



НУВГП



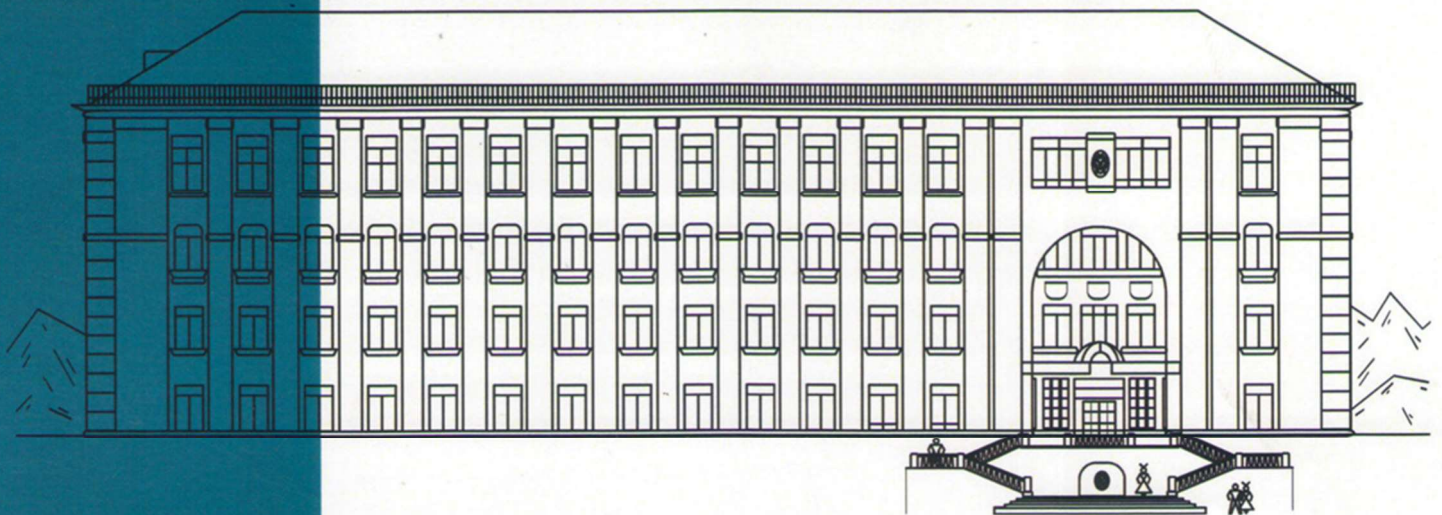
Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

*присвячена 60-річчю кафедри  
будівельних, дорожніх та  
меліоративних машин*

# ЗБІРНИК ТЕЗ КОНФЕРЕНЦІЇ

ШОСТА  
ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА  
ІНТЕРНЕТ-КОНФЕРЕНЦІЯ  
«ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗВИТКУ  
МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ЕФЕКТИВНОГО  
ФУНКЦІОНУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ  
СИСТЕМ»

*27-28 ЛИСТОПАДА 2025 року*



Рівне 2025

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**

*присвячена 60-річчю кафедри  
будівельних, дорожніх та меліоративних машин*

**ШОСТА ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА  
ІНТЕРНЕТ-КОНФЕРЕНЦІЯ  
«ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗВИТКУ МАШИНОБУДУВАННЯ ТА  
ЕФЕКТИВНОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ»**

**27–28 Листопада 2025 р.**

**РІВНЕ – 2025**

Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем. Матеріали тез доповідей.

Національний університет водного господарства та природокористування, 27–28 листопада 2025 року

---

УДК 621:656.13:347.763:378:001.895

I–66

**Рецензенти:**

**Савіна Н. Б.**, проректорка з наукової роботи та міжнародних зв'язків Національного університету водного господарства та природокористування, д.е.н., професорка;

**Сорока В. С.**, проректор з науково-педагогічної та навчальної роботи Національного університету водного господарства та природокористування, к.с.-г.н., доцент;

**Марчук М. М.**, професор кафедри автомобілів та автомобільного господарства Національного університету водного господарства та природокористування, к.т.н., професор;

**Кравець С. В.**, професор кафедри будівельних, дорожніх та меліоративних машин Національного університету водного господарства та природокористування, д.т.н., професор.

*Рекомендовано вченою радою*

*Національного університету водного господарства та природокористування.*

*Протокол № 13 від 18 грудня 2025 р.*

Відповідальний за випуск:

*Тхорук Є. І.*, к.т.н., доцент, в.о. завідувача кафедри будівельних, дорожніх та меліоративних машин Національного університету водного господарства та природокористування.

**I–66** Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем : збірник тез VI Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції 27–28 листопада 2025 р. [Електронне видання]. – Рівне : НУВГП, 2025. – 380 с.

**ISBN 978-966-327-675-5**

Збірник тез конференції об'єднує наукові праці, що розглядають останні досягнення в інноваціях машинобудування, транспортних системах і логістиці. Основні теми включають новітні технології в машинобудуванні та транспорті, оптимізацію транспортних систем і логістичних процесів, підвищення безпеки дорожнього руху, а також розробки в конструюванні та експлуатації автомобільного транспорту. Роботи, представлені в збірнику, пропонують нові підходи до розв'язання актуальних проблем, що стосуються ефективного функціонування транспорту, та є корисними для науковців, інженерів і практиків та всіх, хто зацікавлений у розвитку інноваційних технологій у галузі транспорту та машинобудування.

**УДК 621:656.13:347.763:378:001.895**

**ISBN 978-966-327-675-5**

© Національний університет водного господарства та природокористування, 2025

---

УДК 656.02:620.3:621.762

## УДОСКОНАЛЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕМЕНТІВ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ ЗА РАХУНОК ЗАСТОСУВАННЯ НАНОКОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ДІОКСИДУ ЦИРКОНІЮ

**Геворкян Едвін, Нерубацький Володимир, Комарова Ганна**

*Український державний університет залізничного транспорту  
майдан Оборонний вал, 7, м. Харків, 61050*

Ефективне функціонування сучасних транспортних систем, особливо високошвидкісних та великовантажних, нерозривно пов'язане з якістю та надійністю їхніх критичних конструктивних елементів. Вимоги до довговічності, стійкості до зносу, високих температур та агресивних середовищ у транспортному машинобудуванні постійно зростають, що висуває на перший план необхідність розробки інноваційних матеріалів. У цьому контексті, керамічні матеріали, зокрема на основі діоксиду цирконію ( $ZrO_2$ ), набувають стратегічного значення. Кераміка  $ZrO_2$ , частково стабілізована оксидом ітрію ( $Y_2O_3$ ), є одним із небагатьох матеріалів, що поєднує надзвичайно високу твердість з унікальною тріщиностійкістю, обумовленою механізмом трансформаційного зміцнення [1; 2]. Це явище полягає в локальному фазовому переході тетрагональної фази  $ZrO_2$  у моноклінну під дією напружень, що створює стискаюче поле перед вершиною тріщини і ефективно перешкоджає її поширенню. Удосконалення транспортних технологій вимагає не просто більш міцних, а й багатофункціональних матеріалів, здатних ефективно працювати як в умовах інтенсивного тертя та зносу (наприклад, у підшипникових вузлах транспортного обладнання та фрикційних механізмах), так і в умовах високих теплових градієнтів (наприклад, у високотемпературних двигунах та енергетичних установках). Забезпечення надійності транспортних вузлів та елементів інфраструктури є прямою умовою для оптимізації логістичних процесів [3; 4]. Тому, стратегічно важливою є розробка керамічних наноконкомпозитів, які дозволяють керувати цими властивостями за рахунок введення нанорозмірних добавок, таких як оксид алюмінію ( $Al_2O_3$ ), монокарбід вольфраму (WC) та карбід кремнію (SiC). Ці добавки дозволяють контролювати кінцеву мікроструктуру, стабілізувати критичні фази та створювати матеріали з градієнтними характеристиками [5; 6]. Оптимізація властивостей  $ZrO_2$ -кераміки за рахунок використання інноваційних технологій синтезу, таких як електроконсолідація, є наріжним каменем у створенні нового покоління елементів для критичних вузлів транспортної техніки та інфраструктурних систем.

Традиційні полікристалічні матеріали на основі  $ZrO_2$  часто демонструють обмеження щодо одночасного поєднання надвисокої твердості та пластичності [7; 8]. Введення нанодобавок є ефективним методом управління мікроструктурою та властивостями керамічних наноконкомпозитів [9–11]. У контексті інноваційного машинобудування для транспортних систем, підвищення експлуатаційної надійності, зносостійкості та термічної стійкості елементів має вирішальне значення, що робить актуальним дослідження порівняльного впливу різних нанодобавок на властивості частково стабілізованого  $ZrO_2$ . Метою даної роботи є проведення порівняльного аналізу впливу різних нанодобавок ( $Al_2O_3$ , WC, SiC) на мікроструктуру, фазовий склад та фізико-механічні властивості кераміки на основі діоксиду цирконію, частково стабілізованого  $Y_2O_3$ , одержаної методом електроконсолідації (гарячого пресування з прямим пропусканням струму). Окремим завданням є обґрунтування можливості застосування отриманих композиційних матеріалів як функціонально-градієнтних матеріалів (ФГМ) для високоточних та високоресурсних елементів транспортної інфраструктури.

Виготовлення досліджуваних керамічних нанокompatитів проводилось методом електроконсолідації (гарячого пресування з прямим пропусканням електричного струму) [12; 13], що є інноваційною технологією, розробленою для ефективного спікання нанопорошків. Використання промислової частоти струму (50 Гц) для нагріву заготовки призводить до значного зниження межі плинності матеріалу та інтенсифікації процесу зернограничної дифузії. Це забезпечує можливість отримання високощільних матеріалів за відносно нижчих температур та меншого часу витримки порівняно з традиційним спіканням. Ключова перевага цього методу полягає у запобіганні надмірній інтенсивності зернограничної дифузії, що може призводити до небажаного росту зерен і зниження механічних властивостей. Для дослідження використовувалися нанопорошки  $ZrO_2$ , частково стабілізовані 3 мас.%  $Y_2O_3$ , а також нанодобавки  $Al_2O_3$ , WC та SiC. Характеристика отриманих зразків включала: аналіз мікроструктури та морфології із застосуванням скануючої та силової зондової мікроскопії; рентгенофазовий аналіз для визначення фазового складу (моноклінний, тетрагональний  $ZrO_2$ ,  $Al_2O_3$ ); визначення механічних властивостей (мікротвердості ( $H_V$ ) та коефіцієнта тріщиностійкості ( $K_{1C}$ ) методом індентування за Віккерсом); визначення пористості ( $P$ ) розрахунковим методом.

Дослідження системи  $ZrO_2-Al_2O_3$  показало, що оксид алюмінію має подвійний ефект: він не лише покращує механічні характеристики, але й виступає як стабілізатор тетрагональної та кубічної модифікацій  $ZrO_2$ . Збільшення температури спікання, як і вмісту  $Al_2O_3$  (до 30 мас.%), сприяє повному перетворенню моноклінної фази на тетрагональну. Здатність  $Al_2O_3$  стабілізувати тетрагональну фазу  $ZrO_2$  є критичною, оскільки саме ця фаза забезпечує ефект трансформаційного зміцнення при навантаженні. У гарячому пресуванні з прямим пропусканням струму інтенсифікація зернограничної дифузії сприяє переважанню процесів ущільнення над процесами росту керамічних зерен, що є вирішальним для збереження наноструктури. Значна невідповідність коефіцієнтів термічного розширення  $ZrO_2$  та  $Al_2O_3$  створює внутрішні термічні напруження, які активують рух дислокацій, інтенсифікуючи спікання. Система  $ZrO_2-Al_2O_3$  демонструє низький ступінь взаємодії між компонентами, що забезпечує підвищену стабільність зернограничної структури і, як наслідок, високі механічні властивості, роблячи її перспективною композиційною керамікою.

Нанодобавки карбідів, зокрема WC та SiC, розглядаються як ефективні модифікатори структури  $ZrO_2$ -кераміки, що дозволяють отримати матеріали з підвищеним рівнем тепло- та електропровідності, а також покращеними механічними та трибологічними характеристиками. Це особливо важливо для компонентів, де потрібна висока зносостійкість при підвищених температурах, наприклад, у фрикційних вузлах транспортних механізмів. Додавання карбіду вольфраму WC до матриці  $ZrO_2$  дозволяє отримати матеріал із високими механічними властивостями та зносостійкістю [14; 15]. Використання нанорозмірного WC у поєднанні з електроконсолідацією, забезпечує необхідну жаро- та корозійну стійкість для структурних компонентів [16]. Карбід кремнію (SiC) є одним із ключових матеріалів для створення композиційних керамік. Системи  $ZrO_2$  з карбідами та оксидами характеризуються підвищеною пластичністю та ударною в'язкістю. Результати досліджень показали, що введення нанодобавок SiC дозволяє формувати багатофункціональні композити, які можуть бути використані, зокрема, для виробництва ламінованих вставок ріжучого інструменту.

Отримані нанокompatитні матеріали, що мають різний набір фізико-механічних та термофізичних властивостей залежно від типу нанодобавки (таблиця), можуть бути розглянуті як основа для створення ФГМ. ФГМ – це матеріали, у яких хімічний склад, а отже, і властивості, плавно змінюються за об'ємом. Використання ФГМ у транспортній галузі, наприклад, у вигляді багатошарових покриттів, дозволяє оптимізувати експлуатаційні характеристики елементів транспортних систем та двигунів [17–19]. Наприклад, композиція  $ZrO_2-Al_2O_3$  може сформувати верхній шар,  $ZrO_2-SiC$  – середній, а  $ZrO_2-WC$  – нижній шар. Такий підхід дозволяє поєднати високу термічну стійкість та низьку теплопровідність (для теплозахисних покриттів, де  $ZrO_2$  особливо ефективний), високу твердість і зносостійкість (від

шарів із WC та Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), та стійкість до термічних ударів (завдяки градієнтному переходу). Зокрема, для виробництва ламінованих вставок для ріжучого інструменту, що використовується при обробці конструкційних матеріалів транспортних засобів, оптимальний вибір складу кожного шару буде визначатися конкретними умовами експлуатації.

Таблиця

Фізико-механічні властивості вихідних матеріалів

Матеріал	Густина $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	Модуль Юнга $E$ , ГПа	Коефіцієнт теплового розширення $\alpha$ , $\cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$	Теплопровідність, $\lambda$ , Вт/(м·К)
ZrO <sub>2</sub>	5,6	6,0	10	2,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,8	1,8	8	28
WC	15,6	4,7	3,9	29,3
SiC	3,05	0,2	4	80

Таким чином, метод електроконсолідації є інноваційним та високоефективним технологічним рішенням для синтезу високощільних керамічних наноконкомпозитів на основі діоксиду цирконію, частково стабілізованого оксидом ітрію, забезпечуючи мінімізацію росту зерен та збереження наноструктурного стану матеріалу. Введення нанодобавок оксиду алюмінію, монокарбіду вольфраму та карбіду кремнію дозволяє цілеспрямовано контролювати фазовий склад та мікроструктуру, що є ключовим для формування матеріалів з покращеним комплексом фізико-механічних властивостей, зокрема підвищенням тріщиностійкості та твердості, при цьому Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> виявив себе як ефективний стабілізатор критичної тетрагональної фази ZrO<sub>2</sub>. Виявлені закономірності у зміні властивостей композитів відкривають значні перспективи для їх практичного застосування у високотехнологічному машинобудуванні для транспортних систем, зокрема як основи для створення функціонально-градієнтних матеріалів, які забезпечать підвищену термічну та механічну стійкість елементів, що є важливим фактором у підвищенні загальної ефективності та надійності транспортної інфраструктури та логістичних процесів, при цьому необхідність контролю фазоутворення є ключовою для отримання матеріалів із заданими характеристиками. Подальша робота в цьому напрямку має бути зосереджена на оптимізації градієнтної структури ФГМ відповідно до специфічних експлуатаційних вимог елементів транспортної техніки.

1. Nerubatskyi V. P., Hevorkian E. S., Vovk R. V., Krzysiak Z., Komarova H. L. The influence of zirconium dioxide nanoadditives on the properties of mullite-corundum. *Low Temperature Physics*. 2024. Vol. 50, No. 7. P. 558–568. <https://doi.org/10.1063/10.0026282>.

2. Mamalis A. G., Hevorkian E. S., Nerybatskyi V. P., Rucki M., Krzysiak Z., Morozova O. M. Effect of nanoadditives on the properties of partially stabilized zirconia. *Nanotechnology Perceptions*. 2023. Vol. 19, No. 3. P. 26–46. <https://doi.org/10.56801/nano-ntp.v19i3.325>.

3. Iefimova G., Pashchenko O., Mykhailov M. Ports' contribution to the financial and economic security of logistics systems. *European scientific journal of Economic and Financial innovation*. No. 2(16). P. 93–103. <http://doi.org/10.32750/2025-0209>.

4. Syzdykbayeva B., Raimbekov Z., Baiburiev R., Dulatbekova Z. (2025). Improving the transport and logistic infrastructure of a city using the graph theory method: The case of Astana, Kazakhstan. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, Iss. 6. 2486. <https://doi.org/10.3390/su17062486>.

5. Gevorkyan E. S., Nerubatskyi V. P., Vovk R. V., Morozova O. M., Chyshkala V. O., Gutsalenko Yu. G. Revealing thermomechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–C–SiC composites at sintering. *Functional Materials*. 2022. Vol. 29, No. 2. P. 193–201. DOI: 10.15407/fm29.02.193.

6. Krzysiak Z., Gevorkyan E., Nerubatskyi V., Rucki M., Chyshkala V., Caban J., Mazur T. Peculiarities of the phase formation during electroconsolidation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>–ZrO<sub>2</sub> powders mixtures. *Materials*. 2022. Vol. 15, Issue 17. 6073. DOI: 10.3390/ma15176073.

7. Bian R., Ferraris E., Ynag Y., Qian J. Experimental investigation on ductile mode micro-milling of ZrO<sub>2</sub> ceramics with diamond-coated end mills. *Micromachines*. 2018. Vol. 9, Issue 3. 127. <https://doi.org/10.3390/mi9030127>.

8. Qi B., Liang S., Li Y., Zhou C., Yu H., Li J. ZrO<sub>2</sub> matrix toughened ceramic material-strength and toughness. *Advanced Engineering Materials*. 2022. Vol. 24, Issue 6. P. 2101278. <https://doi.org/10.1002/adem.202101278>.
9. Jarghouyeh M. M., Nourbakhsh A. A., Mirsattari S. N., Nezamzadeh-Ejhih A., MacKenzie K. J. D. The effect of nano additives modified by functionalized groups on the physical and mechanical properties of alumina-carbon-based refractories. *Diamond and Related Materials*. 2025. Vol. 155. P. 112234. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2025.112234>.
10. Moustafa E. B., Taha M. A. The effect of mono and hybrid additives of ceramic nanoparticles on the tribological behavior and mechanical characteristics of an al-based composite matrix produced by friction stir processing. *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13, Issue 14. P. 2148. <https://doi.org/10.3390/nano13142148>.
11. Gawai S., Rai S., Bishnoi A. Applications of nano additives in polymeric and rubber composites: A comprehensive review. *Oriental Journal of Chemistry*. 2024. Vol. 41, No. 2. P. 445–457. <http://dx.doi.org/10.13005/ojc/410214>.
12. Hevorkian E. S., Nerubaskyi V. P., Chyshkala V. O., Lytovchenko S. V., Prokopiv M. M., Samociuk W., Mechnik V. A. Technological and innovative features of the electroconsolidation method as a kind of plasma sintering for refractory compounds. *Journal of Superhard Materials*. 2024. Vol. 46, Issue 5. P. 364–375. <https://doi.org/10.3103/S1063457624050046>.
13. Hevorkian E. S., Nerubaskyi V. P., Rucki M., Kilikevicius A., Mamalis A. G., Samociuk W., Morozow D. Electroconsolidation method for fabrication of fine-dispersed high-density ceramics. *Nanotechnology Perceptions*. 2024. Vol. 20, No. 1. P. 100–113. <https://doi.org/10.56801/nano-ntp.v20i1.363>.
14. Ratov B. T., Hevorkian E., Mechnik V. A., Bondarenko N. A., Kolodnitskyi V. M., Prikhna T. O., Moshchil V. E., Nerubaskyi V. P., Kalzhanova A. B., Bayamirova R. U., Togasheva A. R., Sarbopeeveva M. D. Effect of the ZrO<sub>2</sub> content on the strength characteristics of the matrix material of C<sub>diamond</sub>–(WC–Co) composites synthesized by spark plasma sintering. *Journal of Superhard Materials*. 2024. Vol. 46, Issue 3. P. 175–186. <https://doi.org/10.3103/S1063457624030079>.
15. Ratov B. T., Mechnik V. A., Bondarenko N. A., Kolodnitskyi V. M., Gevorkyan E. S., Nerubaskyi V. P., Gusmanova A. G., Fedorov B. V., Kaldibaev N. A., Arshidinova M. T., Kulych V. G. Features structure of the C<sub>diamond</sub>–(WC–Co)–ZrO<sub>2</sub> composite fracture surface as a result of impact loading. *Journal of Superhard Materials*. 2023. Vol. 45, Issue 5. P. 348–359. <https://doi.org/10.3103/S1063457623050088>.
16. Hevorkian E., Samociuk W., Rucki M., Krzysiak Z., Pieniak D., Nerubaskyi V., Chyshkala V., Lytovchenko S., Chalko L., Morozow D., Caban J., Kulich V. Microstructure and properties of binderless μWC obtained using the electroconsolidation method. *Materials*. 2025. Vol. 18, Issue 20. P. 4646. <https://doi.org/10.3390/ma18204646>.
17. Mohammadi M., Rajabi M., Ghadiri M. Functionally graded materials (FGMs): A review of classifications, fabrication methods and their applications. *Processing and Application of Ceramics*. 2021. Vol. 15, Issue 4. P. 319–343. <http://dx.doi.org/10.2298/PAC2104319M>.
18. Saleh B., Jiang J., Fathi R., Al-hababi T., Xu Q., Wang L., Song D., Ma A. 30 Years of functionally graded materials: An overview of manufacturing methods, applications and future challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 201. P. 108376. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108376>.
19. Buitkenov D., Nabioldina A., Raisov N. Development of method for applying multilayer gradient thermal protective coatings using detonation spraying. *Coatings*. 2024. Vol. 14, Issue 7. P. 899. <https://doi.org/10.3390/coatings14070899>.

Наукове видання

## ЗБІРНИК МАТЕРІАЛІВ ТЕЗ

VI Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції  
«ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗВИТКУ МАШИНОБУДУВАННЯ  
ТА ЕФЕКТИВНОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ  
СИСТЕМ»

27–28 листопада 2025 р.

*Матеріали тез доповідей друкуються в авторській редакції.  
Редакційна колегія не несе відповідальності за достовірність інформації, поданої в роботах,  
та залишає за собою право не погоджуватися з думкою авторів на викладені проблеми.*

<i>Відповідальний за випуск</i>	<i>Є. І. Тхорук</i>
<i>Комп'ютерна верстка</i>	<i>І. О. Хітров, Б. І. Степанюк</i>
<i>Технічний редактор</i>	<i>Г. Ф. Сімчук</i>

*Видавець і виготовлювач  
Національний університет  
водного господарства та природокористування  
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028.*

*Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до  
державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів  
видавничої продукції РВ № 31 від 26.04.2005 р.*