</sup> <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-molecular-structure/about/announcements>

<sup>26</sup> <https://www.mpg.de/peace-declaration-nobel-prize-laureates>



## Список підписантів листа (в алфавітному порядку)

Іван Авруцький	Професор, директор програми, інженерний факультет, Університет Вейн, Мічиган, США
Віра Агеєва	Доктор філологічних наук, професор Національного університету "Києво-Могилянська Академія"
Ігор Анісімов	Доктор фізико-математичних наук, професор, академік Академії наук вищої школи України, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, президент Українського фізичного товариства
Віль Бакіров	Професор Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна
Ольга Бандровська	Доктор філологічних наук, професор кафедри світової літератури, Львівський національний університет імені Івана Франка
Лариса Барабан	Завідувач відділу у науково-дослідницькому центрі імені Гельмгольца міста Дрездена, Німеччина
Оксана Білоус	Доктор фізико-математичних наук, доцент, дослідниця у Віденському університеті, Австрія
Дмитро Божко	Професор факультету фізики та енергетичних наук, Університет Колорадо в Колорадо Спрінгс, США
Людмила Борковська	Доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу сенсорних систем Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України
Ірина Вавилова	Доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент НАН України, Завідувач відділу Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України
Віталій Васючка	Кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, факультет фізики, Університет Кайзерслаутерн-Ландау в м. Кайзерслаутерн, Німеччина
Анатолій Веклич	Доктор фізико-математичних наук, професор, Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Євген Венгер	Доктор фізико-математичних наук, професор, член-кореспондент НАН України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, керівник відділу сенсорних систем Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України
Роман Верба	Доктор фізико-математичних наук, завідувач відділу, Інститут магнетизму, Київ
Олексій Верхратський	Доктор біологічних наук, професор нейрофізіології Манчестерського університету, Велика Британія; член Європейської академії наук, член Німецької національної академії Леопольдина, член Національної академії наук Іспанії, член Національної академії фармацевтики Іспанії, член Польської академії наук
Станіслав Вільчинський	Доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри квантової теорії поля та космофізики, Київський національний університет імені Тараса Шевченка; голова Національного Фонду Досліджень України
Ростислав Влох	Доктор фізико-математичних наук, професор, директор Інституту фізичної оптики, Львів
Ольга Гаращук	Доктор біологічних наук, професорка, голова департаменту нейрофізіології Інституту фізіології Тюбінгенського університету, Німеччина; дійсний член Європейської академії наук (Academia Europaea); президентка Німецько- українського академічного товариства; віце-президентка Німецького фізіологічного товариства

Юрій Гененко	Доктор фізико-математичних наук, професор Інституту Матеріалознавства Технічного Університету Дармштадт, Німеччина
Юрій Глеба	Доктор біологічних наук, професор, академік НАН України, дійсний член Європейської академії наук (Academia Europaea), член Німецької національної академії Леопольдина та Академії наук Литви, головний виконавчий директор Nomad Bioscience GmbH, Мюнхен, Німеччина
Анатолій Глущенко	Професор, директор Центру передових технологій та оптичних матеріалів, Університет Колорадо в Колорадо Спрінгс, США
Юрій Гогоці	Доктор технічних наук, директор Інституту наноматеріалів Університету Дрекслея, м. Філадельфія, США; професор кафедри наноелектроніки та модифікації поверхні Сумського державного університету
Олександр Головка	Доктор історичних наук, старший науковий співробітник Інституту української археографії і джерелознавства НАН України, академік Академії наук вищої школи України
Олена Гомонай	Доктор фізико-математичних наук, Університет Йоханеса Гутенберга, Майнц, Німеччина
Віктор Грінченко	Доктор фізико-математичних наук, професор, академік НАН України, почесний академік Академії наук вищої школи України, Інститут гідромеханіки НАН України
Ігор Гук	Доктор медичних наук, професор, Віденський медичний університет, Відень, Австрія; іноземний член НАН України, член Європейської академії наук і мистецтв
Надія Гула	Доктор біологічних наук, професор, член-кореспондент НАН та НАМН України, головний науковець Інституту біохімії ім. О. В. Палладіна НАН України
Костянтин Гуслієнко	Професор Університету Країни Басків, Іспанія
Галина Довбешко	Доктор фізико-математичних наук, професор, Інститут фізики НАН України
Ірина Жабченко	Доктор медичних наук, професор, завідувач відділенням патології вагітності та пологів ДУ "ІПАГ ім. акад. О.М. Лук'янової НАМНУ"
Микола Жулинський	Доктор філологічних наук, професор, директор Інституту літератури ім. Т. Г. Шевченка НАН України, академік НАН України
Анатолій Загородній	Доктор фізико-математичних наук, професор, президент НАН України
Володимир Іваниця	Доктор біологічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, академік Академії наук вищої школи України, проректор Одеського національного університету імені І. І. Мечнікова
Віталій Іванов	Кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник інституту фізики Польської Академії Наук, Варшава, Польща
Гліб Каказей	Доктор фізико-математичних наук, провідний науковий співробітник факультету наук Університету Порто, Португалія
Сергій Квіт	Доктор філологічних наук, професор, президент Національного університету "Києво-Могилянська академія"
Максим Коваленко	Професор Федеральної вищої технічної школи Цюриха (ETH Zurich), Швейцарія, лауреат Werner Prize, Ruziska Prize, Dan Maydan Prize
Олексій Колежук	Доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент НАН України, професор Київського національного університету імені Тараса Шевченка, голова Наукового комітету Національної ради України з питань розвитку науки і технологій
Олександр Коломис	Кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України

Лада Коломієць	Доктор філологічних наук, професор, академік Академії наук вищої школи України, Київський національний університет імені Тараса Шевченка / Дартмутський коледж, США
Сергій Комісаренко	Доктор біологічних наук, професор, академік НАН і НАМН України, академік-секретар НАН України, директор Інституту біохімії ім. О.В.Палладіна НАН України
Олександр Кривчіков	Доктор фізико-математичних наук, професор, провідний науковий співробітник, Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України
Олексій Ладохін	Доктор біологічних наук, професор, Медична Школа Канзаського Університету, США
Христина Левченко	PhD., науковий співробітник, факультет фізики, Віденський університет, Австрія
Ярослав Лепіх	Доктор фізико-математичних наук, професор, академік Академії наук вищої школи України, директор Міжвідомчого науково-навчального фізично-технічного центру МОН України і НАН України при ОНУ імені І. І. Мечнікова
Вадим Локтев	Доктор фізико-математичних наук, професор, академік-секретар Відділення фізики і астрономії НАН України
Денис Макаров	Завідувач відділу у науково-дослідницькому центрі імені Гельмгольца міста Дрездена, Німеччина
Сергій Мамикін	Завідувач відділу, заступник директора з наукової роботи Інституту фізики напівпровідників НАН України
Ганна Морозовська	Доктор фізико-математичних наук, провідний науковий співробітник Інституту фізики НАН України
Юрій Найдюк	Доктор фізико-математичних наук, професор, член-кореспондент НАН України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, директор Фізико-технічного інституту низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України
Олександр Наконечний	Доктор фізико-математичних наук, професор, президент АН вищої школи України
Анатолій Опанасюк	Доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри електроніки і комп'ютерної техніки Сумського державного університету
Георгій Папакін	Доктор історичних наук, професор, директор Інституту української археографії та джерелознавства ім. М. С. Грушевського НАН України, академік Академії наук вищої школи України
Анатолій Пінчук	Професор факультету фізики та енергетичних наук університету Колорадо в Колорадо Спрінгс, США
Максим Погорелов	Доктор медичних наук, професор, начальник Центру біомедичних досліджень Сумського державного університету, науковий співробітник лабораторії оптичних біосенсорів та функціональних наноматеріалів Латвійського університету, Рига, Латвія
Людмила Приступа	Доктор медичних наук, професор, завідувач кафедри внутрішньої медицини з центром респіраторної медицини Сумського державного університету
Олександр Прокопенко	Доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри, Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Олександр Пронкевич	Доктор філологічних наук, професор, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, Миколаїв
Іван Проценко	Доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри електроніки, загальної та прикладної фізики Сумського державного університету, заслужений діяч науки і техніки України

Сергій Рябченко	Доктор фізико-математичних наук, професор, член-кореспондент НАН України, голова Ідентифікаційного комітету з питань науки
Рада Савкіна	Доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України; професор, Національний університет "Києво-Могилянська Академія"
Володимир Садівничий	Доктор наук із соціальних комунікацій, професор, завідувач кафедри журналістики та філології Сумського державного університету
Олександр Серга	Приват-доцент, доктор фізико-математичних наук, габілітований доктор, старший науковий співробітник, факультет фізики, Університет Кайзерслаутерн-Ландау в м. Кайзерслаутерн, Німеччина
Ростислав Серга	Аспірант, факультет фізики, Віденський університет, Австрія
Наталя Старченко	Доктор історичних наук, старший науковий співробітник Інституту української археографії і джерелознавства НАН України
Леонід Суходуб	Член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри біофізики, біохімії, фармакології і біомолекулярної інженерії Сумського державного університету
Валерій Степанков	Доктор історичних наук, професор, завідувач кафедри всесвітньої історії Кам'янець-Подільського університету імені І. Огієнка
Максим Стріха	Доктор фізико-математичних наук, професор, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, перший віце-президент АН вищої школи України
Наталія Татарин	Науковий співробітник, Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України
Олександр Товстолиткін	Доктор фізико-математичних наук, професор, директор Інституту магнетизму, Київ
Наталія Торкут	Доктор філологічних наук, професор, академік Академії наук вищої школи України, Запорізький національний університет
Роман Химин	Кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник Інституту фізики Гетеборзького університету, Швеція
Ярослав Церковняк	Професор, Університет Каліфорнії в Лос-Анджелесі, США
Олександр Чередниченко	Доктор філологічних наук, професор, академік Академії наук вищої школи України, Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Анатолій Чорноус	Доктор фізико-математичних наук, професор, проректор з наукової роботи Сумського державного університету
Андрій Чумак	Габілітований доктор, професор факультету фізики Віденського університету, Австрія
Тетяна Шестопалова	Доктор філологічних наук, професор, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, Миколаїв
Галина Щербата	Професор, кандидат біологічних наук, Інститут біохімії клітини, Медичний Університет міста Ганновера, Ганновер, Німеччина
Володимир Щербатий	Доцент, кандидат медичних наук, Медичний Університет міста Ганновера, Ганновер, Німеччина
Максим Ярема	Професор Федеральної вищої технічної школи Цюриха (ETH Zurich), Швейцарія
Оксана Яструбчак	Старший науковий співробітник, Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України
Ярослав Яцків	Доктор фізико-математичних наук, академік НАН України, директор Головної астрономічної обсерваторії НАН України

## An open letter from scientists of Ukraine and diaspora

***One year had passed since the Russian Federation launched a full-scale invasion of Ukraine. The war is becoming long-lasting and even more brutal. Now is the time to reassess the role of Russian science in supporting the war and strengthen the resistance to Kremlin's regime on the science front.***

The full-scale war unleashed by the Russian Federation against Ukraine will soon enter its second year. With the help of allies around the world, donated military equipment, and provided humanitarian aid, as well as imposed economic and financial sanctions against the aggressor, Ukrainians have managed to withstand the initial attack and liberate large swathes of its territory. We are thankful to all countries, political leaders, and ordinary citizens who have taken the side of Ukraine and extended their helping hand!

What is happening in Ukraine is not just the largest war in Europe since the end of World War II. There is clear evidence of genocide perpetrated against the Ukrainians. The General Prosecutor's Office of Ukraine is investigating tens of thousands of war crimes and crimes against humanity (see links to original sources in<sup>1</sup>). Towns of Bucha, Irpin, and Izium have become symbols of torture and mass executions of civilians.<sup>2</sup> At the end of December 2022, the United Nations organization<sup>3</sup> officially verified the killings of about 7,000 civilians. This number includes more than 400 children.

There is a growing worldwide demand for establishing an international court to convict war criminals,<sup>1</sup> following the precedence set at the end World War II in Nuremberg. In November 2022, the European Commission announced that the European Union would work to establish a special court to investigate and prosecute Russia for the crime of aggression.<sup>4</sup> At the same time, the Russian ruling elites remain determined to destroy Ukraine as an independent state. Particularly painful for Ukrainians is the fact that opinion polls conducted periodically among ordinary Russians show that an absolute majority, namely 74%,<sup>5</sup> support the war in Ukraine.

When it comes to science and education, the Russian Federation is making every effort to destroy them by bombing museums, schools, universities, laboratories, and scientific infrastructure.<sup>6,7</sup> Many Ukrainian scientists have already been killed,<sup>8</sup> others were forced to emigrate. The state's ability to support research has sharply decreased.<sup>9</sup> A large number of countries launched programs to support scientists who stayed in Ukraine and those who have been forced to flee from Russian bombs and missiles. There are no limits to our gratitude for these efforts! But, unfortunately, this help cannot solve the problem and rather mitigates the consequences of the Russian invasion. The root cause lies in the Kremlin's terroristic regime and its weaponization of so many functions of normal human life. In particular, we are talking about science.

---

<sup>1</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/War\\_crimes\\_in\\_the\\_2022\\_Russian\\_invasion\\_of\\_Ukraine](https://en.wikipedia.org/wiki/War_crimes_in_the_2022_Russian_invasion_of_Ukraine)

<sup>2</sup> <https://www.ohchr.org/en/press-releases/2022/12/un-report-details-summary-executions-civilians-russian-troops-northern>

<sup>3</sup> <https://www.ohchr.org/en/news/2022/12/ukraine-civilian-casualty-update-26-december-2022>

<sup>4</sup> <https://www.washingtonpost.com/world/2022/11/30/eu-russia-ukraine-tribunal-war-crimes/>

<sup>5</sup> <https://www.understandingwar.org/backgrounders/russian-offensive-campaign-assessment-december-3>

<sup>6</sup> <https://www.science.org/content/article/hero-city-crippled-russian-attacks-ukraine-s-science-hotbed-refuses-give>

<sup>7</sup> <https://www.science.org/content/article/out-ashes-near-chornobyl-war-scarred-town-plans-nuclear-research-revival>

<sup>8</sup> <https://www.science.org/content/article/ukraine-s-mounting-death-toll-includes-growing-number-researchers>

<sup>9</sup> <https://svit-kpi-ua.translate.google.com/2022/11/15/українська-наука-виклики-війни-потре/> (English Translation)

## Science is not beyond politics, scientific sanctions are needed

It is often said that "science is beyond politics" and "science has no borders". In the current circumstances, it is impossible to agree with these idealized statements. As a scientific community, we would like to emphasize the concealed but significant role of Russian science in this terrible war.

First, science is especially important as the war has become protracted,<sup>10</sup> and Russia is launching a massive campaign to keep its military-industrial complex up to the task. This effort is based on the newest scientific advances. Science is the backbone of technology, and without technology, it is impossible to produce advanced weaponry. A highly qualified workforce for military technology efforts is being trained at universities and research laboratories. ***In times of war, science itself becomes a weapon.***

Second, let's not forget that modern warfare is not just a war on the battlefield: it is as much a ***war for people's hearts and minds***. In that, the media component of science plays a very important role. Every new article showing an affiliation from Russian Federation, and every scientific presentation made "under the Russian flag" demonstrates that, despite its military aggression, Russia is still an accepted member of the international community. It provides a patina of normalcy and implied acceptance of the death and destruction being inflicted upon Ukraine and its citizens. But in truth, Russia is trying to destroy international law and bring back the rule of the strongest into the modern world. For Russian leaders, science is nothing more than a powerful tool used to achieve this goal.<sup>11</sup> Immediately after Russia's invasion of Ukraine, the Russian Union of Rectors signed a joint statement of full support for President Putin and all his actions.<sup>12</sup>

Thus, ***scientific sanctions are as appropriate and necessary as the economic sanctions*** that have been put in place by a coalition of nations committed to peace. Scientific sanctions should be implemented by the democratic forces of the free world to curb the growing aggression.

We firmly believe that similar to how Olympic athletes are banned to compete under the Russian flag, scientists affiliated with research centers in Russian Federation should not be allowed to participate in the fora that support the world-wide exchange of ideas and information. This embargo would apply to scientific publications, participation in international conferences, research programs, etc. – all forms of scientific activity. Acknowledgments of support from state grants awarded by Russian Federation should also be banned because they legitimize the regime responsible for the war and innumerable people killed, tortured, raped, deported, and displaced. Such bans will be fully consistent with the resolutions of the European Union<sup>13</sup> and the Congress of the United States of America.<sup>14</sup>

Since the first days of the Russian invasion, scholars in Ukraine and abroad have been calling on the international community to impose sanctions on Russian science.<sup>15,16,17</sup> Many such regulations have been made at the legislative level of the European Union and national levels.<sup>15,18,19,20</sup> In some cases, conference organizers have banned speakers affiliated with the Russian Federation and Belarus. A prominent example is the uncompromising approach of the Federation of European Biochemical Societies,<sup>21</sup> the European Magnetism Association,<sup>22</sup> and the largest European magnetism conference

---

<sup>10</sup> <https://www.france24.com/en/live-news/20221216-putin-planning-for-a-long-war-in-ukraine-nato-chief>

<sup>11</sup> <https://ria.ru/20230208/putin-1850583456.html> (English Translation)

<sup>12</sup> <https://rsr-online.ru/news/2022/3/4/obraschenie-rossijskogo-soyuz-a-rektorov/>

<sup>13</sup> [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/RC-9-2022-0482\\_EN.html](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/RC-9-2022-0482_EN.html)

<sup>14</sup> <https://www.congress.gov/bills/117/congress/senate/resolution/623/text>

<sup>15</sup> <http://anvsu.org.ua/2023/02/> (English Translation)

<sup>16</sup> <https://www.timeshighereducation.com/blog/russian-universities-must-suffer-tougher-sanctions>

<sup>17</sup> <https://www.nature.com/articles/d41586-022-00601-w>

<sup>18</sup> [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_22\\_1544](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_1544)

<sup>19</sup> <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurzmeldungen/de/2022/03/weitere-zusammenarbeit-mit-russland-belarus.html>

<sup>20</sup> <https://serwisy.gazetaprawna.pl/edukacja/artykuly/8387053,polskie-uczelnie-zawieszaja-wspolprace-naukowa-z-rosja.html>

<sup>21</sup> <https://www.febs.org/news/further-statement-from-febs-on-the-russia-ukraine-war/>

<sup>22</sup> <https://magnetism.eu/news/185/38-news.htm>

– the Joint European Magnetic Symposium.<sup>23</sup> The first steps to boycott Russian science have already been taken by leading scientific publishers.<sup>24</sup> Some journals have refused to consider submissions with an author of any nationality based at a Russian Federation institution.<sup>25</sup> We are convinced that these practices should be spread, and sanctions against Russian science should be strengthened.

We appeal to journal editorial boards, conference organizers, and general academic leadership to:

- not accept scientific publications affiliated with Russian Federation institutions and/or funding agencies to scientific journals and conference proceedings;
- terminate all subscriptions of institutions in Russian Federation to scientific literature;
- ban access of Russian Federation institutions to international research infrastructure, including scientific equipment and scientific databases;
- ban on sales of scientific equipment and supplies to Russian Federation;
- deprive Russian Federation scientific organizations and their affiliates of access to any international research funding.

### **Everyone's contribution is important**

Political processes in society are usually inert. It often takes time for governments to take decisive steps. In such situations, a bottom-up approach can be a good complement. Right now, responsible scientists (including you!) have an opportunity to join their efforts and contribute to a speedy end of this bloody war and a victory over the aggressor. There are many actions that will have an impact:

- if you receive an article with a Russian Federation affiliation or grant acknowledgment for review, you can refuse to review it. Please refer to this open letter and feel free to explain your decision by an unwillingness to normalize the image of the aggressor country;
- you can avoid joint publications with and any visits to Russian academic institutions. Do not let your credentials support the Russian regime;
- if you witness a scientific talk by a Russian Federation-affiliated organization at an international conference, you can demonstratively leave the room. Politicians and athletes from different countries have repeatedly done that during Russian presentations at international venues;

We write this letter in a time of war – a time when people have to take sides and be either cold or hot. Staying neutral regarding an unprovoked war of aggression can be viewed as tacitly supporting the aggressor. Someday the war will end. And, in the time of peace, scientific cooperation with Russia can be restored. However, peace will become possible only after the complete withdrawal of Russian occupation forces from the entire internationally recognized territory of Ukraine, the cessation of hostilities, and a fundamental change in Russian policy towards coexistence with other nations and respect for fundamental human rights and freedoms. Only then will scientific collaboration work to solve the global problems of humanity, and only then will scientific achievements serve exclusively peaceful purposes, as Nobel laureates called for immediately after the outbreak of the war.<sup>26</sup> But, until then, everyone will be forced by the current circumstances to decide how to react to the ongoing struggle. The actions we suggest are directed against the institutions of the aggressor. We sincerely urge you to consider them and contribute to the fight against war and terror.

**If you support this letter, you can sign [here](#).**

**You can see the full list of people who support the letter [here](#).**

---

<sup>23</sup> <https://jems2022.pl>

<sup>24</sup> <https://mailchi.mp/4851e2a74119/joint-publisher-statement>

<sup>25</sup> <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-molecular-structure/about/announcements>

<sup>26</sup> <https://www.mpg.de/peace-declaration-nobel-prize-laureates>

**List of signatories to the letter (in alphabetical order)**

Vira Ageyeva	Prof., D.Sc. in Philology, National University “Kyiv Mohyla Academy”, Kyiv, Ukraine
Igor Anisimov	Prof., D.Sc. in Physics and Mathematics, Academician of the Higher School Academy of Sciences of Ukraine, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine; President of Ukrainian Physical Society
Ivan Avrutsky	Assoc. Prof., Electrical and Computer Engineering, Physics and Astronomy, Wayne State University, Detroit, MI, USA Graduate Program Director, Electrical and Computer Engineering
Vil Bakirov	Prof., D.Sc. in Sociology, Kharkiv Vasyl Karazin National University, Ukraine
Olha Bandrovskya	Dr. Sci. in Philology, Professor of World Literature Department, Ivan Franko National University of Lviv, Ukraine
Larysa Baraban	Dr., Head of Department, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Dresden, Germany
Oksana Bilous	D.Sc. in Physics and Mathematics, Researcher, Computational and Soft Matter Physics, Faculty of Physics, University of Vienna, Austria
Lyudmyla Borkovska	D.Sc. in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Leading Scientist of the Department of Sensor Systems, V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Dmytro Bozhko	Prof. Dr., Department of Physics and Energy Science, University of Colorado at Colorado Springs, USA
Oleksandr Cherednychenko	Prof., D.Sc. in Philology, Academician of the Higher School Academy of Sciences of Ukraine, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine
Anatoliy Chornous	Prof., D.Sc. in Physics and Mathematics, Vice-Rector for Scientific Work, Sumy State University, Sumy, Ukraine
Andrii Chumak	Univ.-Prof., Dr. habil., Faculty of Physics, University of Vienna, Austria
Galyna Dovbeshko	D.Sc. in Physics and Mathematics, Prof., Institute of Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Olga Garaschuk	Prof., D.Sc. in Biology, Chair of the Department of Neurophysiology, Institute of Physiology, University of Tübingen, Germany; Elected Member of Academia Europaea; President of the German-Ukrainian Academic Society; Vice president of the German Physiological Society
Yuri Genenko	Prof. Dr., D.Sc. in Physics and Mathematics, Institute of Materials Science, Technical University of Darmstadt, Germany
Yuri Gleba	Prof., Dr. Habil., D.Sc. in Biology, CEO, Nomad Bioscience GmbH, Munich, Germany, Academician of the National Academy of Science of Ukraine, Elected Member of Academia Europaea, Member of the German National Academy of Sciences Leopoldina, Member of the Lithuanian Academy of Sciences
Anatoliy Glushchenko	Prof. of Physics, Director, Center for Advanced Technologies & Optical Materials, University of Colorado at Colorado Springs, USA
Yury Gogotsi	Prof., D.Sc., Department of Nanoelectronics and Modification Surface, Sumy State University, Ukraine; Charles T. and Ruth M. Bach Distinguished University Professor Director, A.J. Drexel Nanomaterials Institute, USA



Olena Gomonay	Prof., D.Sc. in Physics and Mathematics, Johannes Gutenberg University of Mainz, Germany
Nadiya Gula	Prof., D.Sc. in Biology, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine and National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Chief Researcher, O. V. Palladin Institute of Biochemistry, Kyiv, Ukraine
Kostyantyn Gusliyenko	Research Professor, Ph.D., University of the Basque Country, Spain
Olexandr Holovko	D.Sc. in History, Senior Researcher, M. S. Hrushevsky Institute of Ukrainian Archaeography and Source Studies National Academy of Science on Ukraine, Academician of Higher School Academy of Sciences of Ukraine
Viktor Hrinchenko	Prof., D.Sc. in Physics and Mathematics, Academician of the National Academy of Science of Ukraine, Academician Honoris Causa of the Higher School Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Hydromechanics, National Academy of Science of Ukraine
Ihor Huk	Em. Univ. Prof. Dr. - Medical University of Vienna, Foreign Member of the Ukrainian Academy of Sciences, Member of the European Academy of Sciences and Arts
Vitalii Ivanov	Dr., Reseascher, Institute of Physics Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland
Volodymyr Ivanytsia	Prof., D.Sc. in Biology, Corresponding member of the National Academy of Science of Ukraine, Academician of the Higher School Academy of Sciences of Ukraine, Vice-Rector, Illya Mechnikov Odesa National University, Ukraine
Glib Kakazei	Dr., Faculty of Sciences, University of Porto, Portugal
Roman Khymyn	Dr., Researcher, Department of Physics, University of Gothenburg, Sweden
Oleksiy Kolezhuk	Prof., D.Sc., Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Head of the Scientific Committee of the National Council of Ukraine on Science and Technology Development
Lada Kolomiyets	Prof., D.Sc. in Philology, Academician of the Higher School Academy of Sciences of Ukraine, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine / Dartmouth College, USA
Oleksandr Kolomys	Ph.D., Senior Researcher, V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Serhiy Komisarenko	Prof., D.Sc., Member of the National Academy of Sciences of Ukraine and National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Academician-Secretary, National Academy of Sciences of Ukraine, Director, O. V. Palladin Institute of Biochemistry, Kyiv, Ukraine
Maksym Kovalenko	Prof., Dr., ETH Zurich, Switzerland, Werner Prize, Ruziska Prize, Dan Maydan Prize
Alexander Krivchikov	Prof., D.Sc. in Physics and Mathematics, Leading Researcher of the B.I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine
Sergiy Kvit	Prof., D.Sc. in Philology, President of National University "Kyiv Mohyla Academy", Kyiv, Ukraine
Alexey Ladokhin	Prof., D.Sc. in Biology, Biochemistry and Molecular Biology, University of Kansas Medical School, USA

Yaroslav Lepich	Prof., D.Sc. in Physics and Mathematics, Academician of the Higher School Academy of Sciences of Ukraine, Director of Research and Tutorial Center of the Ministry of Education and Science of Ukraine and National Academy of Sciences of Ukraine at I. Mechnikov Odesa National University
Khrystyna Levchenko	Dr., Faculty of Physics, University of Vienna, Austria
Vadym Loktiev	Prof., D.Sc. in Physics and Mathematics, Academic Secretary of the Department of Physics and Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine
Denys Makarov	Dr., Head of Department, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Dresden, Germany
Sergii Mamykin	Dr., Head of Department, Vice-Director of V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Anna Morozovska	D.Sc. in Physics and Mathematics, Leading Scientific Researcher, Institute of Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Yurii Naidyuk	Prof., D.Sc. in Physics and Mathematics, Corresponding member of the National Academy of Science of Ukraine, Laureate of the State Prize of Ukraine in Science and Technology; Director of the B.I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine
Oleksandr Nakonechniy	Prof., D.Sc. in Physics and Mathematics President of the Higher School Academy of Sciences of Ukraine
Anatoliy Opanasyuk	Prof., D.Sc. in Physics and Mathematics, Head of the Department of Electronics and Computer Technology, Sumy State University, Ukraine
Heorhii Papakin	Prof., D.Sc. in History, Director of M. S. Hrushevsky Institute of Archaeography and Source Studies National Academy of Science of Ukraine, Academician of Higher School Academy of Sciences of Ukraine
Anatoliy Pinchuk	Prof., Department of Physics and Energy Science, University of Colorado at Colorado Springs, USA; Director of the Center for Plasmonics, Nanophotonics and Metamaterials
Maksym Pogorielov	Prof., D.Sc. in Medical Science, Head of Biomedical Research Centre, Sumy State University, Ukraine; Researcher in Laboratory of Optical Biosensors and Functional Nanomaterials, University of Latvia
Oleksandr Prokopenko	Prof. D.Sc. in Physics and Mathematics, Chair, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine
Oleksandr Pronkevych	Prof., D.Sc., Black Sea Petro Mohyla National University, Mykolayiv, Ukraine
Ivan Protsenko	Prof., D.Sc. in Physics and Mathematics, Head of the Department of Electronics, General and Applied Physics, Sumy State University, Ukraine; Honored Worker of Science and Technology of Ukraine
Liudmyla Prystupa	Prof., D.Sc. in Medical Sciences, Head of the Department of Internal Medicine with Respiratory Medicine Center, Sumy State University, Ukraine
Sergiy Ryabchenko	Prof., D.Sc. in Physics and Mathematics, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Head of Identification Committee for Science of Ukraine
Volodymyr Sadivnychy	Prof., D.Sc. in Social Communications, Head of the Department of Journalism and Philology, Sumy State University, Ukraine

Rada Savkina	D.Sc., Senior Researcher, V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine; Prof. at National University "Kyiv Mohyla Academy", Kyiv, Ukraine
Oleksandr Serha (a.k.a. Alexander Serga)	Priv.-Doz. Dr. habil., D.Sc. in Physics and Mathematics, Department of Physics, University of Kaiserslautern-Landau, Kaiserslautern, Germany
Rostyslav Serha	Ph.D. Student, Faculty of Physics, University of Vienna, Austria
Halyna Shcherbata	Prof., D.Sc. in Genetics, Institute of Cell Biochemistry, Hannover Medical School, Hannover, Germany
Volodymyr Shcherbatyy	Univ.-Doz., Dr. med. dent., Hannover Medical School, Hannover, Germany
Tetiana Shestopalova	Prof. D.Sc. in Philology, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolayiv, Ukraine
Natalia Starchenko	Prof. D.Sc. in History, Senior Researcher of M. S. Hrushevsky Institute of Ukrainian Archaeography and Source Studies National Academy of Science of Ukraine
Valeriy Stepankov	Prof., D.Sc. in History, Director of the Department of World History, Kamianets-Podilskyj University, Ukraine
Maksym Strikha	Prof., D.Sc. in Physics and Mathematics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine; First Vice-President Higher School Academy of Sciences of Ukraine
Leonid Sukhodub	Prof., D.Sc. in Physics and Mathematics, Head of the Department Biophysics, Biochemistry, Pharmacology and Biomolecular Engineering, Sumy State University, Ukraine; Corresponding Member of the National Academy of Science of Ukraine
Nataliia Tatoryn	V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Nataliya Torkut	Prof., D.Sc. in Philology, Academician of the Higher School Academy of Sciences of Ukraine, Zaporizhzhia National University, Ukraine
Oleksandr Tovstolytkin	Prof., D.Sc. in Physics and Mathematics, Director of the Institute of Magnetism, Kyiv, Ukraine
Yaroslav Tserkovnyak	Prof., Dr., University of California (UCLA), Los Angeles, USA
Vitaliy Vasyuchka	Dr., Senior Scientist, Department of Physics, University of Kaiserslautern-Landau, Kaiserslautern, Germany
Iryna Vavilova	D.Sc. in Physics and Mathematics, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Head of Department of the Main Astronomical Observatory of the National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Anatolii Veklych	Prof., D.Sc. in Physics and Mathematics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine
Yevgen Venger	Prof. D.Sc. in Physics and Mathematics, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Laureate of the State Prize of Ukraine in Science and Technology; Head of the Department of Sensor Systems, V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Roman Verba	D.Sc. in Physics and Mathematics, Department Chair, Institute of Magnetism, Kyiv, Ukraine

Alexei Verkhratsky	Prof. of Neurophysiology, D.Sc., Member of Academia Europaea, Member of the German National Academy of Sciences Leopoldina, Member of Real Academia Nacional de Farmacia of Spain, Member of Polish Academy of Sciences; The University of Manchester, UK
Stanislav Vilchinskii	Prof., D.Sc., Ph.D., Head of National Research Foundation of Ukraine, Head of Quantum Field Theory and Comomicrophysics Department Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine
Rostyslav Vloch	Prof., D.Sc. in Physics and Mathematics, Director of Institute of Physical Optics, Lviv, Ukraine
Maksym Yarema	Prof., Dr., ETH Zurich, Switzerland
Oksana Yastrubchak	Dr., V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Yaroslav Yatskiv	D.Sc., Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Director of the Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine
Anatoly Zagorodny	Prof., D.Sc. in Physics and Mathematics, President of the National Academy of Sciences of Ukraine
Iryna Zhabchenko	Prof., Dr. of Philosophy & Medicine, Head of the Department of Pathology of Pregnancy and Childbirth, State University "Institute of Pediatrics, Obstetrics and Gynecology named after Acad. O.M. Lukyanova National Academy of Sciences of Ukraine"
Mykola Zhulynsky	Prof., D.Sc. in Philology, Director of the Shevchenko Institute of Literature of the National Academy of Sciences of Ukraine, Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine

## ІНФОРМАЦІЯ ДЛЯ АВТОРІВ. ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ У ЖУРНАЛ

Журнал «Сенсорна електроніка і мікросистемні технології» публікує статті, короткі повідомлення, листи до Редакції, а також коментарі, що містять результати фундаментальних і прикладних досліджень, за наступними напрямками:

1. Фізичні, хімічні та інші явища, на основі яких можуть бути створені сенсори
2. Проектування і математичне моделювання сенсорів
3. Сенсори фізичних величин
4. Оптичні, оптоелектронні і радіаційні сенсори
5. Акустоелектронні сенсори
6. Хімічні сенсори
7. Біосенсори
8. Наносенсори (фізика, матеріали, технологія)
9. Матеріали для сенсорів
10. Технологія виробництва сенсорів
11. Сенсори та інформаційні системи
12. Мікросистемні та нанотехнології (MST, LIGA-технологія та ін.)
13. Деградація, метрологія і сертифікація сенсорів

Журнал публікує також замовлені огляди з актуальних питань, що відповідають його тематиці, поточну інформацію – хроніку, персоналії, платні рекламні повідомлення, оголошення щодо конференцій.

Основний текст статті повинен відповідати вимогам Постанови Президії ВАК України від 15.01.2003 р. № 7–05/1 (Бюлетень ВАК України 1, 2003 р.) і бути структурованим. Матеріали, що надсилаються до Редакції, повинні бути написані з максимальною ясністю і чіткістю викладу тексту. У поданому рукописі повинна бути обґрунтована актуальність розв'язуваної задачі, сформульована мета дослідження, міститися оригінальна частина і висновки, що забезпечують розуміння суті отриманих результатів і їх новизну. Автори повинні уникати необґрунтованого введення нових термінів і вузькопрофільних жаргонних висловів.

Редакція журналу просить авторів при направленні статей до друку керуватися наступними правилами:

1. Рукописи повинні надсилатися у двох примірниках українською або англійською мовою і супроводжуватися файлами тексту і малюнків на CD. Рукописи, які пропонуються авторами з України або країн СНД до видання англійською мовою обов'язково доповнюються україномовною або російськомовною версією. Електронна копія може бути надіслана електронною поштою.
2. Прийнятні формати тексту: MS Word (rtf, doc, docx).
3. Прийнятні графічні формати для рисунків: EPS, TIFF, BMP, PCX, WMF, MS Word і MS Graf, JPEG. Рисунки, які створені за допомогою програмного забезпечення для математичних і статистичних обчислень, повинні бути перетворені до одного з цих форматів.
4. На статті авторів з України мають бути експертні висновки про можливість відкритого друку.

### Рукописи надсилати за адресою:

Лепіх Ярослав Ілліч,  
Заст. гол. редактора,  
Одеський національний університет  
імені І. І. Мечникова, МННФТЦ (НДЛ-3),  
вул. Дворянська, 2,  
Одеса, 65082, Україна.

Телефон / факс +38(048) 723–34–61,  
E-mail: [semst-journal@onu.edu.ua](mailto:semst-journal@onu.edu.ua),  
<http://semst.onu.edu.ua>

Здійснюється анонімне рецензування рукописів статей.

## Правила підготовки рукопису:

Рукописи повинні супроводжуватися офіційним листом, підписаним керівником установи, де була виконана робота. Це правило не стосується робіт представлених авторами із закордону чи міжнародними групами авторів.

Авторське право переходить Видавцю.

Титульний аркуш:

1. PACS і Універсальний Десятковий Код Класифікації (УДК) (для авторів із країн СНД) – у верхньому лівому куті. Допускається декілька відділених комами кодів. Якщо ніякі коди класифікації не позначені, код(и) буде(-уть) визначено Редакційною Колегією.

2. Назва роботи (по центру, прописними літерами, шрифт 14pt, жирно).

3. Прізвище (-а) автора(-ів) (по центру, шрифт 12pt).

4. Назва установи, повна адреса, телефони і факси, e-mail для кожного автора, нижче, через один інтервал, окремим рядком (по центру, шрифт 12pt).

5. Анотація: до 1000 символів.

6. Ключові слова: їхня кількість не повинна перевищувати восьми слів. В особливих випадках можна використовувати терміни з двома – чи трьома словами. Ці слова повинні бути розміщені під анотацією і написані тією самою мовою.

П.п. 2,3,4,5,6 послідовно викласти українською та англійською мовами.

Для авторів з закордону, які не володіють українською мовою, пп. 2–5 викладаються англійською мовою.

7. До кожного примірника статті додаються реферати українською та англійською мовами (кожен реферат на окремому аркуші). Особливу увагу слід приділяти написанню резюме статті англійською мовою. Для цього доцільно користуватися послугами кваліфікованих спеціалістів-лінгвістів з подальшим науковим редагуванням тексту автором(-ами). Перед словом «реферат» необхідно написати повну назву статті відповідною мовою, УДК, прізвища та ініціали авторів, назви установ.

Реферат обсягом 200–250 слів має бути структурованим: мета (чітко сформульована), методи дослідження, результати дослідження (стисло), узагальнення або висновки.

Після тексту реферату з абзацу розміщуються ключові слова.

8. Текст статті повинен бути надрукований через 1,5 інтервали, на білому папері формату А4. Поля: зліва – 3см, справа – 1,5см, вверху і знизу – 2,5см. Шрифт 12pt. Підзаголовки, якщо вони є, повинні бути надруковані прописними літерами, жирно.

Рівняння повинні бути введені, використовуючи MS Equation Editor або MathType. Роботи з рукописними вставками не приймаються. Таблиці повинні бути представлені на окремих аркушах у форматі відповідних текстових форматів (див. вище), чи у форматі тексту (з колонками, відділеними інтервалами, комами, крапкам з комою, чи знаками табулювання).

9. У кінці тексту статті указати прізвища, імена та по батькові усіх авторів, поштову адресу, телефон, факс, e-mail (для кореспонденції).

10. Список літератури повинен бути надрукований через 1,5 інтервали, з літературою, пронумерованою в порядку її появи в тексті. Бібліографія друкується лише латиницею (кирилиця подається в транслітерації). Порядок оформлення літератури повинен відповідати вимогам ВАК України, наприклад:

[1]. I. M. Cidilkovskii. *Elektrony i dyrki v poluprovodnikah*. Nauka, M. 450 s. (1972).

[2]. J. A. Hall. *Imaging tubes*. Chap. 14 in *The Infrared Handbook*, Eds. W. W. Wolfe, G. J. Zissis, pp. 132–176, ERIM, Ann Arbor, MI (1978).

[3]. N. Blutzer, A. S. Jensen. *Current readout of infrared detectors* // *Opt. Eng.*, 26(3), pp. 241–248 (1987).

11. Підписи до рисунків і таблиць повинні бути надруковані в рукописі з двома пробілами після списку літератури. Виносок, якщо можливо, бажано уникати.

Приймаються тільки високоякісні рисунки. Написи і символи повинні бути надруковані усередині рисунку. Негативи, слайди, і діапозитиви не приймаються.

Кожен рисунок повинен бути розташований у тексті статті після посилання на нього та мати розмір, що не перевищує 160x200 мм. Для тексту на рисунках використовуйте шрифт 10pt. Одиниці виміру повинні бути позначені після коми (не в круглих дужках). Усі рисунки повинні бути пронумеровані в порядку їх появи в тексті, з частинами позначеними як (а), (б), і т. д. Розміщення номерів рисунків і напису усередині малюнків не дозволяються.

Кольоровий друк можливий, якщо його вартість сплачується авторами чи їх спонсорами.

12. Стаття має бути підписана автором (усіма авторами) з зазначенням дати на останній сторінці.

Автори несуть повну відповідальність за бездоганне мовне оформлення тексту, особливо за правильну наукову термінологію (її слід звіряти за фаховими термінологічними словниками).

13. Датою надходження статті вважається день, коли до редколегії надійшов остаточний варіант статті після рецензування.

Після одержання коректури статті автор повинен виправити лише помилки (чітко, синьою

або чорною ручкою неправильно закреслити, а поряд з цим на полі написати правильний варіант) і терміново відіслати статтю на адресу редколегії електронною поштою.

Підпис автора у кінці статті означає, що автор передає права на видання своєї статті редакції. Автор гарантує, що стаття оригінальна; ні стаття, ні рисунки до неї не були опубліковані в інших виданнях.

Відхилені статті не повертаються.

#### *ДО УВАГИ АВТОРІВ*

*Міжнародна агенція ISSN встановила скорочену назву нашого журналу  
«Sens. elektron. mikrosist. tehnol.»*

*Просимо Вас у своїх посиланнях і бібліографічних даних статей використовувати саме таку назву оскільки по ній буде здійснюватися посилання на Вашу статтю.*

# INFORMATION FOR AUTHORS

## THE REQUIREMENTS

### ON PAPERS PREPARATION

---

---

Journal «Sensor Electronics and Microsystems Technologies» publishes articles, brief messages, letters to Editors, and comments containing results of fundamental and applied researches, on the following directions:

1. Physical, chemical and other phenomena, as the bases of sensors
2. Sensors design and mathematical modeling
3. Physical sensors
4. Optical, optoelectronic and radiation sensors
5. Acoustoelectronic sensors
6. Chemical sensors
7. Biosensors
8. Nanosensors (physics, materials, technology)
9. Sensor materials
10. Sensors production technologies
11. Sensors and information systems
12. Microsystems and nano- technologies (MST, LIGA-technologies et al.)
13. Sensor's degradation, metrology and certification

The journal publishes the custom-made reviews on actual questions appropriate to the mentioned subjects, current information – chronicle, special papers devoted to known scientists, paid advertising messages, conferences announcements.

The basic article text should meet the SAC Ukraine Presidium Decree requirements from 15.01.2003 № 7-05/1 (SAC Bulletin № 1, 2003) and be structured. The materials sent to Editors, should be written with the maximal text presentation clearness and accuracy. In the submitted manuscript the actuality of problem should be reflected, the purpose of the work should be formulated. It must contain an original part and conclusions providing the received

results essence and their novelty understanding. The authors should avoid the new terms and narrowprofile jargon phrase unreasonable introduction.

Journal Edition asks authors at a direction of articles in a print to be guided by the following rules:

1. Manuscripts should be submitted in duplicate in Ukrainian or English, a hard copy and supplemented with a text file and figures on a CD. Manuscripts which are offered by authors from Ukraine or CIS countries to the edition in English are necessarily supplemented by Ukrainian or Russian version. An electronic copy may be submitted by e-mail.
2. Acceptable text formats: MS Word (rtf, doc, docx).
3. Acceptable graphic formats for figures: EPS, TIFF, BMP, PCX, CDR, WMF, MS Word and MS Graf, JPEG. Figures created using software for mathematical and statistical calculations should be converted to one of these formats.
4. For articles of authors from Ukraine there should be expert conclusions about an opportunity of an open print.

#### **Manuscripts should be sent to:**

Lepikh Yaroslav Illich,  
The Vice Editor, Odesa National  
I. I. Mechnykov University, ISEPTC (RL-3),  
str. Dvoryanskaya, 2, Odesa,  
65082, Ukraine.

**Phone/fax** +38(048) 723-34-61,  
**E-mail:** semst-journal@onu.edu.ua,  
**http://**semst.onu.edu.ua

*Manuscripts of articles anonymous reviewing  
is carried out*



### The manuscript preparation rules:

The manuscripts should be supplemented with the Official letter signed by a chief manager of the institution where the work was performed. This rule does not apply to papers submitted by authors from abroad or international groups of authors.

Copyright transfer to the Publisher.

Title Page:

1. PACS and Universal Decimal Classification code (for authors from CIS) in the top left corner. Several comma-separated codes are allowed. If no classification codes are indicated, the code(s) will be assigned by the Editorial Board.

2. Title of the paper (central, capital, bold, 14pt).

3. Name (–s) of the author(–s) below, in one space (central, normal face, 12pt).

4. Name of affiliated institution, full address, phone and fax numbers, e-mail addresses (if available) for each author below, in one space (central, normal face, 12pt).

5. Abstract: up to 1000 characters.

6. Keywords: its amount must not exceed eight words. In the specific cases it is acceptable to use two- or three-word terms. These words must be placed under the abstract and written in the same language.

Items 2,3,4,5,6 must be presented in series in Ukrainian and English languages.

For authors from abroad which do not know Ukrainian languages, items 2–5 may be present only in English.

7. To each copy of the article abstracts in Ukrainian and the English language are applied (each abstract on a separate sheet). The special attention should be given to the writing of the article summary in English. For this purpose it is expedient to use the qualified experts – linguists with the further scientific editing the text by the author (–s). Before the word “abstract” it is necessary to write the full article name by the appropriate language, UDC, surnames and the initials of the authors, names of affiliated institutions. The abstract in volume of 200–250 words must be structured: the purpose (precisely formulated), research methods and results (shortly), generalizations or conclusions. After the text of the abstract from the item key words are placed.

8. Article text should be printed 1,5-spaced on white paper A4 format with a 12pt, margins: left – 3sm, right – 1,5, upper and lower – 2,5sm. Titles of the sections if it is present should be typed bold, capitals.

Equations should be entered using MS Equation Editor or MathType. Papers with handwritten equations are not accepted. Notations should be defined when the first appearing in the text.

Tables should be submitted on separate pages in the format of appropriate text formats (see above), or in the text format (with columns separated by interval, commas, or tabulation characters).

9. At the article text end one must indicate surnames, names and patronymics of all authors, the mail address, the phone, a fax, e-mail (for the correspondence).

10. List of references should be 1,5-spaced, with references numbered in order of their appearance in the text. The bibliography is printed only by the roman type (cyrillics represents in transliteration).

The literature registration order should conform to DAS of Ukraine requirements, for ex-ample:

[1]. I. M. Cidilkovskii. *Elektrony i dyrki v poluprovodnikah*. Nauka, M. 450 s. (1972).

[2]. J.A. Hall. Imaging tubes. Chap. 14 in *The Infrared Handbook*, Eds. W.W. Wolfe, G.J. Zissis, pp. 132–176, ERIM, Ann Arbor, MI (1978).

[3]. N. Blutzer, A. S. Jensen. Current readout of infrared detectors // *Opt. Eng.*, 26(3), pp. 241–248 (1987).

11. Figures and tables captions should be printed in the manuscript double-spaced after the list of references. Footnotes should be avoided if possible.

Only high-quality pictures can be accepted. Inscriptions and symbols should be printed inside picture. Negatives, and slides are not accepted.

Each figure should be printed on a separate page and have a size not exceeding 160x200 mm. For text inside figures, use 10pt. Measurement units should be indicated after a comma (not in blankets). All figures are to be numbered in order of its appearance in the text, with sections denoted as (a), (b), etc. Placing the figure numbers and captions inside figures is not allowed.

Color printing is possible if its cost is covered by the authors or their sponsors.

12. The article must be signed by author (all authors) with the date indication on the last page.

Authors bear full responsibility for irreproachable language make out of the text, especially for a correct scientific terminology (it should be verified under terminological dictionaries of the appropriate speciality).

13. The date of article acceptance is that one when the final variant comes to the publisher after a prepublication review.

After obtaining the proof sheet the author should correct mistakes (clearly cancel incorrect variant with blue or black ink and put the correct variant on border) and send urgently the revised variant to the editor by e-mail.

Author's signature at the article end vouches that author grants a copyright to the publisher. Author vouches that the work has not been published elsewhere, either completely, or in part and has not been submitted to another journal.

Not accepted manuscripts will not be returned.

***TO AUTHOR ATTENTION***

*International agency ISSN has established our Journal shortcut –  
«Sens. elektron. mikrosist. tehnol.»*

*We ask you in your references and article bibliographic dates  
use such name as on it the reference to your article will be carried out.*

*Комп'ютерна верстка – В. Вітвицька*

Підписано до друку 28.03.2023 р. Формат 60×84/8.  
Ум.-друк. арк. 8,84. Тираж 50 прим.  
Зам. № 2562.

**Видавець і виготовлювач**  
**Одеський національний університет імені І. І. Мечникова**

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4215 від 22.11.2011 р.

Україна, 65082, м. Одеса, вул. Єлісаветинська, 12  
Тел.: (048) 723 28 39