

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Серія «Хімічна інженерія, екологія  
та ресурсозбереження»

Збірник наукових праць

*Виходить чотири рази на рік  
Заснований у липні 2007 року*

№ 2 (22) – 2023

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2023

Засновник, редакція та видавець –  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Свідоцтво про державну реєстрацію  
КВ № 23146-12986ПР від 08.02.2018

ISSN 2617-9741

*Рекомендовано Вченою радою Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
(протокол № 6 від 05 червня 2023 року)*

**Мови видання:** українська, англійська

**Головний редактор:** ПАНОВ Євген Миколайович, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна  
**Заступники головного редактора:** ГОМЕЛЯ Микола Дмитрович, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна  
ЖУЧЕНКО Анатолій Іванович, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна  
ЩЕРБИНА Валерій Юрійович, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна

**Члени редакційної колегії:**

ANTONYUK Sergiy	Technische Universitat Kaiserslautern, Germany
АТАМАНЮК Володимир	Національний університет "Львівська політехніка", Україна
БІДЮК Петро	КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна
ЧАРНИЙ Дмитро	Інститут геохімії навколишнього середовища НАНУ, Україна
DRONOVA Iryna	University of California at Berkeley, USA
FIALOVA Simona	Brno University of Technology, Czech Republic
ГОНДЛЯХ Олександр	КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна
HOSSEINZADEH Siamak	University of Pretoria, South Africa
KAFAROV Viatcheslav	Industrial University of Santander, Colombia
КАРВАЦЬКИЙ Антон	КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна
KENIG Eugeny	Paderborn University, Germany
KHAN Anish	King Abdulaziz University, Saudi Arabia
КОРНІЄНКО Богдан	КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна
КОРНІЄНКО Ярослав	КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна
КУПІН Андрій	Криворізький національний університет, Україна
KURC Beata	Poznan University of Technology, Poland
LIJEWSKI Piotr	Poznan University of Technology, Poland
MARIN Guy	Belgium Ghent University, Belgium
MAXIMOV Jordan	Technical University of Gabrovo, Bulgaria
МІКУЛЬОНОК Ігор	КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна
ОСАДЧИЙ Сергій	Центральноукраїнський національний технічний університет, Україна
ПЕТРУК Василь	Вінницький національний технічний університет, Україна
POLYUSHKIN Dmitry	Vienna University of Technology, Austria
SAKHAROV Volodymyr	University of Zielona Gora, Poland
ШАБЛІЙ Тетяна	КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна
СІВЕЦЬКИЙ Володимир	КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна
СКЛАБІНСЬКИЙ Всеволод	Сумський державний університет, Україна
СНЕЖКИН Юрій	Інститут технічної теплофізики НАНУ, Україна
ТАРАСЕНКО Юрій	Інститут хімії поверхні ім. О. О. Чуйка НАНУ, Україна

ТРОХИМЕНКО Ганна	Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Україна
ULLAH Atta	Institute of Engineering and Applied Sciences, Pakistan
VAN GEEM Kevin	Belgium Ghent University, Belgium
ВОЛОЩУК Володимир	КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна
YABLONSKY Gregory	Saint Louis University, USA
ЯКУБ Лідія	Одеська національна академія харчових технологій, Україна

**Відповідальний секретар:** ВЕМБЕР Валерія Володимирівна, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна

**Технічний секретар:** НОСАЧОВА Юлія Вікторівна, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна

**Адреса редакції і видавця:** Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".  
Address: 37, Prosp. Peremohy, Kyiv, Ukraine, 03056,  
Tel.: +380 (67) 442-10-79.  
E-mail: vvember@gmail.com

**Надруковано:** Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".

Свідоцтво про державну реєстрацію: Серія ДК № 5354 від 28.05.2017 р., просп. Перемоги, 37, 03056, Київ

Підп. до друку 31.07.2023. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>18</sub>. Папір офс. Гарнітура Times.  
Спосіб друку – електрографічний. Ум. друк. арк. 10,69. Обл.-вид. арк. 8,06. Наклад 30 пр.  
Зам. № 23-057.

Видавництво «Політехніка», КПІ ім. Ігоря Сікорського, вул. Політехнічна, 14, корп. 15  
м. Київ 03056, тел. (044) 204-81-78

*Орфографію авторів статей збережено*

**Журнал включено до категорії "Б" Переліку наукових фахових видань України за спеціальностями:** 161 Хімічні технології та інженерія; 133 Галузеве машинобудування; 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології; 101 Екологія (відповідно до наказів МОНУ № 1643 від 28.12.2019 р. та № 409 від 17.03.2020 р).

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023

National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

BULLETIN OF NATIONAL TECHNICAL  
UNIVERSITY OF UKRAINE  
«IGOR SIKORSKY KYIV POLYTECHNIC  
INSTITUTE»

Series «Chemical engineering, ecology  
and resource saving»

Collection of scientific papers

*Published: since July 2007*

*Frequency: quarterly*

No. 2 (22) – 2023

Kyiv  
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute  
2023

Founder, Editor and Publisher –  
National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Certificate of State Registration  
KB № 23146-12986ПП 08.02.2018

ISSN 2617-9741

*Recommended by the University Senate of the National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"  
(Protocol No. 6 of June 05, 2023)*

**Publication languages:** Ukrainian, English

**Editor in Chief:** Yevgen PANOV, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine  
**Deputy Editors-in-Chief:** Mykola GOMELYA, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine  
Anatoliy ZHUCHENKO, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine  
Valeriy SCHERBINA, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine

**Editorial Team:**

Sergiy ANTONYUK	Technische Universitat Kaiserslautern, Germany
Volodymyr ATAMANYUK	Lviv Polytechnic National University, Ukraine
Petro BIDYUK	Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
Dmytro CHARNYI	Institute of Environmental Geochemistry of NASU, Ukraine
Iryna DRONOVA	University of California at Berkeley, USA
Simona FIALOVA	Brno University of Technology, Czech Republic
Aleksandr GONDLYAKH	Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
Siamak HOSSEINZADEH	University of Pretoria, South Africa
Viatcheslav KAFAROV	Industrial University of Santander, Colombia
Anton KARVATSKII	Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
Eugeniy KENIG	Paderborn University, Germany
Anish KHAN	King Abdulaziz University, Saudi Arabia
Yaroslav KORNIENKO	Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
Bohdan KORNIYENKO	Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
Andrey KUPIN	Kryvyi Rih National University, Ukraine
Beata KURC	Poznan University of Technology, Poland
Piotr LIJEWSKI	Poznan University of Technology, Poland
Guy MARIN	Belgium Ghent University, Belgium
Jordan MAXIMOV	Technical University of Gabrovo, Bulgaria
Ihor MIKULIONOK	Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
Sergei OSADCHY	Central Ukrainian National Technical University, Ukraine
Vasil PETRUK	Vinnitsia National Technical University, Ukraine
Dmitry POLYUSHKIN	Vienna University of Technology, Austria
Volodymyr SAKHAROV	University of Zielona Gora, Poland
Tetyana SHABLIY	Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
Volodymyr SIVETSKII	Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
Vsevolod SKLABINSKYI	Sumy State University, Ukraine
Yurii SNEZHKIN	Institute of Engineering Thermophysics of NASU, Ukraine
Yurii TARASENKO	Chuiko Institute of Surface Chemistry of NASU, Ukraine

Ganna TROKHYMENKO	Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ukraine
Atta ULLAH	Institute of Engineering and Applied Sciences, Pakistan
Kevin VAN GEEM	Belgium Ghent University, Belgium
Volodymyr VOLOSHCHUK	Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
Gregory YABLONSKY	Saint Louis University, USA
Lydia YAKUB	Odessa National Academy of Food Technologies, Ukraine

**Executive Secretary:** Valeriia VEMBER, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine

**Technical Secretary:** Yuliia NOSACHOVA, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine

**Editorial and publisher address:** National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".  
Address: 37, Prosp. Peremohy, Kyiv, Ukraine, 03056,  
Tel.: +380 (67) 442-10-79.  
E-mail: vvember@gmail.com

**Printed:** National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"  
Series DK No. 5354 of 28.05.2017, 37, Prosp. Peremohy, Kyiv, Ukraine,

Certificate of State Registration: 03056

Підп. до друку 31.07.2023. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>18</sub>. Папір офс. Гарнітура Times.  
Спосіб друку – електрографічний. Ум. друк. арк. 10,69. Обл.-вид. арк. 8,06. Наклад 30 пр.  
Зам. № 23-057.

Видавництво «Політехніка», КПІ ім. Ігоря Сікорського, вул. Політехнічна, 14, корп. 15  
м. Київ 03056, тел. (044) 204-81-78

*The spelling of the articles' authors is given unchanged*

**The journal is included to the category "B" of the List of scientific professional publications of Ukraine by specialties:** 161 Chemical technologies and engineering; 133 Industrial engineering; 151 Automation and computer-integrated technologies; 101 Ecology (according to the orders of the Ministry of Education and Science No. 1643 of 28.12.2019 and No. 409 of 17.03.2020).

© Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2023