



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**ПІВНІЧНО-СХІДНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР  
ТРАНСПОРТНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ**

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ  
УКРАЇНСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

***Випуск 199***

**Харків 2022**

## **УДК 656.2(062)**

У Збірнику наукових праць УкрДУЗТ публікуються результати наукових досліджень, наукові та конструкторські розробки та інші матеріали вчених, фахівців залізничного транспорту і промислових підприємств, спрямовані на вирішення сучасних задач та проблем організації перевезень та управління на транспорті, рухомого складу і тяги поїздів, транспортного будівництва та залізничної колії, теплоенергетики та матеріалознавства, автоматики, телемеханіки та зв'язку тощо.

Збірник наукових праць УкрДУЗТ призначений для інженерно-технічних працівників, магістрантів, студентів і науковців залізничного транспорту та інших галузей промисловості.

З електронною версією збірника можна ознайомитися на сайті:  
<https://bit.ly/3vVHlv3>

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus (Польща).

З реєстрацією збірника можна ознайомитися на сайті  
<http://jml2012.indexcopernicus.com>.

**Google Scholar** профіль: <https://scholar.google.com.ua>

**Веб-сторінка збірника:** <https://kart.edu.ua/unit/zbirnik-ukrsurt>

### **Реферативна база**

**"Наукова періодика України":** <http://csw.kart.edu.ua>

**ISSN (p) 1994-7852**

**ISSN (online) 2413-3795**

Свідectво про державну реєстрацію КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 2 від 24 березня 2022 р.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що включаються до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 15.10.2019 р. № 1301).

**Редакційна колегія**

Головний редактор – Вовк Руслан Володимирович, доктор фізико-математичних наук, професор, УкрДУЗТ

Випусковий редактор – Кравець Андрій Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, УкрДУЗТ

**Залізничний транспорт (273)**

Пузир В. Г., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Фомін О. В., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)  
Путятю А. В., д.т.н., доцент (ГДТУ ім. П. О. Сухого, Республіка Білорусь)  
Горобченко О. М., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)  
Дацун Ю. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Мартинів І. Е., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Bureika G., dsc, professor (VG TU, Литва)  
Михалків С. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Ловська А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

**Будівництво та цивільна інженерія (192)**

Бліхарський З. Я., д.т.н., професор  
(НУ Львівська політехніка)  
Борзяк О. С., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Ватуля Г. Л., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Лобяк О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Орел Є. Ф., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Плугін А. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Плугін Д. А., д.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Пушкарьова К. К., д.т.н., професор (КНУБА)  
Толмачов С. М., д.т.н., професор (ХНАДУ)  
Трикоз Л. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Шабанова Г. М., д.т.н., професор (НТУ ХП)  
Шмуклер В. С., д.т.н., професор (ХНУМГ)  
Fisher Hans-Bertram., dr. ind., professur (Bauhaus-Universität Weimar F.A., Німеччина)  
Опанасенко О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

**Механічна інженерія (131, 132, 133)**

Астанін В. В., д.т.н., професор (НАУ м. Київ)  
Воронін С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Геворкян Е. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Ковальова І. М., к.т.н., доцент (НАНБ, Білорусь)  
Онопрейчук Д. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Стефанов В. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Тимофєєв С. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Тимофєєва Л. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Федориненко Д. Ю., д.т.н., професор (Tohoku University, Японія)

**Транспортні технології (275)**

Панченко С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Бутько Т. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Прохорченко А. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Шраменко Н. Ю. д.т.н., професор (ДБТУ)  
Мороз М. М. д.т.н., професор (КНУ, м. Кременчук)  
Кириллова О. В., д.т.н., доцент (ОНМУ, м. Одеса)  
Бабаєв М. М., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Лаврухін О. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Потапов Д. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Ходаківський О. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

**Геодезія та землеустрій (193)**

Eimuntas Paršeliūnas, Prof. Habil Dr. (VG TU, Литва)  
Jūrate Sužiedelytė Visockienė, Assoc. Prof. Dr.  
(VG TU, Литва)  
Угненко Є. Б., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Маланчук М. С., д.т.н., доцент (НУ «Львівська  
політехніка»)  
Церклевич А. Л., д.т.н. доцент (НУ «Львівська  
політехніка»)  
Viselga Gintas, Assoc. Prof. Dr. (VG TU, Литва)  
Мамонов К. А., д.е.н., професор (ХНУМГ)  
Савенко В. Я., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)

**Теплоенергетика (144)**

Каграманян А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Мороз В. І., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Фалендиш А. П., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Грицук І. В., д.т.н., доцент (ХМДА, м. Херсон)  
Сотник М. І., д.т.н., доцент (СДУ, м. Суми)  
Дешко В. І., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)  
Бабіченко Ю. А., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Pavlenko A., dsc. tech., profesor (KUT, Poland)  
Bartoszewicz J., dsc. tech., profesor (PUT, Poland)  
Tomaszewski F., phd, profesor (PUT, Poland)



## ЗМІСТ

### Механічна інженерія (131, 132, 133)

- Геворкян Е. С., Нерубацький В. П., Морозова О. М., Софронов Д. С., Чижика В. О., Волошина Л. В.* Розробка керамічних матеріалів  $ZrO_2-CeO_2$  біоінженерного використання 6
- Аношкіна Н. М.* Дослідження впливу рідкокристалічної присадки на трибологічні властивості гідравлічних оливи для будівельних та колійних машин 16

### Теплоенергетика (144)

- Норчак В. І.* Спалювання композитних торфо-вугільних сумішей у вихровій топці 23

### Будівництво та цивільна інженерія (192)

- Рудченко Д. Г., Сердюк В. Р.* Мінеральні добавки в технології виробництва автоклавного газобетону 32
- Ромашко В. М., Ромашко-Майстрок О. В.* Основні параметри універсальної діаграми стану бетону в залізобетонних елементах і конструкціях 44
- Мозговий А. О., Бутенко А. А.* Особливості конструкцій залізобетонних фундаментів силосів збільшених розмірів 54

### Геодезія та землеустрій (193)

- Нестеренко С. В., Міщенко Р. А.* Експериментальна перевірка точності визначення нормальних висот пунктів за даними GNSS-спостережень 68

### Залізничний транспорт (273)

- Жалкін Д. С., Жалкін С. Г., Залата А. С., Вініченко В. Е., Скрипченко С. В.* Видалення води з дизельної оливи гідродинамічним диспергуванням 78

### Транспортні технології (275)

- Панченко С. В., Балака Є. І., Панченко В. В., Резуненко М. Є.* Еволюція транспорту та сучасна проблема української залізниці 89
- Кравченко М. А., Стебницька Є. М., Прохорченко А. В., Киман А. М., Кірієнков А. Є.* Дослідження стабільності руху поїздопотоків на вантажонапруженому залізничному полігоні 99

### Статті оглядово-дискусійного характеру

- Чигурян Я. О., Яковенко К. С.* Застосування ГІС-технологій в сільському господарстві 114

---

**МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ (131, 132, 133)**

---

УДК 621.763

**РОЗРОБКА КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ  $ZrO_2-CeO_2$  БІОІНЖЕНЕРНОГО ВИКОРИСТАННЯ**

Д-р техн. наук Е. С. Геворкян, канд. техн. наук В. П. Нерубацький, асп. О. М. Морозова, канд. хім. наук Д. С. Софронів, кандидати техн. наук В. О. Чишкала, Л. В. Волошина

**DEVELOPMENT of CERAMIC MATERIALS  $ZrO_2-CeO_2$  of BIOENGINEERING APPLICATIONS**

Dr. Sc. (Tech.) E. S. Gevorkyan, PhD (Tech.) V. P. Nerubatskyi, postgraduate O. M. Morozova, PhD (Chem.) D. S. Sofronov, PhD (Tech.) V. O. Chyshkala, PhD (Tech.) L. V. Voloshyna

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.199.2022.258543>



**Анотація.** Досліджено метод формування композиційних матеріалів на основі нанопорошків частково стабілізованого оксидом церію діоксиду цирконію, отриманих із розчинів фторидних солей. Підібрано найбільш оптимальний метод отримання нанопорошків з метою виготовлення з них цільних наноструктурних композитів біоінженерного використання. Отримання композитів на основі частково стабілізованого діоксидом церію діоксиду цирконію при гарячому пресуванні у вакуумі методом електроспікання дає змогу отримати високоцільні композити з високою тріщиностійкістю, твердістю і модулем пружності вже при температурі 1400 °С, тиску 30 МПа та часу витримки 3 хвилини. Виявлено, що метод електроконсолідації у вакуумі забезпечує спікання зразків з високими значеннями модуля пружності і тріщиностійкості. Проведені дослідження дають змогу припустити, що з метою подальшого підвищення властивостей композитів на основі оксиду цирконію, частково стабілізованого діоксидом церію, необхідно поліпшити однорідність вихідних сумішей, а також додавати інші оксиди, зокрема оксид алюмінію, нітрид алюмінію, оксиди кремнію та магнію.

**Ключові слова:** біоінженерія, діоксид цирконію, електроконсолідація, кераміка, оксид церію.

**Abstract.** Method of composite materials formation based on particle-stabilized cerium dioxide zirconium nanopowders obtained from fluoride salt solutions has been investigated. The sintering of the powders was carried out by means of an electroconsolidation apparatus by hot pressing in a vacuum chamber. X-ray phase analysis was performed on a Shimadzu XRD-6000 diffractometer. Phase analysis of the samples was carried out using the data base of the American Society for Testing Materials. The surface morphology of the samples was investigated by scanning microscope JSM-6390LV. The most optimal method of nanopowders extraction was selected to produce solid nanostructured composites for bioengineering applications. Analysis of the microstructure of the samples showed that the composite systems are composed of particles ranging in size from 100 nm to 1500 nm. The samples show pores and cracks, which can be associated with the passage of grain boundary diffusion in the process of electro-consolidation of the samples. Derivation of composites based on zirconium dioxide stable at hot vacuum deposition by electrosintering makes it possible to

obtain the high performance composites with high resistance to abrasion, hardness and thrust modulus at a temperature of 1400 °C, a pressure of 30 MPa and a cycle time of 3 minutes. It was found that the method of electroconsolidation in vacuum provides the bonding of samples with high values of the Young's modulus and friction strength. Mechanical characteristics of ceramic systems based on zirconium dioxide, molded with cerium oxide, have rather high values. The dependence of change in the relative specific gravity of the studied samples shows that the increase in temperature of electroconsolidation, the overall level of composite density grows practically linearly, indicating a good particle compatibility of the powders. The conducted studies allow us to assume that with the purpose of further increasing of the properties of composites based on zirconium oxide, partially stabilized by cerium dioxide, it is necessary to improve the homogeneity of the resulting sums and add other oxides, in particular alumina oxide, alumina nitride, silicon oxide and magnesium oxide.

**Keywords:** bioengineering, zirconium dioxide, electroconsolidation, ceramics, cerium oxide.

**Вступ.** Керамічні композити мають високий потенціал як біоматеріали. Висока біосумісність керамік дає змогу використовувати їх як біоматеріали в області імплантології. Біоактивність та біостабільність керамічних матеріалів дають змогу їх застосовувати у разі заміни суглобів або у стоматологічних реконструкціях [1]. Однак, значним недоліком деяких керамічних композиційних матеріалів є явище гідротермального старіння або низькотемпературної деградації, яке може бути усунене шляхом легування оксидами металів [2, 3]. Механічні властивості діоксиду цирконію визначаються трансформаційними перетвореннями під впливом різних факторів. Так, фазове перетворення з тетрагональної на моноклінну фазу може бути викликане температурою, напругою і обробкою, у той час як легування оксидами MgO, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CeO і CaO призводить до стабілізації тетрагональної та кубічної фаз [4, 5].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Системи на основі оксиду церію знайшли застосування в області ортопедії, зокрема як лікування остеосаркоми [6]. Завдяки антиокислювальним властивостям CeO<sub>2</sub>, збільшення речовини як покриття здатне підвищити життєздатність клітин, трохи знижуючи при цьому хімічну активність [7].

У роботі [8] йдеться про розробку системи ZrO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub>, яка застосовується як

антибактеріальний агент. Тестування властивостей отриманої системи проти бактеріальних штамів *Staphylococcus aureus*, *Shigella flexneri* та *Bacillus sp.* показало високу активність протибактеріальних патогенів. Дослідження цитотоксичної активності показують, що легування частинок ZrO<sub>2</sub> частинками CeO<sub>2</sub> посилює цитологічну активність.

Проведені дослідження [9] показують, що нанорозмірний оксид церію має властивості антиоксиданту і може бути застосований у біомедичній сфері як захист при окисних і протизапальних процесах і променевому ураженні. Наголошується, що нанорозмірний оксид церію здатний викликати клітинну стійкість від зовнішнього джерела окисного стресу та захищати клітини від атак окислювача, а також може сприяти позитивному впливу впродовж деякого періоду часу без необхідності повторного дозування.

Цирконій-керамічні композити активно застосовуються у протезуванні, зокрема системи, стабілізовані добавкою CeO<sub>2</sub>, широко поширені як цільнокерамічні стоматологічні реставрації [10]. Цирконієві кераміки мають такі механічні властивості, як висока тріщиностійкість і міцність на вигин, розмірна та хімічна стабільність, а також порівняну з металами рентгеноконтрасність, завдяки чому вони є привабливими матеріалами у реставраційній стоматології. Поряд з перевагами такі системи мають явище

низькотемпературної деградації, яке може бути вирішене стабілізацією метастабільних фаз за рахунок введення оксидних добавок. Так, наприклад  $\text{CeO}_2$  і  $\text{Y}_2\text{O}_3$  спроможні підтримувати високі температури метастабільних фаз в умовах навколишнього середовища, оскільки мають відносно високий рівень розчинності в матриці  $\text{ZrO}_2$ . Стабілізація тетрагональної фази найбільш успішно реалізується шляхом легування оксидами ітрію та церію. Незважаючи на наявність таких чудових механічних властивостей Y-TZP керамік, як міцність порядку 700 МПа та в'язкість руйнування порядку  $4,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ , проблема розкладання ітрій стабілізованих систем при тривалому контакті з біологічними рідинами вимагає розробки керамічних матеріалів, легованих альтернативними стабілізаційними добавками. Розроблення технології спікання кераміки на основі діоксиду цирконію визначає механічні характеристики отриманих біосумісних систем.

У роботі [11] досліджено спікання порошків 3Y-TZP, легованих  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та  $\text{CeO}_2$ , в атмосферних умовах зі швидкістю  $10^\circ\text{C}/\text{хв}$  при температурі від 1250 до  $1550^\circ\text{C}$  та часі витримки 2 год до охолодження до кімнатної температури. Повідомляється, що легування цирконієвої кераміки 0,3 мас.%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і 0,5 мас.%  $\text{CeO}_2$  забезпечує мінімальний ефект старіння та низький коефіцієнт тертя 3Y-TZP керамік.

Поряд зі спіканням кераміки на основі діоксиду цирконію шляхом одновісного пресування в циліндричні зразки [12], методом одновісного сухого ущільнення нанопорошків під дією ультразвуку при різних потужності та тиску [13], а також двоступінчастому спіканні ітрій стабілізованих порошків діоксиду цирконію [14], метод гарячого пресування керамічних систем на основі діоксиду цирконію демонструє значні результати [15].

У роботі [16] досліджено одержання однофазних порошків  $\beta\text{-ZrO}_2$  з так званими м'якими агрегатами, що відтворюють

морфологію з ацетилацетоном як хелатоутворювачем, з метою визначення впливу ацетилацетону на фазовий склад і морфологію порошків  $\text{ZrO}_2$ , легованих церієм, для біомедичних застосувань. Порошки  $0,9\text{ZrO}_2\text{0,1CeO}_2$  було отримано гідролізом та конденсацією з подальшим прожарюванням п-пропоксиду цирконію в простому золі. Зразки було охарактеризовано за допомогою дифракції рентгенівських променів (XRD), раманівської спектроскопії (RS), теплового аналізу (TGA/DTA) та вимірювань за допомогою скануючої електронної мікроскопії (SEM).

У роботі [17] нанокаталізатори  $\text{CuO}_x\text{-ZrO}_2\text{-CeO}_2$  (CZC) з різними співвідношеннями Cu/Zr було ефективно виготовлено за допомогою простої синтетичної стратегії без розчинників. Досліджено вплив легування Zr на структуру та реакційну здатність каталізаторів  $\text{CuO}_x\text{-CeO}_2$  за допомогою окислення окису вуглецю (CO) та відновлення 4-нітрофенолу (4-NP) як модельних реакцій. Виявлено, що введення Zr зменшило агрегацію поверхневих форм Cu, утворило більше кисневих вакансій у внутрішній частині та  $\text{Cu}^+$  на поверхні каталізатора та підвищило відновлюваність  $\text{CuO}_x\text{-CeO}_2$ . Каталізатори CZC демонструють помітно підвищену каталітичну активність завдяки великій кількості поверхнево-активних центрів і покращеним окислювально-відновним властивостям, які забезпечуються відповідним легуванням Zr в  $\text{CuO}_x\text{-CeO}_2$ . Ця робота не тільки пропонує практичний спосіб реконструкції розподілу активних металів на підкладці з оксиду металу, але також забезпечує високоефективну стратегію для приготування оксидних каталізаторів з відмінними каталітичними характеристиками.

Таким чином, можна зробити висновок, що питання розроблення технології керамічних систем та дослідження оптимального процесу

спікання складу  $ZrO_2-CeO_2$  з метою широкого застосування оксидних керамік у біоінженерії дотепер є невирішеним і актуальним.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою дослідження є виявлення закономірностей консолідації високощільного керамічного матеріалу складу  $ZrO_2-CeO_2$ , що дасть можливість отримання композиційних матеріалів біоінженерного застосування з високими фізико-механічними та експлуатаційними властивостями.

Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- дослідити метод гарячого пресування з метою консолідації високощільного керамічного матеріалу складу  $ZrO_2-CeO_2$ , отриманого шляхом хімічного розкладання фторидних солей;

- встановити оптимальний спосіб формування наноструктурних композитів з високими фізико-механічними властивостями.

#### **Основна частина дослідження.**

**Матеріали та методи.** У роботі використовували фтороводородну кислоту HF, концентровану азотну кислоту  $HNO_3$ , водний розчин аміаку  $NH_4OH$ , металевий цирконій, полівініловий спирт. Кваліфікація всіх реагентів – х.ч. Для приготування розчинів використовували дистильовану воду.

Одержання частинок діоксиду цирконію здійснювали таким чином: металевий цирконій масою 4 г поміщали у тефлонову склянку об'ємом 100 мл, доливали 10 мл фтороводородної кислоти та 10 мл дистильованої води. Після розчинення цирконію до отриманого розчину доливали при безперервному перемішуванні 60 мл дистильованої води та розраховану кількість полівінілового спирту. Отриману суміш перемішували протягом 1 год, а потім додавали 20 мл водного розчину аміаку і перемішували протягом 30 хв. Процес осадження проводили при 20, 50 та 80 °C. Вміст полівінілового спирту варіювали в

межах масового співвідношення  $m(Zr):m(PVC)$  1:0.1, 1:0.5 та 1:1. Після завершення отриманий осад відфільтровували, промивали дистильованою водою та висушували при кімнатній температурі протягом 48 годин. Висушений осад потім нагрівали в муфельній печі до температури 800 °C (швидкість нагріву складала 100 °C/год), витримували протягом 4 годин, а потім діоксид цирконію охолоджували до кімнатної температури.

Спікання порошків проводилося за допомогою установки електроспікання шляхом гарячого пресування у вакуумній камері. Початкова маса виготовлених зразків становила 3 г. Графітові прес-форми забезпечували міцність при тиску 45 МПа. Температура консолідації вимірювалася за вказаного тиску, час витримки становив 3 хв. Підтримка процесу спікання забезпечувалася змінним електричним струмом величиною 3000...5000 А та напругою 5...10 В.

Рентгенофазовий аналіз проводився на дифрактометрі Shimadzu XRD-6000 з такими режимами:  $CuK\alpha$ -випромінювання з  $\lambda = 1,54187 \text{ \AA}$ ; вигнутий графітовий монохроматор перед лічильником; метод  $\theta$ - $2\theta$  безперервного сканування; швидкість сканування 1,2 °/хв; кутовий діапазон  $2\theta = 5,0...100,0^\circ$  з кроком  $0,02^\circ$ ; напруга на рентгенівській трубці – 40 кВ, струм – 30 мА; без обертання зразка. Фазовий аналіз зразків проводили за допомогою бази даних ASTM (American Society for Testing Materials).

Дослідження морфології поверхні отриманих складів проводили з використанням скануючого мікроскопа (SEM) JSM-6390LV.

**Результати та обговорення.** Вихідні нанопорошкові суміші попередньо відпалювалися при температурі 800 °C. Було проведено експерименти при спіканні вихідних сумішей нанопорошків  $ZrO_2$ -5 мас.%  $CeO_2$  за різних температур спікання (рис. 1).

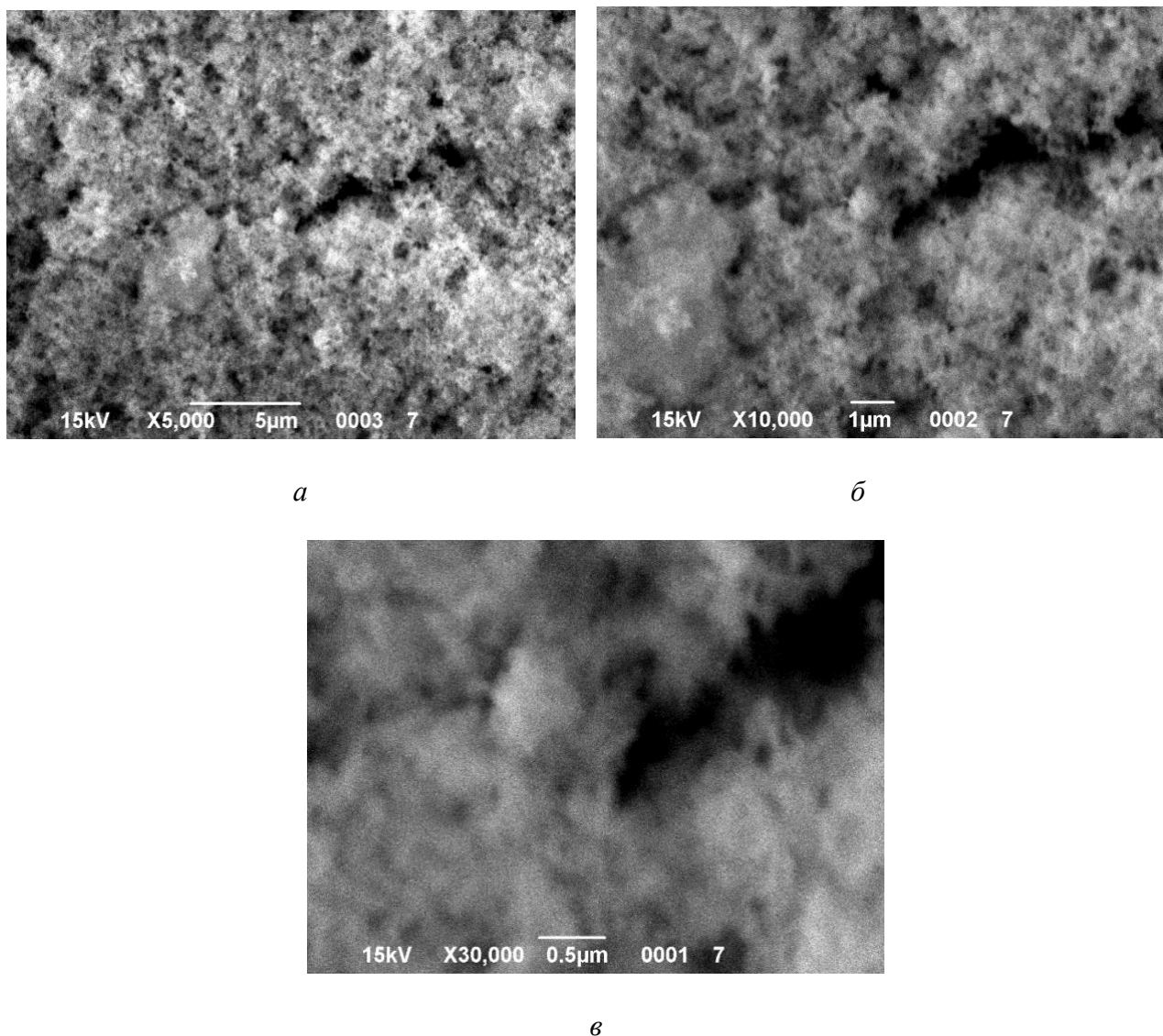
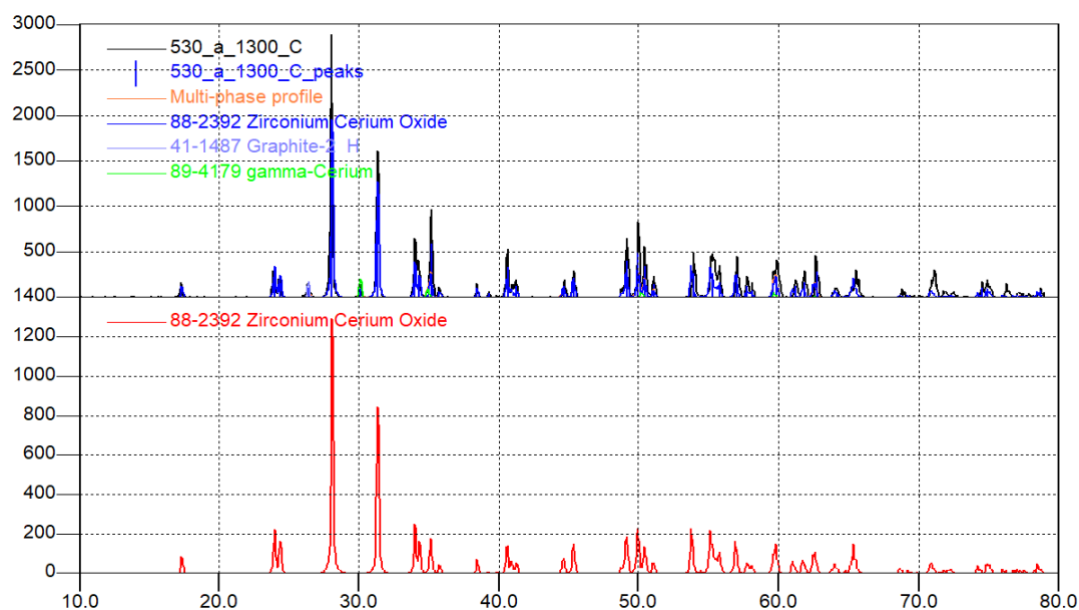


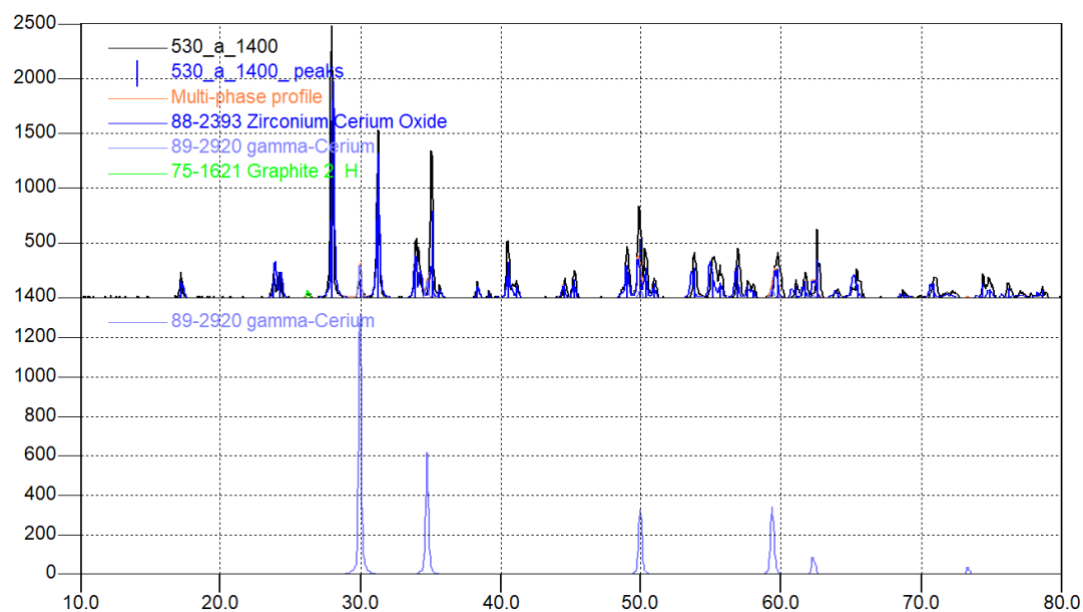
Рис. 1. Мікрофотографії частинок  $\text{ZrO}_2$ –5 мас.%  $\text{CeO}_2$ , відпалених при 800 °С і спечених за температури: а – 1300 °С; б – 1400 °С; в – 1500 °С

Дифрактограми зразків  $\text{ZrO}_2$ –5 мас.%  $\text{CeO}_2$ , спечених за різних температур (рис. 2), показують наявність піків, що відповідають  $\gamma$ -Ce та  $(\text{ZrCe})\text{O}_2$ . У випадку  $\Delta\text{Zr} = 0,92\dots0,95$ ,  $\Delta\text{Ce} = 0,05\dots0,08$

також спостерігаються структурні вимірювання твердих розчинів  $\text{ZrO}_2$ – $\text{CeO}_2$  навколо моноклинно-тетрагональної фазової межі.

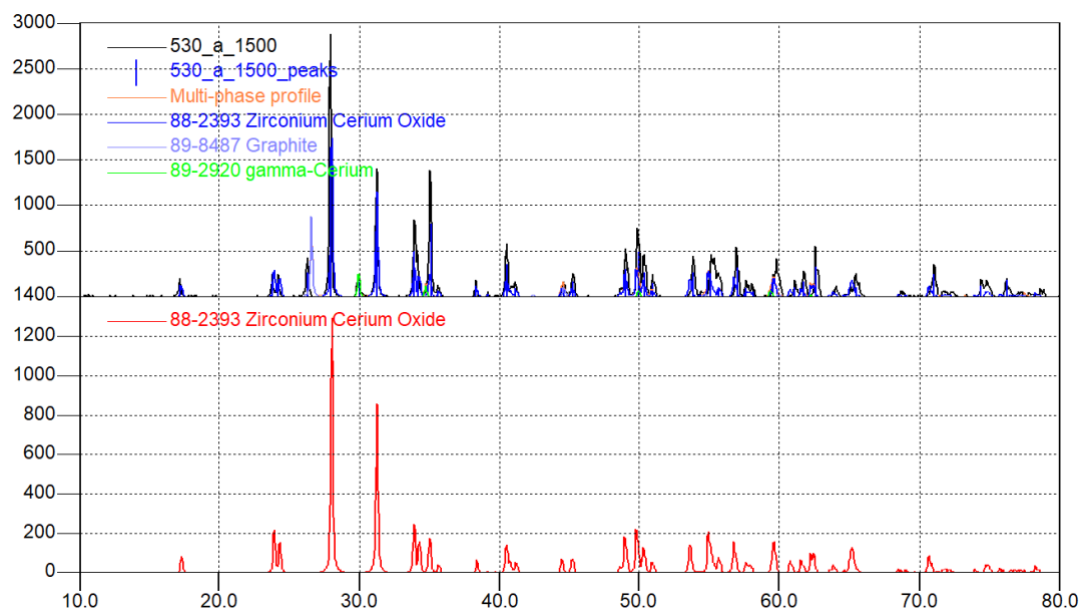


*a*



*б*

Рис. 2. Дифрактограми керамічних систем  $\text{ZrO}_2$ –5 мас.%  $\text{CeO}_2$ , спечених гарячим вакуумним пресуванням за температури:  
*a* – 1300 °C; *б* – 1400 °C; *в* – 1500 °C

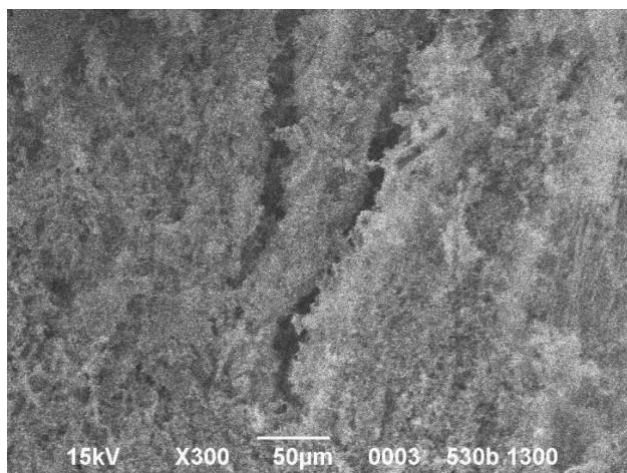


б

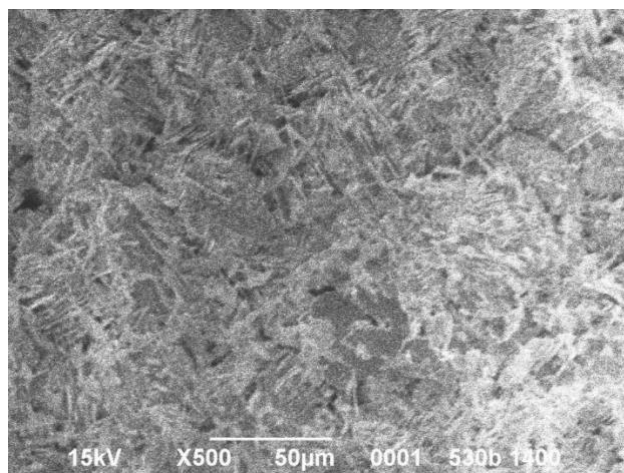
Рис. 2, аркуш 2

Аналіз мікроструктури зразків (рис. 3) показує, що композиційні сполуки складаються з частинок, розміри яких від 100 нм до 1500 нм. У зразках

спостерігаються пори і тріщини, що може бути пов'язано із протіканням зернограничної дифузії у процесі електроконсолідації зразків.



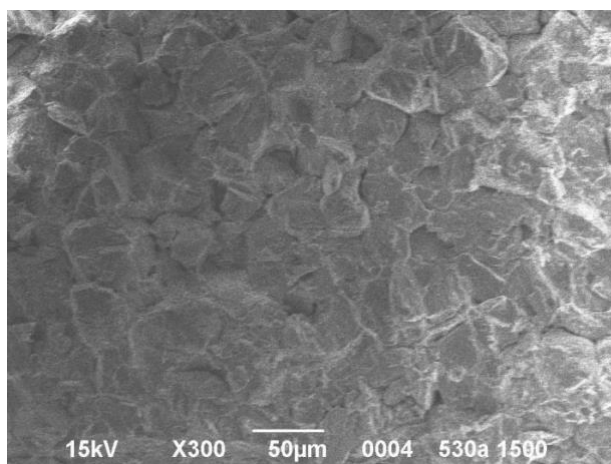
а



б

Рис. 3. Мікроструктури керамічних систем  $ZrO_2$ –5 мас.%  $CeO_2$ , гарячепресованих при часі витримки 3 хв за температури:

а – 1300 °C; б – 1400 °C; в – 1500 °C



6

Рис. 3, аркуш 2

Механічні характеристики керамічних систем на основі діоксиду цирконію, легованого оксидом церію, мають досить високі значення, які можна порівняти з даними, висвітленими в літературних джерелах (табл. 1). Залежність

зміни відносної густини досліджуваних зразків (рис. 4) показує, що зі зростанням температури електроконсолідації загальний рівень густини композиту зростає практично лінійно, що свідчить про хорошу ущільнюваність порошків.

Таблиця 1

Механічні властивості керамічних матеріалів на основі діоксиду цирконію

| Склад                                                 | Модуль пружності, ГПа | Тріщиностійкість, МПа·м <sup>1/2</sup> | Джерело     |
|-------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------|-------------|
| 3Y-TZP                                                | 195,3 ± 4,2           | 7,2 ± 0,5                              | [18]        |
| (Ce,Y)-TZP/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>             | 228,3 ± 6,5           | 11,3 ± 0,4                             | [18]        |
| ZrO <sub>2</sub> -20 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 280 ± 25              | —                                      | [19]        |
| ZrO <sub>2</sub> -5 мас. % CeO <sub>2</sub>           | 278 ± 7               | 11,1 ± 0,4                             | Дана робота |

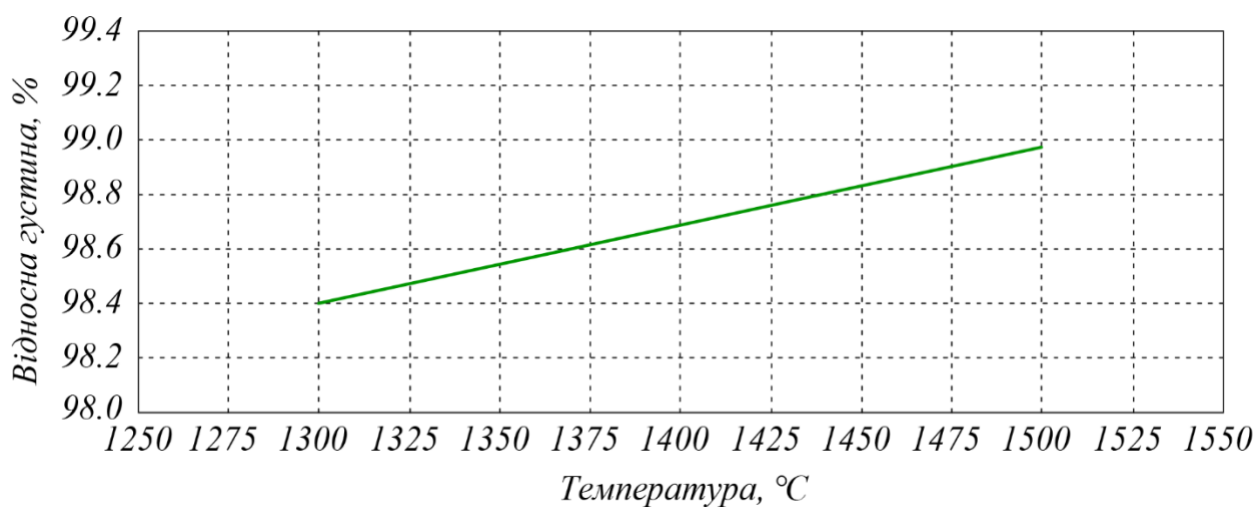


Рис. 4. Залежність відносної густини досліджуваних систем складу ZrO<sub>2</sub>-5 мас. % CeO<sub>2</sub> від температури спікання

Таким чином, отримання композитів на основі частково стабілізованого діоксидом церію діоксиду цирконію при гарячому пресуванні у вакуумі методом електроспікання дає змогу отримати високощільні композити з високою тріщиностійкістю, твердістю і модулем пружності вже при температурі 1400 °С, тиску 30 МПа та часу витримки 3 хв. Проведені дослідження дають змогу припустити, що з метою подальшого підвищення властивостей композитів на основі оксиду цирконію, частково стабілізованого діоксидом церію, необхідно поліпшити однорідність вихідних сумішей, а також додавати інші оксиди, зокрема оксид алюмінію, нітрид алюмінію, оксиди кремнію та магнію.

### Висновки:

– досліджено метод отримання композиційних керамічних високощільних матеріалів на основі нанопорошків частково стабілізованого оксидом церію діоксиду цирконію, отриманих з розчинів фторидних солей шляхом хімічного розкладання;

– встановлено, що метод електроконсолідації є оптимальним способом формування наноструктурних композитів з високими значеннями модуля пружності і тріщиностійкості, а застосування таких нанодобавок як оксид церію, оксид алюмінію та карбід кремнію є перспективним напрямом розробки високоміцних керамічних матеріалів біоінженерного застосування.

### Список використаних джерел

1. Gevorkyan E., Nerubatskyi V., Chyshkala V., Morozova O. Revealing specific features of structure formation in composites based on nanopowders of synthesized zirconium dioxide. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 5, No. 12 (113). P. 6–19. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.242503.
2. Chyshkala V. O., Lytovchenko S. V., Gevorkyan E. S., Nerubatskyi V. P., Morozova O. M. Structural phase processes in multicomponent metal ceramic oxide materials based on the system Y–Ti–Zr–O ( $Y_2O_3$ – $TiO_2$ – $ZrO_2$ ). *SWorldJournal*. 2021. Issue 7. Part 1. P. 17–32. DOI: 10.30888/2663-5712.2021-07-01-008.
3. Gevorkyan E. S., Nerubatskyi V. P., Chyshkala V. O., Morozova O. M. Cutting composite material based on nanopowders of aluminum oxide and tungsten monocarbide. *Modern engineering and innovative technologies*. 2021. Issue 15. Part 2. P. 6–14. DOI: 10.30890/2567-5273.2021-15-02-020.
4. Saridag S., Tak O., Alniacik G. Basic properties and types of zirconia: An overview. *World Journal of Stomatology*. 2013. Vol. 2, Iss. 3. P. 40–47. DOI: 10.5321/wjs.v2.i3.40.
5. Геворкян Э. С., Нерубацкий В. П., Мельник О. М. Горячее прессование нанопорошков состава  $ZrO_2$ -5% $Y_2O_3$ . *Зб. наук. праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2010. Вип. 119. С. 106–110.
6. Li H., Xia P., Pan S., Qi Z., Fu C., Yu Z. et al. The Advances of Ceria Nanoparticles for Biomedical Applications in Orthopaedics. *International Journal of Nanomedicine*. 2020. Vol. 15. P. 7199–7214. DOI: 10.2147/ijn.s270229.
7. Li K., Shen Q., Xie Y., You M., Huang L., Zheng X. Incorporation of Cerium Oxide into Hydroxyapatite Coating Protects Bone Marrow Stromal Cells Against  $H_2O_2$ -Induced Inhibition of Osteogenic Differentiation. *Biological Trace Element Research*. 2017. Vol. 182, Iss. 1. P. 91–104. DOI: 10.1007/s12011-017-1066-3.
8. Saleem A. M., Rajasekar S., Kaviyarasu K., Perumalsamy R., Ayeshamariam A., Jayachandran M. Green Combustion Synthesis of  $CeO_2$  and  $TiO_2$  Nanoparticles Doped with Same Oxide Materials of  $ZrO_2$ : Investigation of in vitro Assay with Antibiotic Resistant Bacterium (ARB)

and Anticancer Effect. *European Journal of Medicinal Plants*. 2019. Vol. 30, Iss. 2. P. 1–17. DOI: 10.9734/ejmp/2019/v30i230171.

9. Mohd Fadzil N. A., AB Rahim M. H., Pragas Maniam G. (2018). Brief review of ceria and modified ceria: synthesis and application. *Materials Research Express*. 2018. Vol. 5, Iss. 8. 085019. DOI: 10.1088/2053-1591/aad2b5.

10. Nakonieczny D. S., Ziębowicz A., Paszenda, Z. K., & Krawczyk, C. Trends and perspectives in modification of zirconium oxide for a dental prosthetic application: A review. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*. 2017. Vol. 37, Iss. 1. P. 229–245. DOI: 10.1016/j.bbe.2016.10.005.

11. Golieskardi M., Satgunam M., Ragurajan D., Hoque M. E., Ng A. M. H. (2020). Microstructural, Tribological, and Degradation Properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- and CeO<sub>2</sub>-Doped 3 mol.% Yttria-Stabilized Zirconia Bioceramic for Biomedical Applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020. Vol. 29, Iss. 5. P. 2890–2897. DOI: 10.1007/s11665-020-04829-3.

12. Lakusta M., Danilenko I., Konstantinova T., Volkova G. Influence of Obtaining Conditions on Kinetics of the Initial Sintering Stage of Zirconia Nanopowders. *Nanoscale Research Letters*. 2016. Vol. 11, Iss. 2. 238. DOI: 10.1186/s11671-016-1452-3.

13. Karban O. V., Khasanov O. Investigation of zirconia nanoceramics microstructure. *Physics of Low-Dimensional Structures*. 2003. Vol. 3. P. 297–308.

14. Lourenço M. A., Cunto G. G., Figueiredo F. M., Frade J. R. Model of two-step sintering conditions for yttria-substituted zirconia powders. *Materials Chemistry and Physics*. 2011. Vol. 126. P. 262–271. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2010.11.028.

15. Gevorkyan E. S., Morozova O. M., Sofronov D. S., Nerubatskyi V. P., Ponomarenko N. S. The formation of ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-nanoparticles from fluoride solutions. Abstracts of the II International Advanced Study Conference on Condensed Matter and Low Temperature Physics 2021 «CM&LTP 2021» (6–12 June 2021, Kharkiv). Kharkiv: FOP Brovin O. V., 2021. P. 190.

16. Nakonieczny D., Paszenda Z., Drewniak S., Radko T., Lis M. ZrO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub> ceramic powders obtained from a sol-gel process using acetylacetone as a chelating agent for potential application in prosthetic dentistry. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*. 2016. Vol. 18, No. 3. P. 53–60. DOI: 10.5277/ABB-00476-2015-03.

17. Liu B., Li Y., Qing S., Wang K., Xie J., Cao Y. Engineering CuO<sub>x</sub>-ZrO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub> nanocatalysts with abundant surface Cu species and oxygen vacancies toward high catalytic performance in CO oxidation and 4-nitrophenol reduction. *CrystEngComm*. 2020. Iss. 22. P. 4005–4013. DOI: 10.1039/d0ce00588f.

18. Santos C. dos, Coutinho I. F., Amarante J. E. V., Alves M. F. R. P., Coutinho M. M., Moreira da Silva C. R. Mechanical properties of ceramic composites based on ZrO<sub>2</sub> co-stabilized by Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CeO<sub>2</sub> reinforced with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> platelets for dental implants. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2021. Vol. 116. 104372. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2021.104372.

19. Promakhov V., Zhukov A., Dubkova Y., Zhukov I., Kovalchuk S., Zhukova T. et. al. Structure and Properties of ZrO<sub>2</sub>-20 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramic Composites Obtained Using Additive Technologies. *Materials*. 2018. Vol. 11. 2361. DOI: 10.3390/ma11122361.

---

Геворкян Едвин Спартаківич, доктор технічних наук, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (050) 596-32-16. E-mail: edsgev@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-0521-3577.

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Морозова Оксана Миколаївна, аспірантка кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (097) 170-62-95.

E-mail: oksanabakan2012@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-7397-2861.

Софронів Дмитро Семенович, кандидат хімічних наук, науковий співробітник Науково-технологічного комплексу «Інститут монокристалів» Національної академії наук України. Тел.: +38 (068) 250-17-57.

E-mail: 19sofronov73@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-4835-7001.

Чижика Володимир Олексійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалів реакторобудування та фізичних технологій Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Тел.: +38 (097) 242-05-56.

E-mail: vchishkala@ukr.net. ORCID iD: 0000-0002-8634-4212.

Волошина Людмила Володимирівна, кандидат технічних наук, асистент кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (050) 192-78-11.

E-mail: ludmivol@gmail.com. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2039-111X>.

Gevorkyan Edwin Spartakovich, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (050) 596-32-16. E-mail: edsgev@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-0521-3577.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (095) 045-78-01.

E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Morozova Oksana Mykolaivna, Postgraduate, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (097) 170-62-95. E-mail: oksanabakan2012@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-7397-2861.

Sofronov Dmytro Semenovych, PhD (Chem.), Researcher, State Scientific Institution Scientific and Technological Complex "Institute of Single Crystals" NASciences of Ukraine. Tel.: +38 (068) 250-17-57.

E-mail: 19sofronov73@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-4835-7001.

Chyshkala Volodymyr Oleksiyovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Reactor Construction Materials and Physical Technologies, V. N. Karazin Kharkiv National University. Tel.: +38 (097) 242-05-56.

E-mail: vchishkala@ukr.net. ORCID iD: 0000-0002-8634-4212.

Voloshyna Liudmyla Volodymyrivna, PhD (Tech.), Assistant, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (050) 192-78-11. E-mail: ludmivol@gmail.com. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2039-111X>.

Статтю прийнято 02.02.2022 р.

**УДК 621.89**

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РІДКОКРИСТАЛІЧНОЇ ПРИСАДКИ НА ТРИБОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГІДРАВЛІЧНИХ ОЛИВ ДЛЯ БУДІВЕЛЬНИХ ТА КОЛІЙНИХ МАШИН**

**Аспірант Н. М. Аношкіна**

## **INQUIRY INTO THE EFFECT OF LIQUID CRYSTAL ADDITIVE ON TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF HYDRAULIC OILS USED IN TRACK AND CONSTRUCTION MACHINES**

**Postgraduate student N. M. Anoshkina**

---

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.199.2022.258600>

---



***Анотація.** У статті описано результати досліджень впливу рідкокристалічної присадки холестеринового типу на трибологічні властивості гідролічних оливи Mobil Hydraulic 10W та John Deere Hy-Gard. Обидві оливи виготовлені на мінеральній основі та містять заводські пакети присадок і є типовими гідролічними оливами, аналоги яких застосовуються в гідролічних приводах сучасної будівельної техніки, колійних та*

сільськогосподарських машин. Лабораторні дослідження показали покращення протизносних та протизадирних властивостей олів.

**Ключові слова:** тертя, знос, будівельні та колійні машини, присадка, холестерик, гідравлічна олива, фенантреновий скелет.

**Abstract.** The top priority of the modern tribology is to reduce equipment wear. Mechanisms and units of construction and track machines have a lot of friction pairs and the easiest way to reduce their wear and increase life is to use lubricants. Hydraulic equipment elements are no exception, as hydraulic oils are not only the working fluid of the system, they also lubricate the friction pairs of hydraulic units. So it is very important that they have an effective lubricity. Pure hydraulic oils have quite low performance properties. To improve them, special substances – additives – are added to lubricants. A large number of relevant compounds have already been studied. A promising trend in this area is the use of substances that are able to form liquid crystalline phases. It is the substances, which can form cholesterol boundary films on friction surfaces that draw our attention. Based on the relevant works, we selected a liquid crystalline substance with a phenanthrene skeleton of the cholesterol type and conducted a number of experimental studies. This additive was added to industrial oil. Laboratory studies have confirmed its effectiveness.

This research continues to study the effect of liquid crystalline substance with phenanthrene on the tribological properties of oils used in construction and track machines. As the test oil we chose Mobil Hydraulic 10W and John Deere Hy-Gard, working fluids widely used in hydraulic drives in construction machines, track machines and agricultural machinery. Both are mineral-based and already contain additives. Like in our previous studies we used ultrasound to better dissolve the additive in the oil. The additive dissolved completely. The substance was added to the oil in various concentrations. Laboratory studies of tribological properties of hydraulic fluids were performed on a four-ball friction machine in accordance with the standard method described in GOST 9490-75 (USSR National standard). The main indicators of lubricity were determined – wear spot diameter, burr index, critical load and welding load. The results of the experiment showed the improvement of anti-wear and anti-seize properties of the studied hydraulic oils. Within the specified concentration range, the greatest anti-wear effect can be observed, which indicates the value of the rational concentration of the liquid crystal additive in hydraulic oils. The effect of the additive in the area of maximum loads is not significant.

**Keywords:** friction, wear, construction and track machines, additive, cholesteric liquid crystal, hydraulic oil, phenanthrene skeleton.

**Вступ.** Гідравлічний привід на сьогодні широко застосовується в мобільних машинах та промисловому обладнанні. Роботу гідроприводу не можливо уявити без гідравлічної оливи. Вона є робочим тілом, яке приводить в дію виконавчі органи машин, а також виконує такі важливі функції як змащення деталей гідрообладнання, захист їх від корозії та відведення тепла. Базові оливи не можуть забезпечувати ефективне виконання цих завдань, тому до них додаються пакети функціональних присадок. На сьогодні активно ведуться дослідження речовин, які

здатні утворювати рідкокристалічні фази в якості протизносних та протизадирних присадок до олів. Цей напрямок дуже перспективний і показує чудові результати.

Як робочу рідину вітчизняних будівельних та колійних машин часто використовують індустріальні оливи. Вони дешеві і широкодоступні, але мають низьку мастильну здатність. Нами було проведено дослідження впливу рідкокристалічної присадки з фенантреновим скелетом на трібологічні властивості індустріальної оливи И-30А [1]. При використанні такої присадки на поверхні тертя формується

мастильна плівка переважно холестеричної будови [2]. Такі плівки мають високу несучу здатність і забезпечують ефективне мащення та захист поверхонь тертя. Дослідження на чотирикульковій машині тертя показали зниження середньої плями зносу на 38-50 % порівняно з оливою без додавання присадки, також зростає індекс задиру та критичне навантаження [1]. В гідроприводі сучасної будівельної та колійної техніки застосовуються оливи, які вже містять пакети присадок.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** З робіт [3, 4] знаємо про високу ефективність холестеричних рідких кристалів в якості присадок. У попередніх наших дослідженнях було обрано і протестовано РК присадку з фенантеновим скелетом [1, 5]. Результати показали значне покращення протизносних та протизадирних властивостей індустриальної оливи. У роботі [6] наводяться результати експериментів, які показують ефективність застосування холестеричних РК присадок Х-25 та Х-26 в моторних оливах М-8В1 та М-10Г2К, які вже містять заводський пакет присадок.

В гідроприводах сучасних будівельних, колійних машин та сільськогосподарської техніки застосовують оливи таких виробників, як Mobil, John Deere, Azmol, Agrinol та ін. Ці оливи мають високі експлуатаційні характеристики, але навіть при застосуванні таких рідин існує резерв щодо застосування високоефективних присадок рідкокристалічного типу.

Опираючись на наші попередні дослідження та роботи інших авторів, бачимо доцільність провести випробування товарної оливи, яка містить пакет присадок від виробника з додаванням РК присадки, оскільки дослідження в цьому напрямку раніше не проводились. РК речовина, що була застосована як присадка, була обрана нами в попередніх роботах і досліджувався її вплив на властивості індустриальної оливи И-30А [1, 5].

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою дослідження є вивчення трібологічних властивостей гідравлічних оливи Mobil Hydraulic 10W та John Deere Hy-Gard при додаванні до них рідкокристалічної речовини з фенантеновим скелетом.

Завданнями дослідження є введення досліджуваної присадки в ці гідравлічні оливи в різних концентраціях та проведення експериментальних досліджень на чотирикульковій машині тертя.

**Основна частина дослідження.** Дослідження впливу рідкокристалічної присадки з фенантеновим скелетом на протизносні властивості гідравлічних оливи проводилися на чотирикульковій машині тертя згідно з методикою, наведеною в ГОСТ 9490-75. Оливи Mobil Hydraulic 10W [7] та John Deere Hy-Gard [8] є типовими гідравлічними оливами, аналоги яких застосовуються в гідроприводах будівельних, сільськогосподарських машин та техніки для будівництва залізничних колій і споруд. Також Mobil Hydraulic 10W може застосовуватись як аналог до гідравлічних оливи колійних машин [7]. Обидві оливи виготовлені на мінеральній основі і містять заводські пакети присадок.

На основі аналізу попередніх робіт для досліджень було приготовлено такі суміші:

1. Mobil Hydraulic 10W без присадок;
2. Mobil Hydraulic 10W + 0,1 % рідкокристалічної присадки;
3. Mobil Hydraulic 10W + 0,2 % рідкокристалічної присадки;
4. Mobil Hydraulic 10W + 0,3 % рідкокристалічної присадки;
5. Mobil Hydraulic 10W + 0,4 % рідкокристалічної присадки;
6. Mobil Hydraulic 10W + 0,5 % рідкокристалічної присадки;
7. John Deere Hy-Gard без присадок;
8. John Deere Hy-Gard + 0,1 % рідкокристалічної присадки;
9. John Deere Hy-Gard + 0,2 % рідкокристалічної присадки;

10. John Deere Hy-Gard + 0,3 % рідко-кристалічної присадки;

11. John Deere Hy-Gard + 0,4 % рідко-кристалічної присадки;

12. John Deere Hy-Gard + 0,5 % рідко-кристалічної присадки.

Приготування суміші виконувалось шляхом обробки подрібнених кристалів присадки в середовищі досліджуваної оливи

в ультразвуковій ванночці з частотою 40 кГц і потужністю 50 Вт. Для повного розчинення присадки було достатньо обробки протягом трьох годин. Методика приготування суміші описана в роботі [1].

Результати проведених досліджень наведено у таблицях 1 і 2.

Залежності, отримані за результатами дослідження, зображено на рис. 1–4.

Таблиця 1

Трібологічні показники оливи Mobil Hydraulic 10W (суміші 1–6)

| № з/п | Концентрація, $C, \%$ | Обробка ультразвуком | Середній діаметр плями зносу, $d_z$ , мм | Індекс задиру, $I_z, H$ | Критичне навантаження, $P_K, H$ | Навантаження зварювання, $P_{зв}, H$ |
|-------|-----------------------|----------------------|------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| 1     | 0                     | -                    | 0,527                                    | 372,47                  | 980                             | 1568                                 |
| 2     | 0                     | +                    | 0,521                                    | 370,52                  | 980                             |                                      |
| 3     | 0,1                   | +                    | 0,511                                    | 429,95                  | 1235                            |                                      |
| 4     | 0,2                   | +                    | 0,504                                    | 432,18                  | 1235                            |                                      |
| 5     | 0,3                   | +                    | 0,498                                    | 435,88                  | 1235                            |                                      |
| 6     | 0,4                   | +                    | 0,493                                    | 437,73                  | 1235                            |                                      |
| 7     | 0,5                   | +                    | 0,510                                    | 432,84                  | 1235                            |                                      |

Таблиця 2

Трібологічні показники оливи John Deere Hy-Gard (суміші 7–12)

| № з/п | Концентрація, $C, \%$ | Обробка ультразвуком | Середній діаметр плями зносу, $d_z$ , мм | Індекс задиру, $I_z, H$ | Критичне навантаження, $P_K, H$ | Навантаження зварювання, $P_{зв}, H$ |
|-------|-----------------------|----------------------|------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| 1     | 0                     | -                    | 0,323                                    | 715,85                  | 1235                            | 1568                                 |
| 2     | 0                     | +                    | 0,320                                    | 706,03                  |                                 |                                      |
| 3     | 0,1                   | +                    | 0,313                                    | 721,33                  |                                 |                                      |
| 4     | 0,2                   | +                    | 0,308                                    | 732,18                  |                                 |                                      |
| 5     | 0,3                   | +                    | 0,303                                    | 746,08                  |                                 |                                      |
| 6     | 0,4                   | +                    | 0,301                                    | 752,15                  |                                 |                                      |
| 7     | 0,5                   | +                    | 0,314                                    | 749,09                  |                                 |                                      |

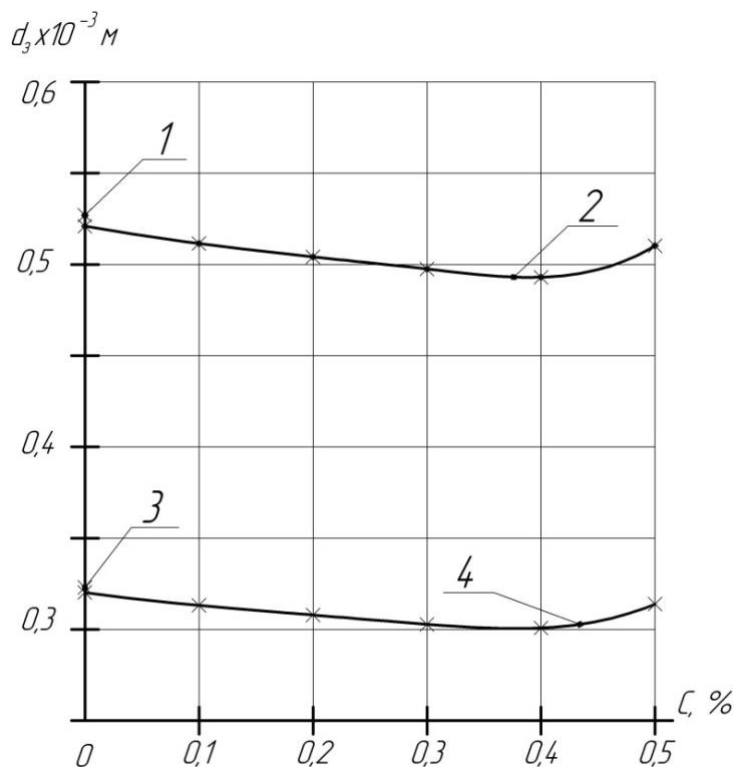


Рис. 1. Залежність зміни діаметра плями зносу від концентрації присадки в оливах: 1 – олива Mobil Hydraulic 10W без присадки не оброблена ультразвуком; 2 – суміші 1–6 оброблені ультразвуком; 3 – олива John Deere Hy-Gard без присадки не оброблена ультразвуком; 4 – суміші 7–12 оброблені ультразвуком

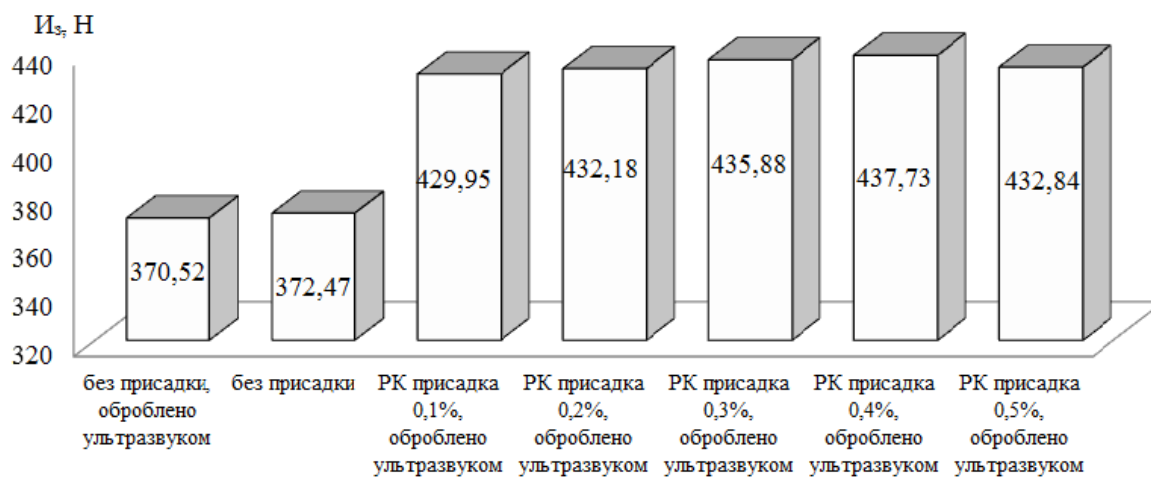


Рис. 2. Залежність зміни індексу задиру від концентрації присадки в оливі Mobil Hydraulic 10W

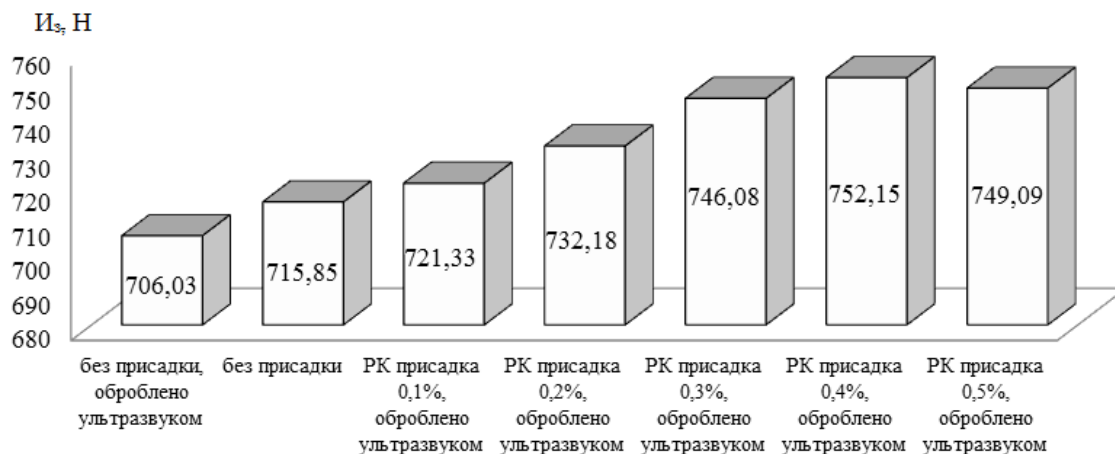


Рис. 3. Залежність зміни індексу задиру від концентрації присадки в оливі John Deere Hy-Gard

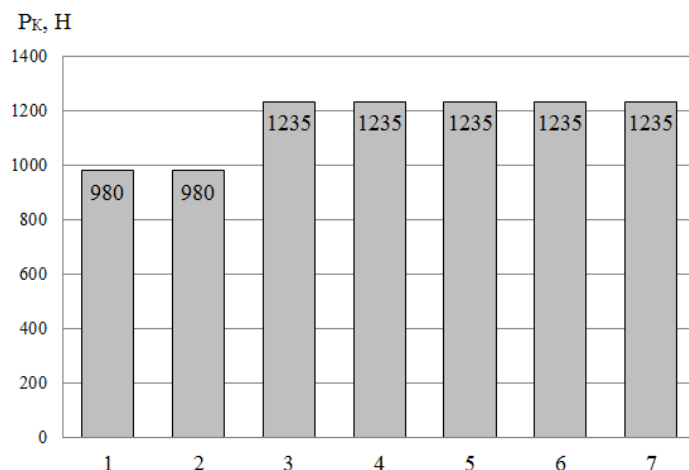


Рис. 4. Залежність значення критичного навантаження від концентрації присадки в оливі Mobil Hydraulic 10W:

1 – олива Mobil Hydraulic 10W без присадки не оброблена ультразвуком;  
2-7 – суміші 1-6 оброблені ультразвуком

**Висновки.** Досліджувана рідкокристалічна присадка з фенантеновим скелетом чинить помітний вплив на протизносні властивості олив Mobil Hydraulic 10W та John Deere Hy-Gard. Максимальне зниження середнього діаметру плями зносу на 5...7 % порівняно з оливами без РК присадки отримано при концентрації присадки 0,4 % для обох олив. При підвищенні концентрації пляма зносу зростає – це говорить про те, що молекули присадки починають утворювати міцели і

перестають приймати участь в утворенні граничних плівок. Отже, раціональна концентрація присадки в оливах знаходиться в межах 0,3...0,4 %.

Протизадирні властивості олив також покращуються. Індекс задиру підвищується на 13-15 % для оливи Mobil Hydraulic 10W і на 3-5 % для John Deere Hy-Gard в межах концентрації присадки 0,1...0,4 %. Значення критичного навантаження для оливи Mobil Hydraulic 10W збільшується з 980 Н до 1235 Н, а для John Deere Hy-Gard лишається

незмінним – 1235 Н. Навантаження зварювання для обох олив склало 1568 Н і не змінилось з додаванням присадки, отже, в області максимальних навантажень вплив РК присадки не значний.

Отримані дані обґрунтовують доцільність застосування обраної РК присадки в досліджуваних гідравлічних оливах та їх аналогах.

### Список використаних джерел

1. Влияние концентрации и типа жидкокристаллической присадки на трибологические характеристики промышленных масел / С. В. Воронин, В. А. Стефанов, Д. В. Онопрейчук, И. Ю. Сафонюк, Н. Н. Аношкина. *Трение и износ*. Минск, 2020. № 4 (41). С. 498-505.
2. Ермаков С. Ф. Трибология жидкокристаллических наноматериалов и систем: монография. Минск: Беларус. навука, 2012. 380 с.
3. Ермаков С. Ф. Эффект повышения адсорбционной активности холестерических жидкокристаллических соединений в процессе трения твердых тел. *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2018. № 2, т. 62. С. 236-243.
4. Shanchao Tan, Jiayu Tao, Wendi Luo, Hongyu Shi, Bin Tu, Hao Jiang, Yuhong Liu, Haijun Xu, Qingdao Zeng. Insight Into the Superlubricity and Self-Assembly of Liquid Crystals. *Frontiers in Chemistry*. 2021. Vol. 9. P. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.668794>.
5. Дослідження впливу концентрації рідкокристалічної присадки та електричного поля на фізико-хімічні властивості індустріальної оливи / С. В. Воронін, І. Ю. Сафонюк, Н. М. Аношкіна, О. С. Харківський. *Вісник Національного Авіаційного Університету*. Київ: НАУ. 2020. № 2(83). С. 70-76.
6. Изучение триботехнических свойств моторных масел с присадками жидких кристаллов / М. А. Колбашов, Ю. Н. Моисеев, А. В. Маслов, В. В. Киселев, Р. И. Харламов. *Пожарная безопасность: проблемы и перспективы*. Иваново. 2015. № 1 (6). С. 39-43.
7. Mobil Hydraulic 10W: Гидравлическое масло с высокими эксплуатационными характеристиками. URL: <https://www.mobil.ru/ru-ru/industrial/lubricants/products/products/mobil-hydraulic-10w> (дата звернення: 03.01.2022).
8. John Deere: Гидравлические масла. URL: <https://www.deere.ru> (дата звернення: 03.01.2022).

Аношкіна Наталія Миколаївна, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-8923-8493. Тел.: +38(095)823-24-46. E-mail: [anoshkinatasha@gmail.com](mailto:anoshkinatasha@gmail.com).

Anoshkina Nataliia, postgraduate student, department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-8923-8493. Tel.: +38(095)823-24-46. E-mail: [anoshkinatasha@gmail.com](mailto:anoshkinatasha@gmail.com).

Статтю прийнято 18.02.2022 р.

УДК 621.182

## СПАЛЮВАННЯ КОМПОЗИТНИХ ТОРФО-ВУГІЛЬНИХ СУМІШЕЙ У ВИХРОВІЙ ТОПЦІ

Аспірант Норчак В. І.

## COMBUSTION OF COMPOSITE PEAT-COAL MIXTURES IN A VORTEX FIREPLACE

Postgraduate student Norchak V. I.

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.199.2022.258647>



**Анотація.** Наведено результати чисельного дослідження процесів спалювання торфу та бурого вугілля у вихровій топці потужністю 2,5 МВт. Розмір частинок палива становить від 25 до 250 мкм. Теплота згоряння торфу становить 12,3 МДж/кг, вихід летких  $V^P = 38\%$ , теплота згоряння бурого вугілля – 13,9 МДж/кг, вихід летких – 25-35 %, зольність палив змінювалася від  $A^P=20\%$  до  $A^P=35\%$ . Вміст зольності та вологості  $A^P+W^P>65\%$ . Встановлено, що механічний недопал при вихровому спалюванні палива становить  $q_4=0,06\%$ . Показано можливість спалювання торфо-вугільної композитної суміші у вихровому передтопку.

**Ключові слова:** вихрова топка, процеси спалювання, зустрічні закручені потоки, торф, буре вугілля, композитна суміш.

**Abstract.** The results of the numerical study of peat and brown coal combustion processes in a vortex furnace with a power of 2.5 MW are presented. The processes in a vortex furnace with counter swirling flows with an upper supply of fuel and primary air and a supply of secondary air at the bottom of the furnace are studied. The removal of slag occurs in the bottom of the furnace. The particle size of fuel is from 25 microns to 250 microns. The calorific value of peat is 12.3 MJ/kg, the volatile content is  $V_{daf}=38\%$ , humidity is  $W^P=40\%$ , the stoichiometric coefficient is 7 kg air/kg fuel. The calorific value of brown coal is 13.9 MJ/kg, volatile content  $V_{daf}=25-35\%$ , humidity  $W^P=30\%$ , stoichiometric coefficient is 4.3 kg air/kg fuel. The ash content of the fuel varies from  $A^P=20\%$  to  $A^P=35\%$ . Ash content and humidity are  $A^P+W^P=65\%$ . It has been found that at ash content of  $A^P=30-35\%$  and humidity  $W^P=30-35\%$  the combustion process is unstable due to the problem of removing moisture and ash from the furnace volume. The temperature of the flue gases at the outlet of the furnace when burning peat is found to be 1711 °C, and the temperature of the ash is 1380 °C, which ensures solid ash removal. The temperature of flue gases during the combustion of brown coal is 1888 °C. A higher air excess coefficient is noted:  $a=2.36$  in the process of burning peat and  $a=2.0$  when burning brown coal. The calculation results indicate that this ensures a high degree of coke combustion in the particles that are captured: 99.8 % (peat particles) and 93.9 % (lignite). The underburning of fuel particles that are carried away is 0 % (peat) and 3.04 % (lignite). The underburning of fuel particles that are captured is 0.06 % (peat) and 0 % (lignite). The ratio of oncoming flows is 0.2, which ensures the minimum hydraulic resistance of the furnace. Peat and brown coal are similar to each other in chemical composition after the stages of coalification. Therefore, similar characteristics of combustion processes can be obtained by burning a composite

*mixture of peat/lignite (50 %/50 %), both in pulverized combustion and in the combustion of briquette granules and water-fuel suspension – water-peat-lignite.*

**Keywords:** *vortex furnace, combustion processes, counter swirling flows, peat, brown coal, composite mixture.*

**Вступ.** Видобуток бурого вугілля у країнах ЄС ведеться у Німеччині (171,5 млн т 2016 р.), Польщі (60,2 млн т), Чехії (38,5 млн т), Болгарії (31,2 млн т). У Туреччині видобуток бурого вугілля становить 50,9 млн т. Польща виробляє 80 % електроенергії з вугілля, а до 2050 р. має намір знизити цю частку до 50 %. Висока енергоємність ВВП України та недостатність власних ресурсів визначають залежність від постачання енергоносіїв. Тому актуальним є залучення місцевих поновлюваних джерел енергії до паливно-енергетичного балансу країни. Особливо це актуально для вироблення теплоти у системі житлово-комунального господарства (котельні установки систем муніципального теплопостачання). Використання місцевих палив (торф, буре вугілля) дозволяє знизити споживання природного газу, що імпортується.

Відповідно до «Енергетичної Стратегії України 2035» вугілля залишається одним із основних джерел в енергопостачанні України і продовжує бути основним гарантом безпеки держави. Проте використання місцевих палив потребує модернізації газових котелень. Одним з технічних рішень є розміщення вихрових передтопок, які дають змогу спалювати різні види палив за мінімальної модернізації котельної установки. Актуальним напрямом дослідження вихрової технології спалювання твердих палив (торф, буре вугілля) є розроблення технологічних схем спалювання композитного палива в топках із зустрічними закрученими потоками (ТЗЗП). Робочі процеси спалювання композитного палива в ТЗЗП є актуальним об'єктом для дослідження.

**Аналіз основних досліджень і публікацій.** Основними споживачами природного газу в Україні є населення та

бюджетні організації (34 %), промислові підприємства (45 %), комунальні ТЕЦ та котельні (20 %). На сьогодні видобуток в Україні енергетичного вугілля (марки А, Т, Д, ДГ, Г) становить 58 млн т, а споживання енергетичного вугілля на ТЕС та ТЕЦ становить близько 50 млн т, залишок складає близько 3,4 млн т. Цей обсяг вугілля не може забезпечити необхідне заміщення природного газу [1].

Як альтернативні паливні ресурси можуть бути використані:

- буре вугілля Дніпропетровського басейну;

- вуглецевмісні шлакові та сухі відходи вуглеутворення;

- вуглецевмісний матеріал золовідвалів антрацитових ТЕС.

Запаси бурого вугілля зосереджені на території Кіровоградської області, в Донецькому, Львівсько-Волинському та Дніпропетровському вугільних басейнах.

Запаси бурого вугілля складають більше 2 млрд т. Видобуток вугілля ведеться ВАТ «Олександрія-вугілля» відкритим способом. Родовище бурого вугілля – Мокрокалигирське (Черкаська область) – планова продуктивність 300–600 тис. т/р. Розглядається питання розробки Новодмитрівського родовища бурого вугілля в Барвінківському районі Харківської області з запасами понад 390 млн т.

Крім родовищ бурого вугілля в Україні є значні запаси торфу. В Україні обсяг родовищ торфу, що розробляються, становить близько 1160 млн т. Найбільші родовища зосереджені у Рівненській області (330 родовищ), Волинській (226 родовищ), Чернігівській (198 родовищ), Житомирській (187 родовищ) (ТОВ МПВФ «Енергетик»).

В Харківській області розвідано 6 родовищ торфу. Потужність торфу

коливається від 1,1 до 1,89 м, зольність від 30,5 до 41,0 %. Загальні запаси шести родовищ торфу складають 952,7 тис. т [2].

Заторфованість Рівненської та Волинської областей сягає 6,5 %. Тернопільська, Полтавська, Сумська, Харківська – не перевищує 2 % усієї території [3].

За даними Держкомгеології на території України розвідано 3118 торф'яних родовищ із геологічними запасами близько 2,2 млрд т. Загальна площа родовищ близько 3 млн га. У табл. 1 наведено енергетичний потенціал торфу.

Таблиця 1

## Енергетичний потенціал торфу в Україні

| Область           | Енергетичний потенціал, млн МВт·год |
|-------------------|-------------------------------------|
| Вінницька         | 136,4                               |
| Волинська         | 1370,1                              |
| Дніпропетровська  | 0,25                                |
| Житомирська       | 290,5                               |
| Івано-Франківська | 452                                 |
| Київська          | 716,5                               |
| Львівська         | 690,6                               |
| Миколаївська      | 126                                 |
| Полтавська        | 364,3                               |
| Рівненська        | 1176,2                              |
| Сумська           | 331,2                               |
| Тернопільська     | 304,3                               |
| Харківська        | 15,7                                |
| Хмельницька       | 236                                 |
| Черкаська         | 192                                 |
| Чернігівська      | 818,5                               |

В табл. 2 наведено обсяги видобутку торфу. В Україні працювало 37

торфобрикетних заводів (1991 р.), у 2010 р. їх залишилося 6 [www.biowatt.com.ua].

Таблиця 2

## Обсяги видобутку торфу (2010)

| Підприємства  | Обсяги видобутку, т |
|---------------|---------------------|
| Волинь торф   | 192000              |
| Житомир торф  | 17700               |
| Київ торф     | 37500               |
| Поділля торф  | 1200                |
| Рівне торф    | 166600              |
| Чернігів торф | 44270               |

**Сучасні технології спалювання торфу, бурого вугілля.** В Україні перебуває в експлуатації 235 комунальних та промислових ТЕЦ, понад 66 тис. промислових та 26 тис. комунальних

котелень. На підприємствах експлуатуються парові та водогрійні котли. Це котли малої потужності НІСТУ-5 та «Універсал», парові котли ДКВР, водогрійні котли з камерними топками типів КВГ, ТВГ,

ПТВМ, КВГМ тепловою потужністю від 2 до 200 МВт. Промислові ТЕЦ оснащені паровими котлами з камерними топками типів Е, БКЗ, ТП, ГМ паропродуктивністю від 35 до 220 т/год.

У роботі [33] наведено результати дослідження процесів спалювання бурого вугілля в середовищі з більш високим вмістом кисню.

Модернізація котлів можлива шляхом застосування топок низькотемпературної вихрової технології, вихрових передтопок, топок з киплячим шаром і топок, в яких поєднуються технології вихрового, шарового спалювання та технології киплячого шару, та шляхом заміни застарілих котлів на сучасні [5-14].

У роботах [5, 6] наведено параметри камерних топок енергетичних котлів. Конструкції топок, які реалізують технологію, що поєднує спалювання палив у киплячому шарі та вихрове спалювання наведено в [9, 10]. Огляд зарубіжних технологій спалювання твердих палив наведено в [34].

Спалювання місцевих палив та паливних відходів можливе у шарових топках та топках киплячого шару [4, 8] котлів малої потужності. Процеси спалювання торфу, бурого вугілля, біомаси розглянуто в роботі [19].

Опис топок з високотемпературним киплячим шаром (ВТКС) за технологією IGNIFLUID наведено в [26, 27]. Результати промислових випробувань фірмою ВАВСОСК наведені у [28, 29]. Показано, що переваги ВТКС-технології не було реалізовано через великі коефіцієнти надлишку повітря та втрати теплоти, а також через проблему спікання золи та шлакоутворення [8, 9] та шлаковидалення [10]. Топки з низькотемпературним киплячим шаром наведені в [11]. У роботах [12, 13] показано застосування НТВ-технології для котлів малої потужності.

Вихрову технологію спалювання твердих палив (НТВ-технологія) розроблено

та впроваджено на енергетичних котлах великої потужності.

Технологія факельного спалювання твердого палива – бурого вугілля (котли з кільцевою топкою) застосовується на великих енергоблоках потужністю від 300 до 1200 МВт [7].

Модернізація котлів малої потужності виконується шляхом розміщення передтопок, що охолоджуються повітрям [8, 9], та зміни технологічної схеми.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Мета роботи – дослідження процесів спалювання торфу та бурого вугілля у вихровій топці ТЗЗП та розробка композитної суміші торф – буре вугілля.

Для досягнення сформульованої мети потрібно вирішити такі завдання:

- для використання торфу та бурого вугілля в паливному балансі підприємств та населених пунктів необхідно оцінити енергетичний потенціал родовищ;

- для створення та використання композитної суміші торф – буре вугілля виконати чисельні розрахунки процесу спалювання.

**Основна частина дослідження.** Методику чисельного розрахунку процесів спалювання торфу та бурого вугілля наведено у роботі [15]. У цій роботі наведено розрахунки вихрової топки з верхньою подачею палива та первинного повітря, знизу топки – подача вторинного повітря. Характеристики палива такі.

Хімічний склад торфу (на горючу масу): С (вуглець) – 56 %; Н (водень) – 6 %; О (кисень) – 35 %; N (азот) – 2 %; S (сірка) – 1 %. Технічний склад торфу (на робочу масу): леткі – 38 %; кокс – 16 %; зольність – 6 %; вологість – 40 %; вища питома теплота згорання торфу (на робочу масу) – 12,3 МДж/кг. Склад шлаку торфу:  $\text{SiO}_2$  (25–40 %),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (5–30 %),  $\text{CaO}$  (30–55 %),  $\text{MgO}$  (0–10 %),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0–30 %). Температура плавлення золи становить 1070–1200 °С. Співвідношення  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=1,33>1,2$ , що задовольняє вимоги для топок з рідким шлаковидаленням.

Хімічний склад бурого вугілля: С (вуглець) – 70 %; Н (водень) – 6 %; О (кисень) – 35 %; N (азот) – 2 %, S (сірка) – 1 %. Технічний склад бурого вугілля (на робочу масу): варіант А: зольність  $A^P=20$  %, вологість  $W^P=30$  %, вихід летких  $V^P=25$  %; варіант Б: зольність  $A^P=35$  %, вологість  $W^P=30$  %, вихід летких  $V^P=30$  %.

Результати комп'ютерного моделювання процесів спалювання торфу та бурого вугілля в вихровій топці із закрученими зустрічними потоками: недопал механічний – 0,06 % (горючої маси), винос золи – 52 % (маси золи), кінцева температура золи до 1380 °С, температура газів на виході – 1711 °С (табл. 3).

Таблиця 3

Конструктивні та режимні параметри вихрової топки (паливо – торф, буре вугілля)

| Параметр, одиниця виміру                                      | Торф  | Буре вугілля |
|---------------------------------------------------------------|-------|--------------|
| D, діаметр топки, мм                                          | 600   | 600          |
| H, висота топки, мм                                           | 3645  | 3645         |
| W, теплова потужність, МВт                                    | 2,5   | 2,5          |
| $m_p$ , масова витрата палива, кг/с                           | 0,18  | 0,184        |
| $m_1$ , масова витрата первинного повітря, кг/с               | 1,26  | 1,26         |
| $t_1$ , температура первинного повітря, °С                    | 377   | 377          |
| $m_2$ , масова витрата вторинного повітря, кг/с               | 0,315 | 0,315        |
| $t_2$ , температура вторинного повітря, °С                    | 377   | 377          |
| $d_{\min}$ , мінімальний діаметр частинок палива, мкм         | 25    | 25           |
| $d_{\max}$ , максимальний діаметр частинок палива, мкм        | 250   | 250          |
| $\bar{d}$ , медійний діаметр, мкм                             | 57    | 57           |
| $\alpha_\Sigma$ , коефіцієнт надлишку повітря                 | 2,36  | 2,0          |
| температура газів на виході з топки, °С                       | 1711  | 1888         |
| концентрація кисню у вихідних газів, %                        | 5,2   | 3,4          |
| ступінь вигорання летких, %                                   | 100   | 100          |
| ступінь вигорання коксу з частинок, що вловлюються, %         | 99,8  | 93,9         |
| недопал механічний частинок, що виносяться, % (горючої маси)  | 0     | 3,04         |
| недопал механічний частинок, що вловлюються, % (горючої маси) | 0,06  | 0            |
| уловлювання частинок, %                                       | 47,6  | 100          |
| винос частинок, %                                             | 52,4  | 0            |

Порівнюючи результати розрахунку процесів спалювання торфу та бурого вугілля (рис. 1, 2), видно, що температурні

поля, поля швидкості та траєкторії руху частинок у топці ідентичні.

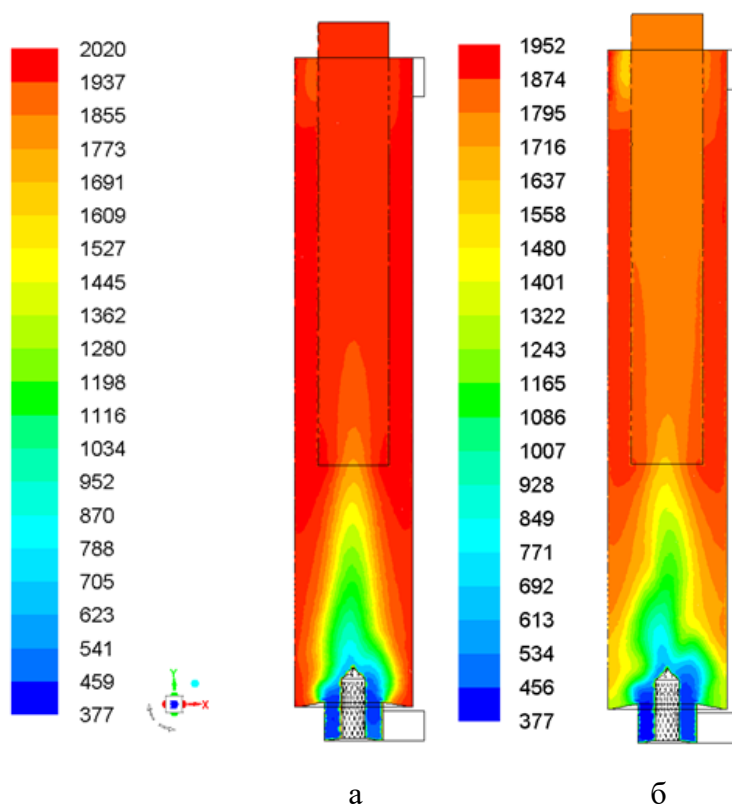


Рис. 1. Розподіл температури газу, градуси Цельсія ( $^{\circ}\text{C}$ ), у поздовжньому перерізі топки:  
а – торф; б – буре вугілля

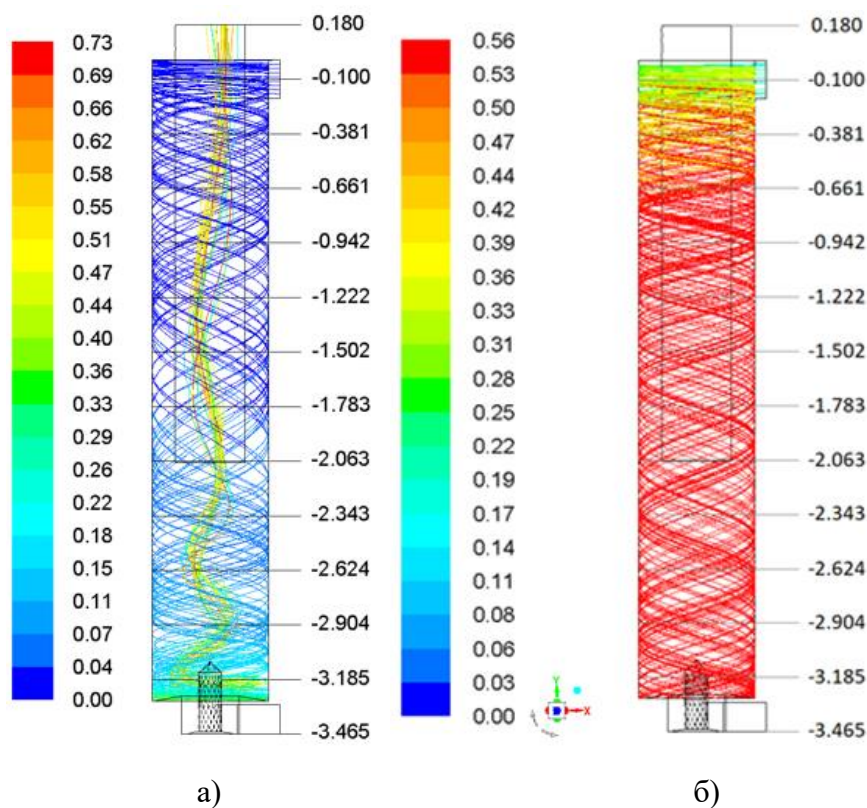


Рис. 2. Траєкторії частинок торфу з початковим діаметром 25 мкм, пофарбовані залежно від часу знаходження коксової частини в топці: а – торф; б – буре вугілля

Можна припустити, що подібні результати будуть отримані і при спалюванні паливної суміші торф-буре вугілля та водопаливної суспензії вода-торф-буре вугілля. Використання твердої композитної суміші торф-буре вугілля дозволить створити паливні пелети, гранули та виробляти їх на брикетних заводах [25].

Виробництво паливних пелет дозволяє вирішити кілька проблем: транспорту палива на великі відстані та повніше використання місцевих паливних ресурсів торфу та бурого вугілля. Виробництво водоторфовугільних палив також дає змогу вирішувати транспортну проблему та ефективність факельного спалювання низькосортних палив у котлах малої потужності, забезпечуючи виконання екологічних вимог [16–18, 20–24].

У роботах [16, 17] наведено характеристики водовугільних суспензій. Результати промислових випробувань процесів спалювання водовугільних

суспензій у котлі ДКВР наведено у [18]. Обґрунтування застосування водовугільних суспензій у топках малих котлів – в [20], а в [21, 22] – результати спалювання водовугільних суспензій у киплячому шарі. У роботах [23, 24] наведено результати застосування паливних гранул та брикетів [25].

Водовугільна суспензія, приготовлена з частинок високореакційного бурого вугілля або торфу, забезпечує швидке запалення і вигорання. Застосування торфу при розмелі та підготовці формує гель, що сприяє підвищенню стійкості суспензії [21].

**Висновки.** Результати чисельного дослідження дозволяють обґрунтувати ефективність спалювання композитної суміші торф-буре вугілля. Показано, що пилоподібна і водовугільна суміші можуть спалюватися у вихрових топках ТЗЗП, а гранули та брикети – у шарових топках та топках із киплячим шаром.

### Список використаних джерел

1. Чернявский Н. В. О перспективах и особенностях использования угля в промышленности и коммунальной энергетике. *Современная наука*. 2012. № 1 (9). С. 80–88.
2. Рудій М. Г. Мінерально-сировинна база агроруди на території Харківської області. *Вісник Харк. нац. ун-ту ім. Каразіна*. 2017. № 47. С. 56–63.
3. Гнеушев В. А. Украинский торф: некоторые проблемы и перспективы. *Уголь Украины*. 2011. № 11. С. 50–52.
4. Баскаков А. П., Мацнев В. В., Распопов И. В. Котлы и топки с кипящим слоем. Москва: Энергоатомиздат, 1995. 350 с.
5. Померанцев В. В. Основы практической теории горения. Ленинград: Энергоатомиздат, 1986. 312 с.
6. Рундыгин Ю. А., Григорьев К. А., Скудницкий В. Е. Внедрение технологии низкотемпературного вихревого сжигания бурого угля при модернизации котельных установок. *Электрические станции*. 2000. № 5. С. 38–47.
7. Серант Ф. А. Разработка и исследование кольцевой топки, ее промышленное внедрение и испытания на котле производительностью 820 т/ч: дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 1999.
8. Пузырев Е. В. Исследование топочных процессов и разработка котлов для низкотемпературного сжигания горючих отходов и местных топлив: дис. ... д-ра техн. наук. Барнаул: АГТУ, 2013.
9. Обухов И. В. Исследование низкотемпературной вихревой топки котла малой мощности при сжигании Дальневосточных и Канско-Ачинских бурых углей: дис. ... канд. техн. наук. Владивосток: ДВГТУ, 1999.

10. Григорьев К. А. Разработка и внедрение технологических решений, повышающих эффективность низкотемпературного вихревого сжигания топлива: дис. ... д-ра техн. наук. Санкт Петербург: ЦКТИ, 2010.
11. Совершенствование технологии низкотемпературного вихревого сжигания топлива и перспективы модернизации котельных установок / Ю. А. Рундыгин и др. *Энергомашиностроение*: труды СПбГПУ. 2004. № 491. С. 128–135.
12. Рундыгин Ю. А. Модернизация котельной техники на основе низкотемпературной вихревой технологии сжигания твердых топлив. *Повышение эффективности производства и использования энергии на Дальнем Востоке*: матер. IV семин. вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике. Владивосток: ДВГУ. 2006. С. 83–89.
13. Опыт освоения НТВ – сжигания бурых углей в топке котла малой мощности / О. В. Распутин и др. *Вестник УГТУ-УПИ*. 2003. № 8 (28). С. 73–78.
14. Саломатов В. В. Природоохранные технологии на тепловых и атомных электростанциях. Новосибирск, 2006. 852 с.
15. Redko A., Burda Y., Dzhyoiev R., Norchak V. et al. Numerical modeling of peat burning processes in a vortex furnace with countercurrent swirl flows. *Thermal Science*. 2021. 25. pp. 1905–1919. URL: <https://doi.org/10.2298/TSCI190305158R>.
16. Сжигание каменного угля в виде водоугольной суспензии в котлах малой мощности / Л. Н. Мальцев и др. *Теплоэнергетика*. 2014. № 7. С. 25.
17. Глушников Д. О., Стрижак П. А., Чернецкий М. Ю. Органоводоугольное топливо: проблемы и достижения (обзор). *Теплоэнергетика*. 2016. № 10. С. 31–41.
18. Результаты опытно-промышленных испытаний работы мазутного котла ДКВР 6,5/13 на водоугольном топливе / Е. М. Пузырев, В. И. Мурко и др. *Теплоэнергетика*. 2001. № 2. С. 69–72.
19. Варес В. Справочник потребителя биотоплива. Таллинн: ТТУ, 2005. 183 с.
20. Долинский А. А., Халатов А. А. Водоугольное топливо: перспективы использования в теплоэнергетике и жилищно-коммунальном секторе. *Пром. Теплотехника*. 2007. Т. 29. № 5. С. 70–79.
21. Исследование реодинамики и горения композиционных водоугольных суспензий / А. П. Бурдуков и др. *Теплоэнергетика*. 1997. № 6. С. 58–62.
22. Пронь Г. П., Пузырев Е. М. Исследование возможности утилизации нетрадиционных видов топлив в котлах с кипящим слоем. *Ползуновский весник*. 2004. № 1. С. 125–128.
23. Технология приготовления топливных гранул из смеси торфа и вторичного сырья / В. И. Кормилицин и др. *Вестник МЭИ*. 2011. № 5. С. 9–14.
24. Борзов А. И., Баранова М. П. Приготовление водоугольных суспензий из бурых углей с использованием различных мельничных устройств. *Химия твердого топлива*. 2006. № 4. С. 40–45.
25. Кегель К. Брикетирование бурого угля: пер. с нем. Москва: Углекимиздат, 1957. 659 с.
26. Squires A. M. Pulverized-Fuel Combustion in Trouble. *American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry*. 1970. № 2(14). P. 18–20.
27. Godel A. A. Origin of the «Ignifluid Combustion Process» and conception design, followed by the description of the projector a new fluid bed combustor. *Proceeding of the First Int. Conf. FBC*. 1968. P. 7–8.
28. Yerushalmi J. et al. Agglomeration of Ash in Fluidized Beds Gasifying Coal: The Godel Phenomenon. *Science, New Series*. 1975. № 4177(187). P. 41–46.
29. Kumar R., Boilers, A Practical Reference. Boca Raton: CRC Press. 2013. 210 с.

30. Кубин М. Сжигание твердого топлива в кипящем слое: пер с чешск. Москва: Энергоатомиздат, 1987. 112 с.
  31. Simeon O. Fluidized Bed Combustion. New York. 2004. 250 с.
  32. Ohman M., Nordin A. A new method for quantification of fluidized bed agglomeration tendencies: a sensitivity analysis. *Energy and Fuels*. 1998. № 12. P. 18-22.
  33. Chen X., Zhang Y., Zhang Q., et al. Thermal analysis of the lignite combustion in oxygen-enriched atmosphere. *Thermal Science*. 2015. 19. № 3(19). P. 801–811.
  34. Котлер В. Р. Специальные топки энергетических котлов. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 104 с.
- 

Норчак Володимир Іванович, аспірант кафедри теплогазопостачання, вентиляції і використання теплових вторинних енергоресурсів Харківського Національного університету будівництва та архітектури. ORCID ID: 0000-0003-4048-7159. E-mail: andrey.ua-mail@ukr.net.

Norchak Volodymyr Ivanovich, postgraduate student, department of Heat and Gas Supply, Ventilation and Use of Thermal Secondary Energy Resources, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. ORCID ID: 0000-0003-4048-7159. E-mail: andrey.ua-mail@ukr.net.

Статтю прийнято 14.02.2022 р.

---

## БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

---

УДК 666.973

### МІНЕРАЛЬНІ ДОБАВКИ В ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА АВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНУ

Канд. техн. наук Д. Г. Рудченко, д-р техн. наук В. Р. Сердюк

### MINERAL ADDITIVES IN THE TECHNOLOGY OF AUTOCLAVE CONCRETE CONCRETE PRODUCTION

PhD (Tech) D. Rudchenko, Dr. (Tech.) V. Serdyuk

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.199.2022.258670>



**Анотація.** Будівельна галузь є одним з найбільших споживачів енергетичних та сировинних ресурсів і, як наслідок, несе відповідальність за надмірні викиди парникових газів. Доля автоклавного газобетону (АГБ) в структурі стінових матеріалів багатьох європейських країн становить 50 % і більше. Через низьку енергоємність виробництва, високі експлуатаційні та будівельно-технологічні властивості, відносно низьку вартість та екологічність цей матеріал витісняє з будівельного ринку традиційні стінові матеріали (керамічну і силікатну цегли, керамзитобетон).

В статті наведено аналіз сучасних підходів зменшення енергоємності виробництва автоклавних газобетонів за рахунок впровадження сучасних технологічних рішень, які забезпечують зменшення клінкерної складової у газобетонній суміші. Показано перспективи використання золи-винос, доменних гранульованих шлаків, інших мінеральних добавок, які сприяють скороченню витрат цементу та покращують експлуатаційні властивості газобетону автоклавного тверднення (АГБ).

Показано, що найбільш прийнятним технологічним прийомом зменшення ресурсо- та енергозбереження технології виробництва АГБ є перехід на виробництво матеріалу низької густини при збереженні його фізико-механічних властивостей.

Наведено результати оцінювання добавки метакаоліну в складі АГБ. Пошук недорогих і доступних місцевих ефективних пуцоланових добавок дає змогу підвищити економічну та екологічну привабливість виробництва автоклавного газобетону. Встановлено, що добавка метакаоліну може виступати як альтернативний компонент в газобетонній суміші і замінювати гіпсову добавку.

Добавки кальцинованої глини, зокрема метакаоліну  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ , відносяться до ефективних пуцоланових добавок. Проведені лабораторні і експериментальні дослідження в промислових умовах довели зростання фізико-механічних властивостей автоклавного газобетону.

**Ключові слова:** автоклавний газобетон, енергозбереження, активні мінеральні добавки, метакаолін.

**Abstract.** The construction industry is one of the largest consumers of energy and raw materials. It is also responsible for excessive greenhouse gas emissions. The share of autoclaved aerated concrete (AAC) in the structure of wall materials in many European countries reaches 50 % and more. Due to low energy consumption of production, high operational and construction-

technological properties, relatively low cost, and environmental friendliness, these materials displace traditional wall materials from the construction market (ceramic and silicate bricks, expanded clay concrete).

The article presents an analysis of modern approaches to reducing the energy consumption during AAC production, such as reducing the clinker component in the aerated concrete mixture. Prospects for the use of fly ash, blast furnace granulated slag and other mineral additives that reduce cement consumption and improve the performance of AAC are presented.

It is shown that the most acceptable technological method of reducing the resource and energy saving technology of AAC production is the transition to the production of low-density material while maintaining its physical and mechanical properties.

The results of the evaluation of metakaolin additives in the composition of AAC are given. Inexpensive and affordable local effective pozzolanic additives can increase the economic and environmental attractiveness of autoclaved aerated concrete. It is established that the addition of metakaolin can act as an alternative component in aerated concrete mixtures and replace gypsum additive.

Additives of calcined clay, in particular metakaolin  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$  is one of the most effective pozzolanic additives. Laboratory and experimental studies have shown an increase in the physical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete.

**Keywords:** autoclaved aerated concrete, energy saving, active mineral additives, metakaolin.

**Вступ.** Глобальні зміни клімату, виснаження природних ресурсів і порушення світової екологічної системи пов'язані, в тому числі, і з будівельним комплексом. Будівлі світу використовують близько 40 % всієї споживаної первинної енергії, 67 % всієї електрики, 40 % всієї сировини і 14 % всіх запасів питної води, а також виробляють 35 % всіх викидів вуглекислого газу і мало не половину всіх твердих міських відходів [1].

Необхідність зменшення енерговитратності в будівельній галузі пов'язана не тільки з вичерпністю викопних видів палива та зростанням його вартості, але і з необхідністю зменшення викидів парникових газів. Надмірне спалювання викопних вуглеводнів та зростання викидів парникових газів суттєво впливають на розвиток економіки в цілому. За даними дослідження, опублікованого британською благодійною організацією Christian Aid, у 2021 р. в результаті 10 найбільш руйнівних кліматичних катаклізмів (урагани і шторми, засуха) нанесено збитків у розмірі 170 млрд дол.

Основним стіновим матеріалом у багатьох європейських країнах на сьогодні став АГБ. Його питома вага в структурі

стінових матеріалів в Україні перевищує 53 %, і він стрімко витісняє з будівельного ринку енергомісткі на стадії виробництва керамічну і силікатну цегли та керамзитобетон.

Конструкційно-теплоізоляційний АГБ з класом міцності на стиск С1,5–С2 і щільністю 300–400 кг/м<sup>3</sup> одночасно забезпечує несучу здатність стін малоповерхових будинків і не потребує додаткового утеплення при прийнятній товщині стіни 350–400 мм. Коефіцієнт теплопровідності газобетону D300 в сухому стані становить 0,08 Вт/м·К, а в умовах експлуатації з урахуванням рівноважної вологості (4–6 %) становить 0,095 Вт/м·К, що практично в 5–7 разів нижче, ніж у традиційної керамічної цегли. Саме через високі теплоізоляційні властивості на стадії експлуатації та низьку енергозатратність на стадії виробництва АГБ продовжує витісняти з будівельного ринку традиційні стінові матеріали. Причому, такі тенденції зміни структури стінових матеріалів відбуваються і в країнах, які багаті на природні джерела вуглеводнів, – в Казахстані, РФ.

Енерговитрати при виробництві АГБ в 1,8–2,7 раза менші, ніж при виробництві

керамічних блоків і глиняної цегли, а витрати теплової енергії при експлуатації таких будівель на 1 м<sup>2</sup> стіни менші на 30-40 %. Застосування блоків з АГБ у стінах будівель замість цегли скорочує у 1,4-2 рази трудомісткість будівництва [3].

Питома вага АГБ в структурі стінових матеріалів багатьох європейських країн зросла до 40-60 %. Його переваги цілком очевидні: низька енергоємність виробництва, високі експлуатаційні та будівельно-технологічні властивості, відносно низька вартість, екологічність та інше. З 2000 по 2020 рр. обсяги виробництва АГБ в Україні зросли в 40 разів і дещо перевищили 4 млн м<sup>3</sup>. Основними виробниками АГБ заявлено про те, що протягом наступних 2-3 років в Україні буде побудовано ще два нових заводи на заході країни.

Згідно з прогнозом аналітичного агентства [4], яке включає 1700 дослідницьких груп з 81 країни світу обсяг світового ринку автоклавного газобетону зросте з 18,8 млрд дол США в 2020 р. до 25,2 млрд дол США до 2025 р. при середньорічному темпі зростання 6,0 % в період з 2020 по 2025 рр.

Разом з тим, доступні сировинні матеріали, з яких виробляється АГБ, такі як цемент і вапно, є високоенергозатратними, а їх виробництво супроводжується викидами парникових газів не тільки через нагрів вихідної сировини відповідно до 1500 і 950 °С, але і за рахунок декарбонізації вапняку, яка супроводжується виділенням CO<sub>2</sub>. За даними роботи [5] основними джерелами викидів CO<sub>2</sub> при виробництві цементу є саме прямі викиди при кальцинації – 50 %, від спалювання палива – 40 % та побічні викиди, пов'язані з використанням електроенергії – 10 %.

За даними МЕА виробництво цементу відповідальне за 8 % від всіх викидів вуглекислого газу в світі. Обсяг викидів CO<sub>2</sub> вугільними ТЕС світу становить 1,1 кг/кВт·год, у ЄС – 0,868 кг/кВт·год, а за усередненими даними на застарілих вітчизняних ТЕС – до 1,4 кг/кВт·год.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Автоклавна обробка сировинної газобетонної суміші є найбільш вагомим енерговитратним технологічним етапом виробництва АГБ.

У процесі автоклавного синтезу утворюються низькоосновні гідросилікати кальцію, типу тобермориту, при температурі близько 179–200 °С і надлишковому тиску 10–14 МПа пересиченої пари. Саме температурний фактор і підвищений тиск пари забезпечують прискорений синтез новоутворень, які характеризуються високою міцністю і низькою усадкою порівняно з газобетоном, який твердне в звичайних нормальних умовах.

Як відомо, на початковому етапі автоклавного твердіння газобетону утворюються високоосновні гідросилікати кальцію C<sub>2</sub>SH<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>SH(A), C<sub>2</sub>SH(B), стійкі лише в насичених розчинах гідроксиду кальцію. Вони мають підвищену рівноважну розчинність у поровій рідині в'язучих систем і утворюють волокнисті та пластинчасті мікрокристали. В подальшому вони перетворюються в низькоосновні, які є основними носіями міцності.

Багаточисельні дослідження фазового складу АГБ показують, що газобетонна суміш на основі вапна, портландцементу і кварцового піску за даними РФА містить такі основні фази: 11,3 Å тоберморит d/n = 11,30; 2,97; 2,15; 2,00; 1,84 Å, Ca(OH)<sub>2</sub> d/n = 4,93; 2,63; 1,93; 1,8 Å, C-S-H (I) d/n = 3,079; 2,80; 1,82 Å, гідрогранати d/n = 5,06; 3,34; 2,44; 2,32 Å, гіроліт d/n = 4,25; 3,85; 3,16 Å. Вміст тобермориту в складі цементуючої маси АГБ становить біля 40 %.

У роботах П. І. Боженова [2] показано, що збільшення тиску в автоклаві з 0,8 до 1,2 МПа підвищує міцність газобетону на 40 %, а до 2,5 МПа – на 100 %. Підвищений робочий тиск пари автоклавної обробки дає змогу розширити сировинну базу виробництва АГБ і забезпечує потенційну економію витрат в'язучих речовин.

Аналіз науково-технологічного стану виробництва АГБ провідних світових виробників підтверджує те, що на сьогодні технологічно є неприйнятним підвищення робочого тиску пари і температури вище прийнятих параметрів з позиції техніки безпеки, хоча ефективність такого технологічного прийому є давно доведеною. Завданням гідротермальної обробки (запарювання) виробів з АГБ або щільних силікатних матеріалів (цегли) є оптимізація сировинного складу суміші та технології виробництва, які є максимально прийнятні для синтезу новоутворень в системах  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$  і  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ . При цьому для газобетонних виробів важливим залишається зменшення їхньої густини при збереженні міцності.

В проведених нами дослідженнях [6] наведено результати зменшення енергоємності виробництва АГБ на стадії автоклавної обробки шляхом якісного вакуумування автоклаву, оптимізації режимів автоклавування та складу сировинної суміші. Реалізація низки заходів, у тому числі і зменшення густини сировинної суміші, забезпечує економію енергії при автоклаві ванни та збільшує оборотність автоклаву на добу з 2,0 до 2,5 циклу.

Величезний комплексний ефект зменшення енергоємності виробництва АГБ досягається саме шляхом підвищення його коефіцієнта конструктивної якості – зменшення густини при одночасному підвищенні міцності. На момент розпаду СРСР автоклавний газобетон випускався з середньою щільністю  $643 \text{ кг/м}^3$  [7]. На сьогодні замість «важких» стінових блоків виробляються газобетонні блоки щільністю  $400\text{--}500 \text{ кг/м}^3$  з точними лінійними розмірами та покращеними фізико-механічними характеристиками, а кращі компанії-виробники АГБ виготовляють газобетонні стінові блоки густиною  $300\text{--}350 \text{ кг/м}^3$  при збереженні їхньої міцності та інших експлуатаційних характеристик.

За даними відкритих джерел до провідних світових лідерів виробництва «легкого» АГБ слід віднести компанію Н+Н, у складі якої працює 13 заводів, на яких виробляється газобетон марки D300 з класом міцності C2,0. Найбільший світовий виробник – компанія Xella володіє 95 заводами зі штатом працівників понад 7 тис. люд. Обсяг продажів компанії в 2019 р. склав 1,6 млрд євро. Крім того, компанія Xella являється єдиним у світі виробником найлегшого теплоізоляційного газобетону, що виготовляється під торговою маркою Ytong Multipor (D100). Компанія виробляє стінові блоки під торговою маркою Ytong марки D300 з класом міцності C2,0.

На пострадянському просторі та ринку східноєвропейських країн компанія «Аерок» досягла в загальному виробництві АГБ високої частки виробництва енергоефективного легкого конструкційно-теплоізоляційного газобетону марки D300 (23 %) та D400 (55 %). «Аерок» ініціював введення в ДСТУ Б В.2.7-45: 2010 Зміни № 1 і № 2, які доповнили номенклатуру теплоізоляційного газобетону марками D100 і D150 і віднесли теплоізоляційний газобетон щільністю  $300$  і  $350 \text{ кг/м}^3$  до конструкційно-теплоізоляційного за рахунок підвищення його міцності до класу C1,5–C2,0. Майже 1 % продукції компанії «Аерок» припадає на легкий теплоізоляційний газобетон марки D150.

Перехід на виробництво газобетону з марки D600 до D300 дозволяє виготовити удвічі більше продукції з одиниці сировини, скоротити витрати на фундамент та транспортні витрати, збільшити продуктивність праці при виконанні кам'яних робіт і отримати додатковий ефект, у тому числі і екологічний, від зменшення спожитої енергії як на стадії виробництва матеріалу, так і на стадії експлуатації збудованих будівель.

Автоклавна технологія виробництва дає змогу частково замінити постійно зростаючі в ціні традиційні в'язучі (портландцемент і вапно) недефіцитною

сировиною – природними і техногенними мінеральними добавками, до використання яких постійно зберігається інтерес. Він обумовлений високою енергозатратністю виробництва цементу, а останніми роками увага прикута і до негативних екологічних наслідків.

Висококальцієві золи ТЕЦ можуть виконувати функцію в'язучого [8] або служити альтернативою кремнеземистому компоненту АГБ. За даними роботи [9] в Лондоні з 1951 р. працюють заводи АГБ, побудовані поруч з електростанціями, які працюють на вугіллі. Більшість газобетонних заводів у Великобританії працюють з використанням золи-винос, але через закриття електростанцій, що працюють на вугіллі, переходять на використання піску або гібридного компоненту (пісок + зола). В РФ за даними асоціації виробників АГБ лише 10 % заводів у виробництві АГБ використовують золу-винос. Масштабно зола-винос використовується в Китаї, Польщі. В Україні, Казахстані та Білорусі вона не використовується. Використання золи-винос з однієї сторони створює певні технологічні труднощі через зміни її дисперсності, наявність у її складі незгорілого вуглецю і можливих забруднень. В європейських країнах АГБ, виготовлений з використанням золи-винос отримав назву «сірий» газобетон.

Зола-винос містить активний кремнезем і глинозем ( $\text{SiO}_2$  і  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), які знаходяться в аморфному стані і навіть при нормальній температурі реагують з  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  з утворенням гідросилікатів кальцію, а  $\text{Al}_2\text{O}_3$  утворює гідроалюмінат кальцію –  $\text{C}_3\text{AH}_6$ . Утворення високодисперсних гідросилікатів та гідроалюмінатів кальцію призводить до покращення властивостей матеріалу та мікроструктури цементного каменя.

Використання в технології виробництва АГБ золи-винос, доменного гранульованого шлаку (ДГШ) і мікрокремнезему рекомендується

відповідними нормативними документами [10].

Хоча цемент є найбільш енергомістким компонентом газобетону, але ринкова ціна вапна в силу різних причин в Україні для виробника АГБ є вищою за цемент. Загалом будівлі в світі споживають до 40 % енергії та відповідальні за 36 % викидів вуглекислого газу. В останні кілька десятиліть у світовій цементній промисловості спостерігається істотне зниження частки клінкеру в цементі. Якщо в 1990 р. вміст клінкеру в цементі становив 0,9 кг/кг цементу, то в 2003 р. вміст знизився до 0,85 кг/кг цементу. Виробництво цементу та цементних бетонів все більше орієнтується на використання активних мінеральних добавок, що супроводжується меншими енергетичними затратами і шкідливими викидами. Існуючі тенденції виробництва цементів у Європі свідчать про зростання виробництва композиційних портландцементів типу СЕМ ІІ/В. Прогнозується, що при виробництві цементу в 2050 р. вміст клінкеру в середньому буде складати лише 70 % [11].

Використання активних мінеральних добавок в технології виробництва традиційних бетонів дозволяє частково замінити постійно зростаючі в ціні традиційні в'язучі (портландцемент і вапно). Проте наявність таких добавок в АГБ потребує суттєвого корегування та збалансування у часі кінетики зростання пластичної міцності газобетонного сирця і кінетики газовиділення.

Міцність АГБ залежить не тільки від міцності силікатної зв'язки, але і від правильності макропор газобетону. При чому, чим менше густина АГБ, тим більш відчутним буде цей вплив, оскільки товщина мідпорових перегородок при зменшенні густини матеріалу буде зменшуватись. Практична зацікавленість до активних мінеральних добавок буде і подальше зростати, у тому числі і при виробництві цементу та будівельних матеріалів, виготовлених на його основі, зокрема і АГБ.

Великий науково-практичний інтерес і популярність на сьогодні в зарубіжних країнах набуває така добавка, як метакаолін.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Дослідження проблеми зменшення витрат енергії та викидів парникових газів при виробництві автоклавного газобетону шляхом використання активних мінеральних добавок, зокрема метакаоліну.

Для досягнення поставленої мети потрібно дослідити питання, які пов'язані з узагальненням світового досвіду використання метакаоліну в цементних системах, механізму його дії, характеристики сировинної бази та її поширення, провести оцінку впливу добавки на фізико-механічні властивості автоклавного газобетону та її вплив на морфологію базового гідросиліката кальцію – тобермориту.

**Основна частина дослідження.** Ще на початку 40-х років XX століття Всесоюзним науково-дослідним інститутом цементу було проведено масштабні та систематичні дослідження пуцоланічної активності поширених на території СРСР 207 різновидів глин, серед яких були і каолінові [12]. Серед окремих результатів зазначається, що всі глини, що піддавались випалу при температурі 500–800 °С, проявляють пуцоланічні властивості тою чи іншою мірою.

За даними роботи [5] світові розвідані запаси каолінів оцінюються в 14,8 млрд т. Україна володіє найбільшими запасами каолінів серед країн СНД – 70 % запасів і 80 % добування.

Станом на кінець 2018 р. Україна займала четверте місце серед країн світу за обсягом видобутку каоліну, який становить 7 % від світового рівня. Україна посідає провідне місце у світі, поступаючись лише США, Великобританії і Китаю. Каолінові глини представлені двома генетичними типами: каоліном первинним (основного і лужного складу) та каоліном вторинним. Територія розміщення первинних каолінів Українського щита (УЩ) простягається на

950 км від Полісся до Азовського моря шириною 350 км [14].

Термічно активовані глини класифікуються європейським стандартом EN197-1-2000 як штучні пуцолани. Глини – це найбільш поширена та найдешевша сировина для виробництва та використання як добавки у складі композиційних в'язучих. Тонкодисперсна прожарена і випалена глина, як пуцоланова добавка до мінеральних в'язучих, знайшла застосування з давніх часів і до останнього часу у вигляді цем'янки, глиніту, аглопориту, горілих порід, керамзиту та керамзитового пилу [15]. Цем'янка – продукт помелу обпалених до спікання при температурах 900 °С керамічних матеріалів. Глініт отримують шляхом подрібнення глин, обпалених при температурі 600–800 °С.

На відміну від мікрокремнезему, метакаолін є сумішшю активного кремнезему і глинозему майже в рівних пропорціях, тобто він є одночасно алюмінатним і силікатним пуцоланом. За останні десятиліття він набув застосування як ефективна пуцоланова добавка, яку отримують шляхом прожарювання каолінових глин з вмістом каолініту 90 % і більше, до складу яких входить 50–55 %  $\text{SiO}_2$  та 40–45 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [16].

Метакаолін на території СНД масштабно не виробляється, а виготовлений окремими підприємствами не завжди характеризується стабільністю показників пуцоланічної активності.

Вплив метакаоліну на гідратацію цементу та формування структури цементного каменю обумовлений високою його дисперсністю та пуцолановими властивостями. У роботі [17] показано, що добавки прожареної при 600 °С і меленої до 250 м<sup>2</sup>/кг полімінеральної глини з вмістом каолініту 51 % в портландцементі призводять до більш високого підвищення міцності при стисканні цементного каменю, ніж добавки метакаоліну.

Метакаолін є відносно новим компонентом у складі АГБ. Саме через високу хімічну активність цієї добавки відносно до вільного вапна вона викликає підвищений інтерес у виробників АГБ. Природна сировина (каолін) має хімічний склад, %:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 39,5;  $\text{SiO}_2$  – 46,5;  $\text{H}_2\text{O}$  – 14, що відповідає стехіометричній формулі  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  або структурній формулі  $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$ . Хімічний склад каоліну представлений формулою  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , а після термообробки видаляється кристалічна вода і утворюється аморфний силікат алюмінію –  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ .

Наявність в складі метакаоліну крім активного  $\text{SiO}_2$  і активного  $\text{Al}_2\text{O}_3$  забезпечує підвищену його пуцоланічну активність. Узагальнення аналітичних досліджень, проведених багатьма авторами, зводиться до наявності трьох дійових факторів, які

позитивно впливають на підвищення міцності та довговічності бетонів, розчинів при частковій заміні цементу метакаоліном:

- прискорення гідратації цементу;
- пуцоланові реакції з портландитом;
- ефект зміцнюючого наповнювача.

За даними роботи [18], введення до складу портландцементу 10 % метакаоліну призводить до зниження вільного  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в поровому розчині на 70 %, а при вмісті в портландцементі 20 % метакаоліну вміст вільного  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  дорівнює нулю.

При проведенні досліджень нами використовувався метакаолін (ТУ У 14.2-36363275-001:2009) виробника ТОВ «Мета-Д», Дніпропетровська обл. Хімічний склад метакаоліну відповідно з паспортом якості №150621-1 наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад метакаоліну

| № з/п | Найменування показника, масова частка оксиду, %; інші характеристики | Значення                                |
|-------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1     | $\text{Al}_2\text{O}_3$                                              | 43,32                                   |
| 2     | $\text{SiO}_2$                                                       | 53,64                                   |
| 3     | $\text{Fe}_2\text{O}_3$                                              | 0,73                                    |
| 4     | $\text{TiO}_2$                                                       | 0,51                                    |
| 5     | $\text{CaO}$                                                         | 0,58                                    |
| 6     | Коефіцієнт відбиття, %                                               | 77,5                                    |
| 7     | Розчинність у воді, %                                                | 0,13                                    |
| 8     | Абразивність, мг                                                     | 79,4                                    |
| 10    | Масова частка залишку на ситі 0063, %                                | 1,32                                    |
| 11    | Питома поверхня, $\text{м}^2/\text{г}$                               | 15                                      |
| 12    | Масова доля вологи, %                                                | не більше 1%                            |
| 13    | Зовнішній вигляд                                                     | від білого до кремового кольору         |
| 14    | Розсипчастість, %                                                    | 100                                     |
| 15    | Особливі властивості                                                 | нетоксичний, радіоактивність 18 мкр/год |

Пуцоланова активність метакаолінів залежить від вмісту та особливостей структури основної речовини (метакаоліну), його дисперсності, кількості та природи домішкових компонентів.

Глини, кальциновані при 750 та 1000 °С, очевидно можна застосовувати як заміник вапна у складі силікатної цегли.

При цьому необхідно ретельно підбирати температуру теплової обробки глини. Використовуючи низькосортні каолінові кальциновані глини як частину мінерального в'язучого в АГБ, ними можна замінити сульфати кальцію та частково цемент без зниження класу міцності газобетону. Під час утилізації та рециклінгу відходів АГБ,

виготовленого з використанням кальцинованих глин, не потрібно вживати спеціальних заходів для видалення сульфатів.

Оскільки в процесі автоклавного синтезу новоутворень АГБ на першому етапі створюються високоосновні гідросилікати кальцію в середовищі вільного вапна, а метакаолін зв'язує вільне вапно і виступає інтенсифікатором утворення низькоосновних гідросилікатів кальцію, тому цілком очевидно, що метакаолін в

перспективі може стати ефективною добавкою саме в автоклавні силікатні матеріали. В роботі [19] показано, що метакаолін навіть у традиційних бетонах взаємодіє з портландитом  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  цементу з утворенням гелю гідросилікату кальцію, гідрогеленіту  $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{C}_2\text{ASH}_8$ ) і, можливо, деяких солей гідроалюмінатів кальцію ( $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ ,  $\text{C}_3\text{AH}_6$ ) за орієнтовною схемою (1):



При збереженні оптимального вмісту в складі в'язучого метакаолін здатний пов'язувати луги у нерозчинні новоутворення, які за хімічним складом аналогічні цеолітам та польовим шпатам. Ця його властивість та новоутворення обумовлюють більш надійний захист

бетонних виробів та конструкцій від висолоутворення та руйнування внаслідок силікатно-лужної реакції. На рис. 1 наведено потенційні продукти реакцій взаємодії метакаоліну з гідроксидом кальцію.

|                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O}$ | $\text{Ca}(\text{OH})_2$<br>$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ ,<br>$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$<br>$2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Рис. 1. Можливі новоутворення в системі (метакаолін + вапно + вода) в процесі автоклавної обробки газобетону

Крім того, дрібнодисперсні пластинчасті частинки метакаоліну забезпечують бетонним і розчинним сумішам високу пластичність і стійкість до розшарування. Ці властивості особливо цінні для високорухливих сумішей, таких як самовирівнювальні суміші для підлоги і самоущільнювальні бетони, сухі будівельні суміші.

За даними роботи [20] надійні результати при використанні метакаоліну в різних галузях можуть бути досягнуті лише за оптимального режиму термічної обробки каоліну.

До складу сировинної суміші газобетону марки D300 без газоутворювача вводилась добавка метакаоліну. Відформовані зразки у вигляді контрольних зразків – балочок з використанням форм типу ЗФБ–40, в подальшому за аналогією до технологічного регламенту виробництва АГБ, після формовки тверднули в камері попереднього дозрівання і піддавались автоклавній обробці за стаціонарним режимом промислового виробництва АГБ [21].

На рис. 2 наведено залежність впливу добавки метакаоліну 5–15 % від маси цементу на міцність газобетону.

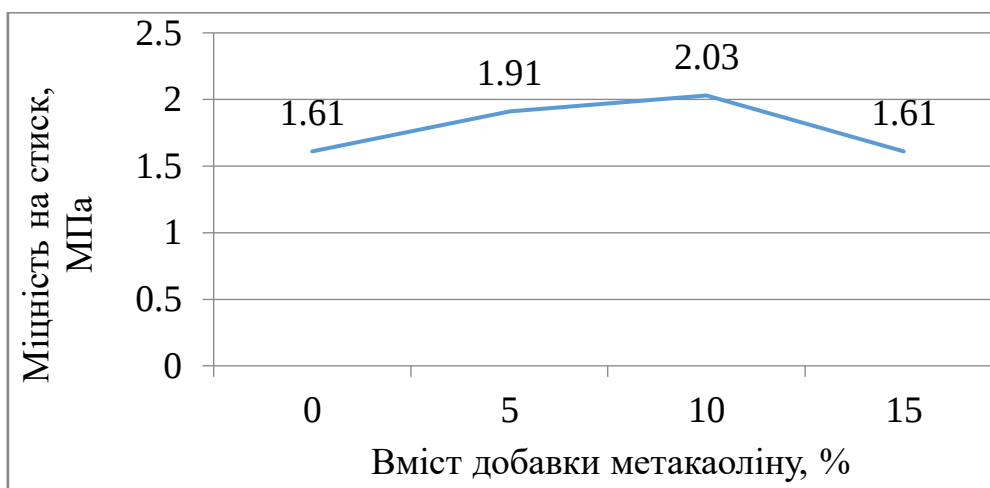


Рис. 2. Динаміка впливу добавки метакаоліну на міцність при стисканні газобетонної суміші D300

Як видно з рис. 2 зі зростанням добавки до 10 % зростає міцність автоклавованої газобетонної суміші. Відповідно при добавці 5 % від маси цементу міцність на стиск зростає майже на 12 %, а при 10 % добавки — на 26 %. При дозуванні добавки 15 % метакаоліну

міцність газобетонної суміші з добавкою вирівнюється з міцністю зразка без добавки.

Дія добавки метакаоліну на згин газобетонної суміші має аналогічний характер. Оптимальне дозування 10 % забезпечує приріст міцності на згин на 24,7 %. (рис. 3).

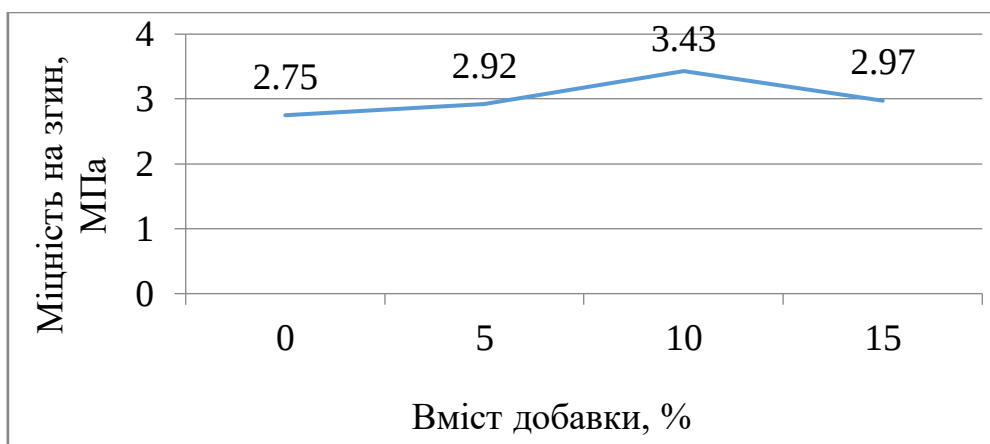


Рис. 3. Динаміка впливу добавки метакаоліну на міцність при згині газобетонної суміші D300

Аналогічні тенденції зростання міцності цементних матеріалів залежно від дозування 5–15 % метакаоліну зберігаються і для щільних бетонів, і наведені в багатьох публікаціях.

Порівняння морфології тобермориту зразка рядової газобетонної суміші компанії «Аерок», що містить традиційні компоненти —

цемент, вапно, мелений кварцовий пісок, гіпсовий камінь (рис. 4, а і б) та зразка [22] із заміщеним 100 % мас. сульфатного компонента та 20 % мас. цементу кальцинованою глиною, випаленою за температури 750 °С (рис. 4, в і г) показує дуже схожу морфологію тобермориту.

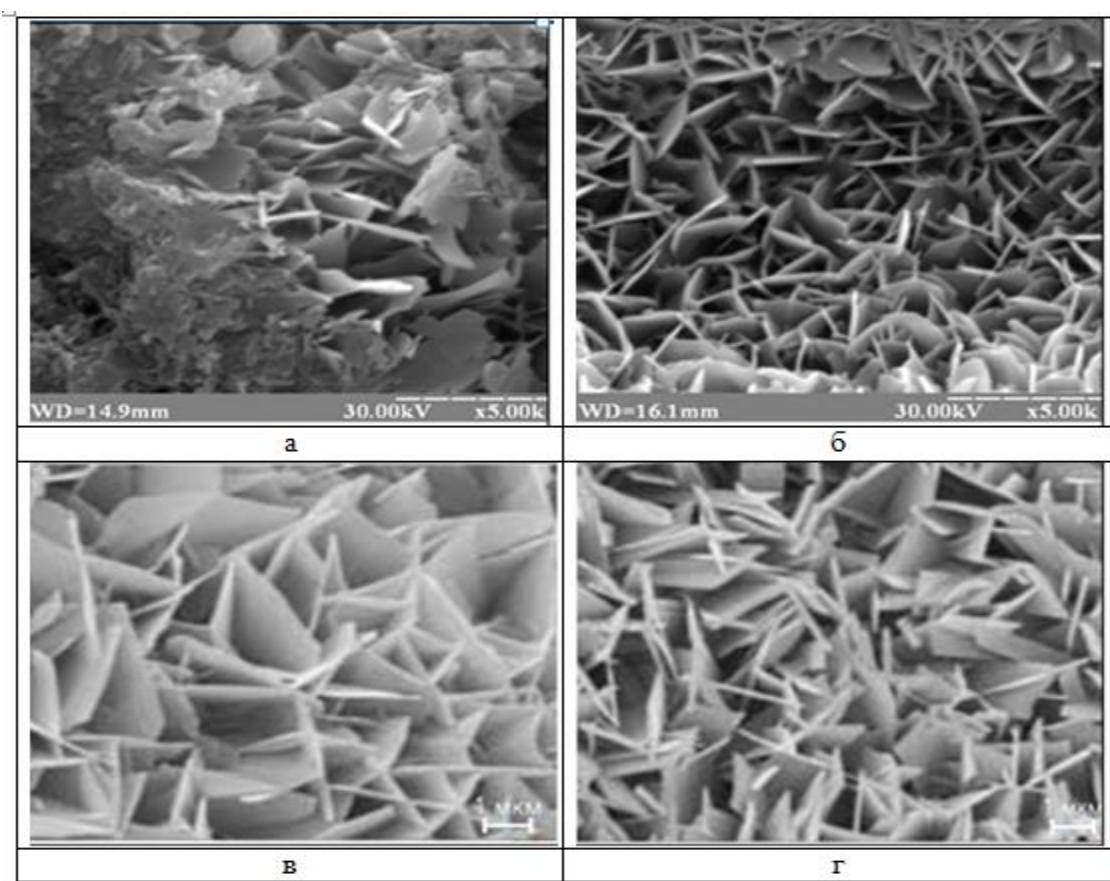


Рис. 4. Порівняльні зображення тобермориту газобетонних зразків традиційної газобетонної суміші (а і б) і суміші з добавкою метаксаоліну при зменшених на 20 % витратах цементу (в і г)

Схожість морфології тобермориту зразків із заміщенням 100 % мас. сульфатного компонента та 20 % мас. цементу кальцинованої глиною при 750 °C свідчить про те, що оптимальне дозування метаксаоліну в складі газобетонної суміші не тільки не впливає на морфологію основного гідросиліката кальцію, але і забезпечує економію 20 % цементу та замінює гіпсовий компонент АГБ.

Разом з тим виникає потреба в проведенні додаткових досліджень, оскільки ще радянські інструкції з виробництва АГБ 1970, пізніше 1980 і 2000 років та їх український аналог – Настанова з виготовлення виробів з автоклавного газобетону (ДСТУ-Н Б В.2.7-308:2015) регламентує обмеження в складі цементу алюмінатної складової (СзА) – не більше

6 %. Крім того, регламентом обмежується вміст неглинистих домішків в складі кварцового піску не більше 3 % і не більше 1 % глинистих домішок типу монтморілоніта. Як відомо, монтморілоніт це широко поширений глинистий мінерал в якому крім  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  може міститись  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  та сліди  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  та ін.

При розробленні інструктивних документів в часи становлення масштабного виробництва АГБ в кінці 50-х початку 60-х років минулого століття в колишньому СРСР добавка метаксаоліну в складі АГБ взагалі не досліджувалась.

**Висновки.** Високу міцність автоклавного газобетону забезпечують саме низькоосновні гідросилікати кальцію, типу тобермориту і ксонотліту. Наявність метаксаоліну ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ) в складі

газобетонної суміші сприяє зв'язуванню вільного вапна в гідросилікати кальцію.

Використовуючи метакаолін чи низькосортні каолінові кальциновані глини як частину мінерального в'язучого в АГБ, можна без зниження міцності газобетону замінити добавку сульфату кальцію та частково цемент.

Вплив метакаоліну на гідратацію цементу та формування структури цементного каменю обумовлений високою дисперсністю частинок метакаоліну та його пуцолановими властивостями. Наявність в

складі АГБ добавки метакаоліну не впливає на морфологію тобермориту у зразках при заміщенні 100 % мас. сульфатного компонента та 20 % мас. цементу кальцинованою глиною.

Добавка метакаоліну 5–10 % від маси цементу в складі газобетонної суміші забезпечує економію цементу і, як наслідок, зменшує екологічне навантаження на довкілля. На відміну від випалу цементу, випал каоліну не супроводжується процесом кальцинації і викидами парникових газів.

### Список використаних джерел

1. Гаевская З. А., Лазарева Ю. С., Лазарев А. Н. Проблемы внедрения системы «зеленых» стандартов. *Молодой ученый*. 2015. № 16. С. 145–152.
2. Боженков П. И. Технология автоклавных материалов. Ленинград: Стройиздат, 1978. 368 с.
3. Сажнев Н. П., Сажнев Н. Н., Галкин С. Л. Опыт производства и применения ячеистобетонных изделий автоклавного твердения в Республике Беларусь. *Строительные материалы*. 2008. № 1. С. 6–9.
4. Research And Markets.com URL: Last accessed: <https://www.researchandmarkets.com/r/6fmucz>.
5. Locher Friedrich W. Cement – Principles of production and use. Verlag Bau+Technic GmbH, 2006. 536 p.
6. Рудченко Д. Г., Сердюк В. Р. Зменшення енергоємності виробництва газобетону автоклавного тверднення на стадії його автоклавування. *Науковий вісник будівництва*. ХНУБА. 2021. № 3 (105). С. 196–204.
7. Коровкевич В. В., Пинскер В. А. и др. Малоэтажные дома из ячеистых бетонов. Рекомендации по проектированию, строительству и эксплуатации. Ленинград: ЛенЗНИИЭП, 1989. 284 с.
8. Особенности формирования фазового состава автоклавного газобетона с использованием высококальциевых зол ТЭЦ / Р. И. Гильмияров, Ю. В. Щукина, Г. И. Овчаренко и др. *Ползуновский вестник*. 2012. № 1. С. 51–55.
9. Клиф Фадж Применение автоклавного газобетона в Великобритании. *Современный автоклавный газобетон*: материалы V НПК. Пятигорск, октябрь 2019 г. С. 78–83.
10. ДСТУ-Н Б В.2.7-308:2015. Настанова з виготовлення виробів з ніздрюватого бетону. Київ: Мінрегіонбуд. 2016. 48 с.
11. Production of CEM II/B cements with optimized properties / D. Israel, P. Boos, T. Neumann, F. Wanzura. *Cement International*. 2013. № 1. P. 55–60.
12. Глини-цемент / под ред. В. И. Аксенова. Сборник статей ВНИИЦ. Вып. 11. Главн. ред. стр. лит. Москва; Ленинград: 1935. 171 с.
13. Олійник Т. А. Особливості технологій переробки каолінової сировини України. Загальні питання технологій збагачення. Збагачення корисних копалин. Криворізький національний університет. 2016. Вип. 63(104). С. 1–5.
14. Гелета О. Л., Кічняєв А. М., Ляшок В. І. Характеристика глин, огляд їх запасів і галузей використання. *Мінеральні ресурси України: Глини*. 2011. № 4. Ч. 2. С. 16–26.

15. Рахимов Р. З., Халиуллин М. И., Гайфуллин А. Р. Состав и гидравлическая активность керамзитовой пыли. *Цемент и его применение*. 2013. № 1. С. 124–128.
  16. Wild S., Khatib J.M. Portlandite consumption in metakaolin cement pastes and mortars. *Cement and Concrete Research*. № 27 (1997). P. 137.
  17. Влияние добавки в портландцемент прокаленной и молотой полиминеральной каолинсодержащей глины на прочностные свойства цементного камня / Р. З. Рахимов, Н. Р. Рахимова, А. Р. Гайфуллин, О. В. Стоянов. *Вісник технологічного університету*. 2015. Т. 18. № 5. С. 80–83.
  18. Kostuch J. A., Walters G. V., Jones T. K. High performance concrete incorporating metakaolin -a review. *Concrete 2000 Conference*. University of Dundee. September 1993.
  19. Дворкін Л. Й., Безусяк О. В., Лушнікова Н. В. Метакаолін – ефективна добавка до литих бетонів. *Вісник УДУВГП: зб. наук. праць*. Рівне. 2002. Вип. 5 (18). Ч. 3. С. 86–92.
  20. Aquino W., Lange D. A., Olek J. The influence of metakaolin and silica fume on the chemistry of alkali-silica reaction products. *Cem. Concr. Compos*. 2001. Vol. 23, № 6. P. 485–493.
  21. Сердюк В. Р., Рудченко Д. Г. Шляхи зниження енергетичної складової при виробництві пористого бетону автоклавного тверднення. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті: тези доп. 9-ої Міжнар. наук.-техн. конф., м. Харків, 17–19 листопада 2021*. Харків: УкрДУЗТ, 2021. С. 256–257.
  22. Эффективность использования кальцинированных глин в составе строительных материалов / К. К. Тинель, Н. Бойнтнео, К. Хухоловски, С. Щерб. *Цемент и его применение*. Ноябрь-декабрь 2018. С. 1–5.
- 

Рудченко Дмитрій Геннадійович, кандидат технічних наук, генеральний директор ТОВ «Аерок» ORCID: 0000-0003-2909-3864. Тел.: (076) 238-75-70. E-mail: dmitry.rudchenko@aeroc.ua.

Сердюк Василь Романович, доктор технічних наук, професор кафедри будівництва, міського господарства та архітектури Вінницького національного технічного університету. ORCID: 0000-0002-1694-8651. Тел (098) 241-21-73. E-mail: vasromvs@gmail.com.

Rudchenko Dmitry Gennadievich Cand. tech. Science, Gen. Director of Aerok LLC ORCID: 0000-0003-2909-3864. Tel.: (076) 238-75-70. E-mail: dmitry.rudchenko@aeroc.ua.

Serdyuk Vasil Romanovich Dr. Tech. Sciences, Professor, Department of Construction, Municipal Economy and Architecture, Vinnytsia National Technical University. ORCID: 0000-0002-1694-8651. Tel (098) 241- 21- 73. E-mail: vasromvs@gmail.com.

Статтю прийнято 02.02.2022 р.

УДК 624.012.35:620.173/174

## ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ УНІВЕРСАЛЬНОЇ ДІАГРАМИ СТАНУ БЕТОНУ В ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТАХ І КОНСТРУКЦІЯХ

Д-р техн. наук В. М. Ромашко, канд. техн. наук О. В. Ромашко-Майстрок

## MAIN PARAMETERS OF THE UNIVERSAL CONCRETE STATE DIAGRAM IN THE REINFORCED CONCRETE ELEMENTS AND STRUCTURES

Dr. Sc. (Tech.) V. M. Romashko, PhD (Tech.) O. V. Romashko-Maistruk

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.199.2022.258672>

---



**Анотація.** У даній статті представлено результати досліджень з пошуку та методологічного обґрунтування основних параметричних точок універсальної залежності діаграми деформування бетону в залізобетонних елементах і конструкціях. Показано, що на відміну від інших, ця залежність не є емпіричною, а отримана аналітичним шляхом завдяки використанню гіпотези «нелінійності жорсткості». Висвітлено найважливіші відмінності між стандартною діаграмою деформування бетону  $\sigma_c - \varepsilon_c$  та дійсною діаграмою його стану в залізобетонних елементах і конструкціях. Встановлено, що відношення між початковим модулем деформацій бетону  $E_{c0}$  та модулем його пружності  $E_c$  залежить від класу бетону. Детально обґрунтовано, чому граничну деформативність стиснутого бетону  $\varepsilon_{cu}$  слід визначати за діаграмою стану самого елемента чи конструкції, а низхідну вітку його деформування обмежувати за екстремальним критерієм Ферма  $dM / d(1/r) = 0$ . Оцінено вплив арматури на протяжність низхідної вітки діаграми деформування бетону.

**Ключові слова:** бетон, діаграма деформування, діаграма стану, жорсткість, модуль деформацій, січний модуль, параметричні точки

**Abstract.** This article presents the research results on the search and methodological justification of the main parametric points of the universal dependence of the concrete deformation diagram  $\sigma_c - \varepsilon_c$  in reinforced concrete elements and structures. It is shown that, unlike others, this dependence is not empirical, but obtained analytically using the hypothesis of "stiffness nonlinearity". The using expediency this hypothesis to describe the concrete stress-strain state in reinforced concrete elements and structures is substantiated by the results of experimental studies by other authors.

The most important differences between the concrete deformation standard diagram  $\sigma_c - \varepsilon_c$  and its state actual diagram in reinforced concrete elements and structures are reflected. It is indicated that the descending branch of the diagram  $\sigma_c - \varepsilon_c$  reproduces the stresses redistribution from one concrete fiber to another. It is substantiated in detail why it is impossible to obtain a descending branch of the concrete deformation diagram for centrally loaded standard samples (concrete cylinders or prisms) under standard test conditions.

The nature of the change in the secant modulus of concrete deformations in standard prototypes during their testing is investigated. It has been established that the ratio between the initial modulus of concrete deformation  $E_{c0}$  and the normalized modulus of elasticity  $E_c$  depends on the concrete class. The numerical values of the indicated ratios for different classes of heavy concrete are

determined and given. It is argued in detail why the compressed concrete ultimate deformability  $\varepsilon_{cu}$  must be determined by the state diagram of the element or structure itself, and the concrete deformation descending branch should be limited by the criterion of ultimate bearing capacity (Fermat's criterion)  $dM/d(1/r) = 0$ . The reinforcement influence on the length of concrete deformation diagram descending branch of standard prism samples under axial load is estimated.

**Keywords:** concrete, deformation diagram, state diagram, stiffness, deformation modulus, secant modulus, parametric points.

**Вступ.** Загальновідомо, що поведінку будь-якого бетонного чи залізобетонного елемента під дією навантаження доцільно відтворювати за допомогою діаграм їхнього стану. Останні дозволяють безпосередньо пов'язувати між собою найважливіші силові та деформаційні параметри деформування зазначених елементів. Тому саме їх і необхідно покладати в основу узагальненої моделі деформування залізобетонних елементів та конструкцій. У загальному випадку діаграму стану залізобетонного елемента відображають залежністю його кривини  $1/r$  від дії згинаючого моменту  $M$ . За осьового завантаження як подібні параметри можуть виступати відносні деформації матеріалу  $\varepsilon_i$  та поздовжні зусилля  $N$ .

Особливість процесу дослідження властивостей бетону характеризується тим, що в силу багатьох об'єктивних причин навіть стандартні зразки за стандартних умов осьового завантаження завжди зазнають неоднорідного деформування. Інакше кажучи, дійсний стан бетонних елементів в реальних умовах ускладнюється тим, що до фізичної нелінійності їхнього деформування зазвичай додається ще й геометрична нелінійність. Тобто в загальному випадку мова повинна йти про деяку інтегральну характеристику деформування бетонного чи залізобетонного елемента, в якості якої, перш за все, може виступати осереднена жорсткість його перерізу  $D$ . Що ж до осьового завантаження стандартних неармованих зразків (бетонних циліндрів чи призм), то тут закономірності їхнього деформування доцільно описувати за допомогою січного

модуля деформацій бетону.

Аналітичних залежностей діаграми стану залізобетонних елементів та конструкцій «момент-кривина» чи «поздовжні зусилля-відносні деформації», що могли б достовірно описати весь процес їхнього деформування, ще донедавна так і не було запропоновано. Тому переважна більшість дослідників і досі приймає або підтверджує експериментально певну емпіричну залежність ідеалізованої діаграми стану бетону  $\sigma_c - \varepsilon_c$  без належного обґрунтування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В теорії залізобетону розвиток методів розрахунку елементів та конструкцій і досі доволі часто пов'язують з пошуком дійсної діаграми деформування бетону  $\sigma_c - \varepsilon_c$ . Спершу її відтворювали за допомогою тригонометричних та степеневих функцій і рядів, поліномів малих степенів, показникових і навіть дробово-лінійних функцій. Пізніше ж перевагу почали віддавати сплайн-функціям [1–4], поліномам вищих степенів [5–8] та дробово-раціональним функціям [9–12]. Детальний аналіз всіх згаданих залежностей, що наведено в роботі [13], дозволяє доволі критично оцінити переваги та недоліки кожної з них. Більше того, завдяки цьому аналізу можна сформувати і цілу низку спільних недоліків, властивих для вказаних залежностей. По-перше, всі функції  $\sigma_c - \varepsilon_c$  у переважній більшості є емпіричними чи напівемпіричними. По-друге, повне ототожнення стандартних діаграм деформування бетону та діаграм його стану в залізобетонних елементах і конструкціях є дещо некоректним.

По-третє, окремі вихідні умови для параметричних точок діаграми  $\sigma_c - \varepsilon_c$  є не надто переконливими та недостатньо обґрунтованими.

Таким чином, через перераховані недоліки жодна із вищевказаних залежностей не може вважатися універсальною у відтворенні дійсної діаграми деформування бетону.

**Мета та задачі досліджень.** Дані дослідження спрямовані на отримання та методологічне обґрунтування характерних параметричних точок універсальної аналітичної залежності діаграми деформування бетону, здатної трансформуватися в діаграму його стану в залізобетонних елементах. Для досягнення заявленої мети було поставлено вирішити такі завдання:

- залучення відповідних гіпотез та передумов, які сприяли б формуванню універсальної аналітичної залежності діаграми деформування  $\sigma_c - \varepsilon_c$ ;

- встановлення основних відмінностей між стандартною діаграмою деформування бетону та дійсною діаграмою його стану в залізобетонних елементах і конструкціях;

- належне методологічне обґрунтування початкових або вихідних умов для визначення характерних параметричних точок діаграми  $\sigma_c - \varepsilon_c$ ;

- порівняння отриманих результатів теоретичних досліджень з експериментальними даними.

#### Основна частина досліджень.

Зазвичай бетон працює разом з арматурою, яка безпосередньо впливає на його деформування. Тому, якщо говорити про універсальну залежність діаграми  $\sigma_c - \varepsilon_c$ , то необхідно розглядати деформування бетонного елемента з різним насиченням його арматурою і навіть без неї. В такому випадку доводиться мати справу з жорсткістю зазначеного елемента. Зокрема, процес деформування центрально стиснутого бетонного елемента (циліндра чи призми) можна описати залежністю

$$\varepsilon_c = N / D = \sigma_c / E'_c, \quad (1)$$

де  $\varepsilon_c$  – відносні деформації стиснутого бетону;  $N$  – поздовжнє зусилля в елементі;  $D$  – жорсткість поперечного перерізу елемента;  $\sigma_c$  – стискуючі напруження в бетоні;  $E'_c$  – січний модуль деформацій бетону

З виразу (1) випливає, що в основу універсальної діаграми  $\sigma_c - \varepsilon_c$  можна покласти саме січний модуль деформацій бетону, як деякий параметр змінної пропорційності між його напруженнями та деформаціями. Цілком очевидно, що цей параметр залежить не тільки від рівня напружень в бетоні  $\eta_\sigma = \sigma_c / f_c$ , але й від рівня його деформування  $\eta_\varepsilon = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1}$ . Тому, виходячи зі сказаного, загальну залежність січного модуля деформацій бетону подамо у вигляді

$$E'_c = a - b \cdot \varepsilon_c / \varepsilon_{c1} - c \cdot \sigma_c / f_c, \quad (2)$$

де  $a$ ,  $b$  і  $c$  – деякі вихідні параметри процесу деформування бетону;  $f_c$  і  $\varepsilon_{c1}$  – міцність та відповідні їй відносні критичні деформації стиснутого бетону.

Тоді, згідно з виразами (1) і (2), універсальна діаграма деформування бетону набуде вигляду неправильної дробово-раціональної функції

$$\sigma_c = \frac{a \cdot \varepsilon_c - b \cdot \varepsilon_c^2 / \varepsilon_{c1}}{1 + c \cdot \varepsilon_c / f_c}, \quad (3)$$

Застосувавши до виразу (3) такі граничні умови:

а) при  $\varepsilon_c = 0$  дотичний модуль  $d\sigma_c / d\varepsilon_c = E_{c0}$  (співпадає з січним модулем);

б) при  $\varepsilon_c = \varepsilon_{c1}$  дотичний модуль

$d\sigma_c/d\varepsilon_c = 0$  (січний модуль досягне  $E_{cf}$ );

в) при  $\varepsilon_c = \varepsilon_{c1}$  стискаючі  
напруження досягнуть екстремальних

$$\sigma_c = f_c,$$

отримаємо значення вихідних параметрів  
 $a$ ,  $b$  і  $c$

$$a = E_{c0}; \quad b = f_c / \varepsilon_{c1} = E_{cf}; \quad c = E_{c0} - 2 \cdot f_c / \varepsilon_{c1} = E_{c0} - 2 \cdot E_{cf}. \quad (4)$$

Якщо значення цих параметрів  
підставити у формули (2) та (3), то загальна  
залежність січного модуля деформацій

бетону і універсальна функція дійсної  
діаграми його деформування наберуть  
остаточного вигляду

$$E'_c = E_{c0} \cdot (1 - \eta_\sigma) + E_{cf} \cdot (2 \cdot \eta_\sigma - \eta_\varepsilon), \quad (5)$$

$$\sigma_c = f_c \frac{k \cdot \eta_\varepsilon - \eta_\varepsilon^2}{1 + (k - 2) \cdot \eta_\varepsilon}, \quad (6)$$

де  $k$  – показник пружно-пластичних  
властивостей стиснутого бетону за  
максимальних напружень в ньому ( $\sigma_c = f_c$ )

$$k = E_{c0} \cdot \varepsilon_{c1} / f_c. \quad (7)$$

Результати експериментальних  
досліджень різних науковців [14, 15]  
підтверджують цілковиту правомірність  
використання залежності (2) для  
відображення січного модуля деформацій  
бетону (рис. 1).

Те ж саме можна сказати і про  
експериментальну обґрунтованість  
діаграми деформування бетону (рис. 2), що  
описується функцією (6). Цю функцію  
можна вважати універсальною, оскільки  
вона отримана аналітичним шляхом на  
основі гіпотези нелінійної зміни жорсткості  
елемента в процесі його деформування [16].

Залежність (6) можна назвати повною  
діаграмою деформування бетону, оскільки  
вона здатна описати поведінку бетону як в  
стандартних неармованих циліндрах чи  
призмах, так і в реальних залізобетонних

елементах і конструкціях. На жаль дуже  
часто діаграми деформування бетону в  
зазначених елементах повністю  
ототожнюють, не звертаючи уваги на деякі  
принципові відмінності між ними. Варто  
розглянути основні з цих відмінностей.

Загалом відомо, що низхідна вітка  
діаграми  $\sigma_c - \varepsilon_c$  відтворює перерозподіл  
напружень з одних фібр бетону на інші. В  
центрально завантажених бетонних  
циліндрах чи призмах (рис. 3, а) подібний  
перерозподіл є неможливим. Якщо ж ці  
зразки армувати стержнями з  $\varepsilon_{s0} \leq \varepsilon_{c1}$   
( $\varepsilon_{s0}$  – відносні деформації, що відповідають  
межі текучості арматури  $f_y$ ), то отримати  
низхідну вітку на діаграмі  $\sigma_c - \varepsilon_c$  теж не  
вдасться. Перерозподіл напружень з бетону  
на арматуру може відбуватися лише за  
умови  $\varepsilon_{s0} > \varepsilon_{c1}$  (рис. 3, б). В неармованих  
зразках подібний перерозподіл напружень  
може відбуватися лише при їх  
позацентровому навантаженні (рис. 3, в).  
Але протяжність низхідної вітки у цьому  
випадку буде вкрай обмеженою. В  
армованих елементах вона буде дещо  
більшою і залежатиме від жорсткісних  
характеристик арматури.

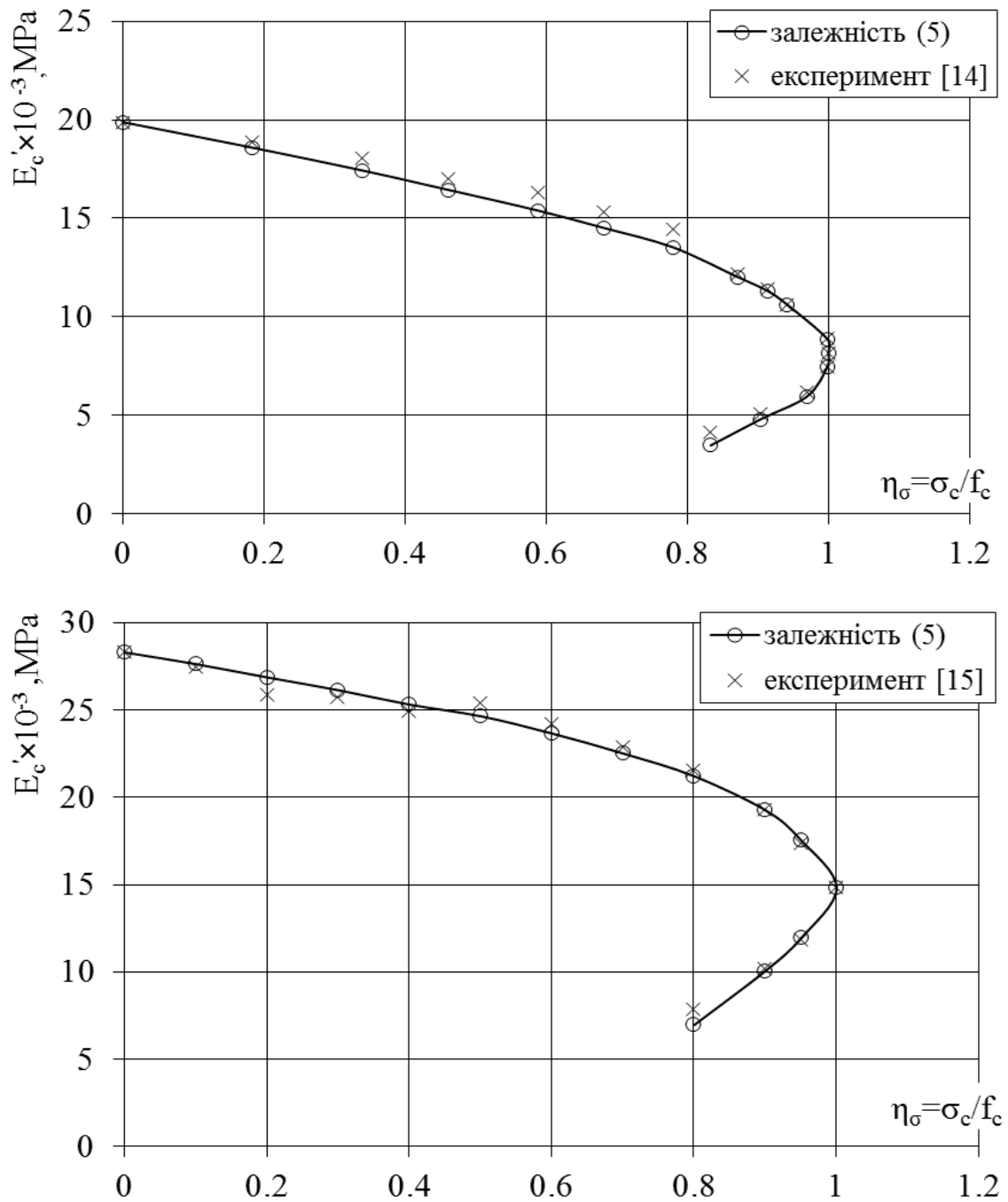


Рис. 1. Залежність січного модуля деформацій бетону від рівня напружень

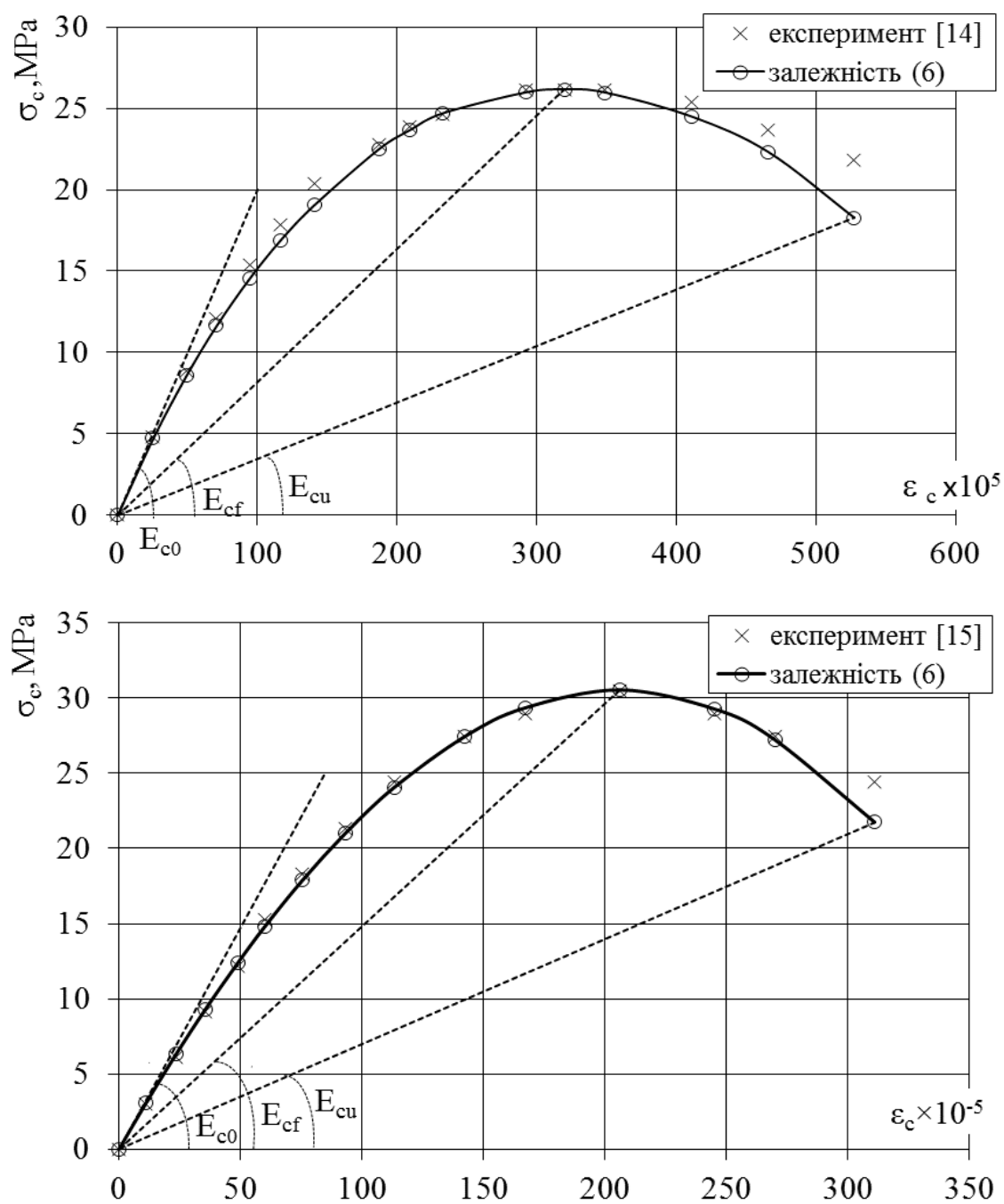


Рис. 2. Повна діаграма деформування (діаграма стану) бетону

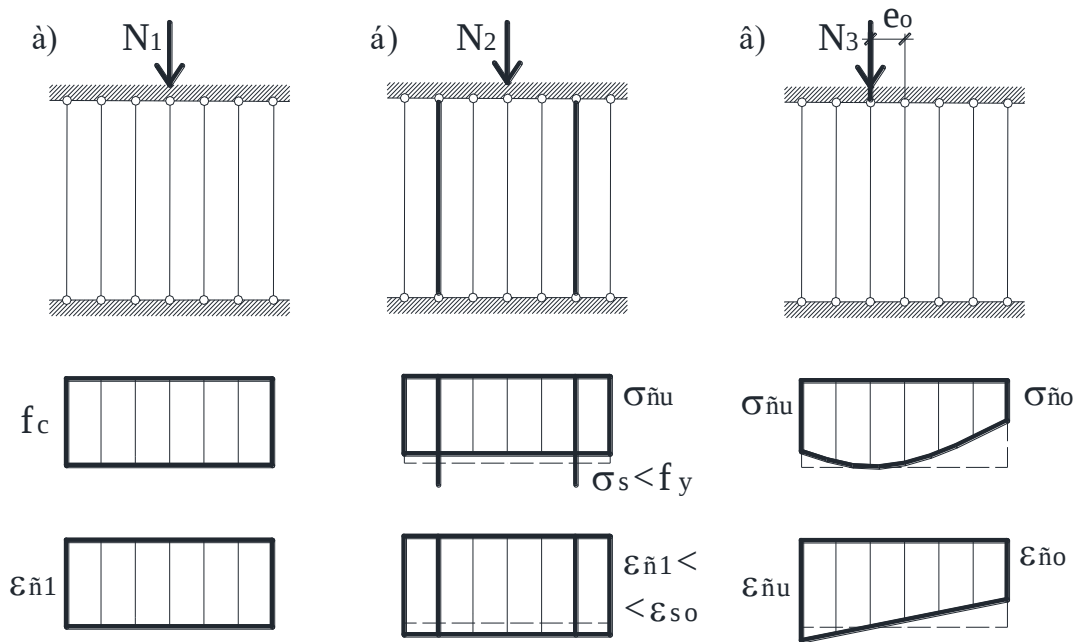


Рис. 3. До перерозподілу напружень між фібрами перерізу елемента

Доволі вагомими є й інші відмінності, що стосуються в основному параметричних точок діаграми деформування бетону та вихідних умов щодо їх визначення.

Зокрема, одним із визначальних параметрів діаграм  $\sigma_c - \varepsilon_c$  є початковий модуль деформацій (пружності) бетону  $E_{c0}$ . Він завжди співпадає з січним та дотичним модулями деформацій бетону в початковій точці діаграми  $\sigma_c - \varepsilon_c$ . В чинних нормах [17, 18] його пропонують обчислювати за виразом

$$E_{c0} = 1,05 \cdot E_c. \quad (8)$$

де  $E_c$  – нормований модуль пружності бетону, що відповідає січному модулю деформацій бетону за рівня напружень в ньому  $\eta_\sigma = 0,3$ .

Однак з виразу (7) слідує, що відношення  $E_{c0} / E_c$  залежить від класу бетону, а тому не може залишатися сталим. Це підтверджується результатами

відповідних розрахунків [13], наведеними в табл. 1.

Інша важлива точка на діаграмі  $\sigma_c - \varepsilon_c$  пов'язана з граничними деформаціями стиснутого бетону  $\varepsilon_{cu}$  (рис. 4). В чинних нормах [17–19] ці деформації обмежують конкретними числовими значеннями. Однак в роботах [20–22] детально обґрунтовано, чому граничні деформації стиснутого бетону в залізобетонних елементах не є сталими і чому їх слід розраховувати за екстремальним критерієм Ферма  $dM/d(1/r) = 0$ . Там же продемонстровано, що за центрального завантаження елементів цей критерій набуває вигляду  $dN/d\varepsilon = 0$ . Загалом дослідження показують, що величина граничних деформацій стиснутого бетону  $\varepsilon_{cu}$  навіть в центрально стиснутих залізобетонних елементах значною мірою залежить від параметрів їх армування (табл. 2).

Таблиця 1

Нормований  $E_c$  та початковий  $E_{c0}$  модулі пружності бетону

| Клас бетону | $f_{ck, prism}$ , МПа | $E_c$ , МПа | $E_{c0}$ , МПа | $k_0 = E_{c0} / E_c$ |
|-------------|-----------------------|-------------|----------------|----------------------|
| C8/10       | 7,5                   | 18140       | 22602          | 1,246                |
| C12/15      | 11                    | 22880       | 28051          | 1,226                |
| C16/20      | 15                    | 26897       | 32383          | 1,204                |
| C20/25      | 18,5                  | 29600       | 35135          | 1,187                |
| C25/30      | 22                    | 31778       | 37244          | 1,172                |
| C30/35      | 25,5                  | 33570       | 38874          | 1,158                |
| C32/40      | 29                    | 35070       | 40155          | 1,145                |
| C35/45      | 32                    | 36174       | 41021          | 1,134                |
| C40/50      | 36                    | 37440       | 42008          | 1,122                |
| C45/55      | 39,5                  | 38393       | 42692          | 1,112                |
| C50/60      | 43                    | 39228       | 43229          | 1,102                |
| C53/65      | 46,5                  | 39967       | 43724          | 1,094                |
| C56/70      | 50                    | 40625       | 44119          | 1,086                |
| C60/75      | 54                    | 41294       | 44515          | 1,078                |
| C65/80      | 57,5                  | 41818       | 44787          | 1,071                |
| C70/85      | 61                    | 42293       | 45042          | 1,065                |
| C75/90      | 65                    | 42785       | 45309          | 1,059                |
| C80/95      | 68                    | 43122       | 45451          | 1,054                |
| C85/100     | 72                    | 43535       | 45668          | 1,049                |
| C90/105     | 75,5                  | 43866       | 45840          | 1,045                |
| C95/110     | 79                    | 44172       | 45983          | 1,041                |
| C100/115    | 83                    | 44495       | 46141          | 1,037                |
| C105/120    | 86                    | 44720       | 46240          | 1,034                |

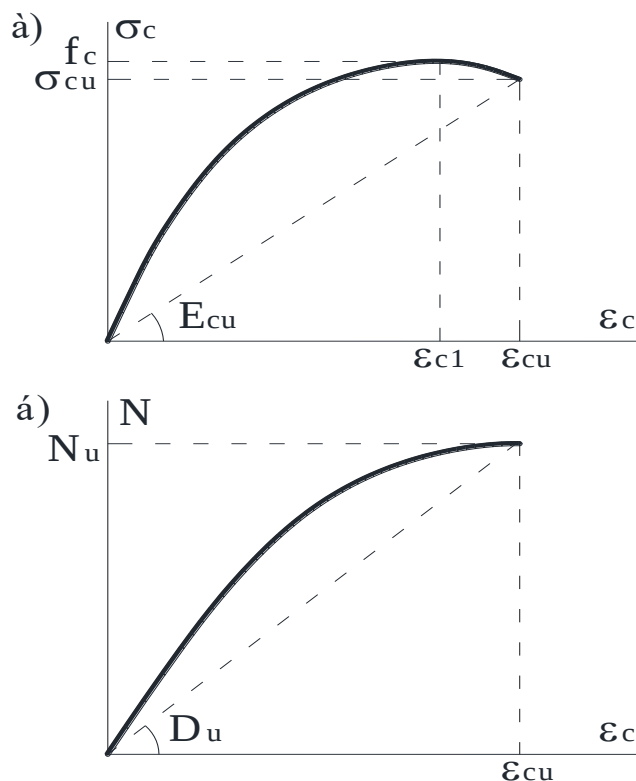


Рис. 4. Зв'язок діаграми стану бетону (а) з діаграмою стану центрально стиснутого залізобетонного елемента (б)

Таблиця 2

Вплив армування на граничне деформування бетону

| Коефіцієнт армування<br>$\rho_{l1}$ | Бетон класу C25/30: $f_{ck,prism} = 22\text{MPa}$ ; $E_{c0} = 37244\text{MPa}$ |                     |               |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------|
|                                     | $\varepsilon_{cu} \times 10^5$                                                 | $\sigma_{cu}$ , МПа | $\eta_\sigma$ |
| 0                                   | 184                                                                            | 22                  | 1,0           |
| 0,015                               | 201                                                                            | 21,9                | 0,995         |
| 0,03                                | 218                                                                            | 21,7                | 0,98          |
| 0,05                                | 241                                                                            | 21,1                | 0,96          |
| 0,1                                 | 299                                                                            | 18,9                | 0,86          |
| 0,15                                | 357                                                                            | 15,8                | 0,72          |
| 0,20                                | 415                                                                            | 12,1                | 0,55          |

**Висновки з досліджень та перспективи їх подальшого розвитку у даному напрямку.** Проведені дослідження дозволяють зробити низку висновків:

- універсальна залежність діаграми  $\sigma_c - \varepsilon_c$  обов'язково має бути аналітичною;

- аналітичний характер і універсальність діаграми деформування бетону в залізобетонних елементах і конструкціях можна забезпечити за допомогою гіпотези зміни їх жорсткості;

- стандартна діаграма деформування центрально завантаженого неармованого бетонного зразка (циліндра чи призми) не може мати низхідної вітки;
- співвідношення між початковим модулем деформацій бетону  $E_{c0}$  та нормованим модулем його пружності  $E_c$  для різних класів бетону є різним;

- граничні деформації стиснутого бетону  $\varepsilon_{cu}$ , як і протяжність низхідної вітки діаграми його деформування, слід обмежувати за діаграмою стану самого елемента, використовуючи екстремальний критерій Ферма  $dM / d(1/r) = 0$ .

### Список використаних джерел

1. Вахненко П. Ф., Кондель В. М. Про особливості деформування неармованого та армованого бетону. *Проблеми теорії і практики залізобетону*. Полтава: ПДТУ, 1997. С. 77–80.
2. Дорофеев В. С., Барданов В. Ю. Расчет изгибаемых элементов с учетом полной диаграммы деформирования бетона: монография. Одесса: ОГАСА, 2003. 210 с.
3. S-8110-1:1997. British Standard. Structural use of Concrete. Part 1: Code of Practice for design and Construction. London: British Standard Institution, 2005. 159 p.
4. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary. [August 2011]. Farmington Hills, MI: ACI Committee 318, 2011. 497 p.
5. Байков В. Н., Горбатов С. В., Димитров З. А. Построение зависимости между напряжениями и деформациями сжатого бетона по системе нормируемых показателей. *Изв. вузов: Стр-во и арх-ра*. 1977. № 6. С. 15–18.
6. Лукаш П. А. Основы нелинейной строительной механики. Москва: Стройиздат, 1978. 204 с.
7. Беглов А. Д., Санжаровский Р. С. Теория расчета железобетонных конструкций на прочность и устойчивость. Современные нормы и евростандарты: монография. Санкт-Петербург – Москва: АСВ, 2004. 221 с.
8. Бамбура А. М. Експериментальні основи прикладної деформаційної теорії залізобетону: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / НДІБК. Київ, 2005. 379 с.
9. Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal Structural Engineering (ASCE)*. 1988. Vol. 114. P. 1804–1825. (SCOPUS).
10. Hsu L. S., Hsu C.-T. T. Complete stress-strain behaviour of high-strength of concrete in compression. *Magazine of Concrete Research*. 1994. Vol. 46, No 169. P. 301–312.
11. Attard, M. M., Setunge, S. Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete. *ACI Materials Journal*. 1996. Vol. 93, No. 5. P. 432–442. (SCOPUS).
12. Ruiz M. F., Muttoni A., Gambarova P. G. Relationship between Nonlinear Creep and Cracking of Concrete under Uniaxial Compression. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2007. Vol. 5, No. 3. P. 1–11. (SCOPUS).
13. Ромашко В. М. Деформаційно-силова модель опору бетону і залізобетону: монографія. Рівне: О. Зень, 2016. 424 с.
14. Тулинг L. G. Creep of a portland cement mortar as a function of stress-level and time: dissertation ... PhD. Iowa State University of Science and Technology, 1965. 76 p.
15. Bezgodov E. and Shvedov V. Comparison of complete stress-strain curves of concrete using test prisms and test cylinders. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 97. 02013. (SCOPUS).
16. Ромашко В. М. Жорсткість та модуль деформацій бетону в деформаційній моделі. *Бетон и железобетон в Украине*. 2007. № 6. С. 2–6.

17. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. [Final Draft, December, 2004]. Brussels: CEN. 2004. 225 p.
18. ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. [Чинний від 01.06.11]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 123 с.
19. CEB-FIP MC 2010: Model code 2010. Final draft. Fib bulletin 65. Lausanne: Switzerland, 2012. Vol. 1. 357 p.
20. Romashko V., Romashko O. The construction features of the deformation and force model of concrete and reinforced concrete resistance. *MATEC Web of Conf.* 2017. Vol. 116. 02028. (SCOPUS).
21. Romashko V. and Romashko O. Fundamentals of the General Theory of Resistance of Reinforced Concrete Elements and Structures to Power Influences. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 968. P. 534-540. (SCOPUS).
22. Ромашко В. Н. Обобщенная модель деформирования железобетонных элементов и конструкций. *Міжнародний науковий журнал (International scientific journal)*. 2016. Вип. 3. С. 84–86.

---

Ромашко Василь Миколайович, доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри основ архітектурного проектування, конструювання і графіки Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне). ORCID: 0000-0003-3448-7489. Тел.: (097) 595-75-91. E-mail: romashkovasyl@gmail.com

Ромашко-Майстрок Олена Василівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне). ORCID: 0000-0003-3353-2268. Тел.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com

Romashko Vasyl Mykolayovych, D. Sc. (Tech.), associate professor, head of Chair of Architectural Designing Bases, Constructing and Graphics National University of Water Management and Environmental Engineering (Rivne). ORCID: 0000-0003-3448-7489. Tel.: (097) 595-75-91. E-mail: romashkovasyl@gmail.com

Romashko-Maistrak Olena Vasylyivna, PhD. (Tech.), associate professor at the Department of Industrial, Civil Construction and Engineering Structures National University of Water Management and Environmental Engineering (Rivne). ORCID: 0000-0003-3353-2268. Tel.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com.

Статтю прийнято 25.02.2022 р.

УДК 624.954

## ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЙ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ФУНДАМЕНТІВ СИЛОСІВ ЗБІЛЬШЕНИХ РОЗМІРІВ

Д-р техн. наук А. О. Мозговий, асп. А. А. Бутенко

### THE EFFECTIVE STRUCTURES OF REINFORCED CONCRETE FOUNDATION OF SYLOSES AT GRAIN TRANSFER TERMINALS

Dr. Sc. (Tech.) A. Mozgovuy, postgraduate student A. Butenko

---

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.199.2022.258797>

---



*Анотація.* Розглянуто конструкції залізобетонних заглиблених фундаментів з підземними галереями та фундаментів з надземним підсилюючим поверхом, які улаштовують для циліндричних металевих силосів. Наведено приклади оцінювання напружено-

деформованого стану фундаментів силосів із використанням числових методів моделювання сумісної роботи основа-фундамент-споруда. Перспективними напрямками удосконалення конструктивних рішень фундаментів силосів є застосування попереднього напруження, що спричиняє підвищення жорсткості і позитивно впливає на загальний напружено-деформований стан конструкції фундаменту в цілому.

**Ключові слова:** металевий силос, залізобетонний заглиблений фундамент, посилена основа, контактні напруження, напружено-деформований стан фундаменту, фундамент з підземними галереями, фундамент з надземним підсилосним поверхом.

**Abstract.** To date sea, river and railroad terminals with metallic vertical cylindrical silos as technological equipment are used to transfer cereal and oil crops. Designs of reinforced concrete buried foundations with underground galleries and foundations with overground under-silo storey that are arranged for cylindrical metallic silos of high capacity have been investigated. The main criterion that requires strict observance is not to exceed the allowable value of settlement of metallic silos. Also, because the construction of silo is sensitive to nonuniformity of deformations, the criterion of uniformity of settlements within the boundaries of foundation shall be observed. Analysis of factors of silo accidents has shown that their considerable number occur as the result of destruction of metallic construction of silos by nonuniform operational loads caused by asymmetric actions during emptying silo. Nonuniform above-the-norm deformations of foundations also quite frequently cause silo accidents. Foundations of metallic silos of transfer terminals cause considerable loads on the base. Natural soil base is not always capable of taking stress under the foot of foundation. This is being solved by strengthening foundation bases: by making soil cushion, reinforcing the base with the more strong and rigid elements, injecting mineral or polymeric binders. Pile foundations are quite common during building silos. But their use is not always economically reasonable and justified in particular geological conditions of the building site. Rigidity parameters of the base essentially influence stressed-deformed state of foundations of metallic silos of increased diameters and distribution of contact stresses under the foot of foundations. Deformation parameters of the base and the construction of foundation create the possibility to regulate settlements and deflections of foundation. This makes it possible to control distribution of contact stresses. The value and character of settlement of round slab foundation of silo depend on the values of operating loads, dimensions and depth of foundation laying, distributional properties of its design, geological conditions of the base, influence of loads from the neighboring structures. Application of numerical methods of simulation of combined operation of base-foundation-structure to assess stressed-deformed state of silo foundations proves that prospective trend of improvement of design solutions of silo foundations is application of their prestressing. This causes increase in foundation rigidity and positively influences its stressed-deformed state.

**Keywords:** metallic silo, reinforced concrete buried foundation, reinforced base, contact stresses, stressed-deformed state of foundation, foundation with underground galleries, foundation with overground under-silo storey.

**Вступ.** Сучасна практика проектування та будівництва терміналів для перевалки зернових передбачає використання металевих вертикальних циліндричних силосів великої ємності. Перевалка монокультури у великих обсягах на відміну від фермерських елеваторів зазвичай здійснюється на елеваторних

корпусах з силосами з об'ємами від 10 тис. т і більше. Силоси металевої збірної конструкції набули поширення в Україні за останні 20 років. До цього використовувались залізобетонні силосні корпуси, що збереглися та працюють до теперішнього часу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Більшість вітчизняних та іноземних досліджень у сфері будівництва силосів відбувалося ще у 70-ті роки. Так, комплексний підхід, методи розрахунку та принципи будівництва наведено у виданні [1]. Нормативний підхід щодо розрахунку основ плитних фундаментів споруд баштового типу, зокрема і силосів за несучою здатністю та стійкістю основи, а також з визначення осідання та деформацій основ і фундаментів реалізовано у нормативному документі [2], що є чинним на сьогодні. Сформульовано принципи визначення осідань для споруд силосів значного розміру у плані – понад 30-40 м. Обмежена розрахункова глибина стисливого ґрунту основи для великорозмірних споруд та враховано підвищення модуля деформації основ, що мають велику площу завантаження окрім випадків, коли основа складена слабкими ґрунтами. Слід зауважити, що вказані дослідження було проведено здебільшого для залізобетонних силосів, що мають жорстку надземну будову. Допустимі осідання та деформації споруд було прийнято відповідно для силосів збірної та монолітної конструкцій 30 та 40 см відповідно.

Закордонні дослідження стосовно розрахунку плитних та кільцевих фундаментів круглих силосів формувалися орієнтовно також у 70-ті роки і одразу були спрямованими здебільш на циліндричні силоси. Так, дослідження фундаментів силосів [3–5] були присвячені питанням забезпечення надійності металевих та залізобетонних циліндричних силосів від експлуатаційних навантажень: осідань, кренів, а також армування кільцевої плити фундаменту – у роботі [6]. Перші силоси, що було побудовано на слабких глинистих ґрунтах унаслідок експлуатаційних навантажень отримали значні осідання та крени. Досліджено сумісну роботу фундаменту силосу із глинистою основою. Визначено вплив фізико-механічних

характеристик ґрунтів основи на експлуатаційну надійність силосу із кільцевим залізобетонним фундаментом. Армування фундаменту також потребувало підходу із забезпечення надійності експлуатації, тому в роботі [6] досліджено основні критерії розрахунку і конструювання фундаменту. Дослідження впливу глибини закладення фундаменту та промерзання ґрунту на силоси розглянуто в дослідженні [7].

Створення економічної конструкції фундаментів для споруд баштового типу реалізовано в роботах О. Н. Тетіора [8] у 70-х роках. Розглянуто особливості роботи фундаментів у вигляді тонкостінних оболонок із різною контактною поверхнею та передача контактних напружень для фундаментів різної гнучкості та форми.

Для фундаментів силосів вплив форми фундаменту та контактної поверхні розглянуто у наукових статтях іноземних авторів [9]. Наведено аналіз конструктивного рішення для фундаменту силосу у вигляді оболонки зворотного конусу. За результатами дослідження встановлено, що форма фундаменту має суттєвий вплив на розподіл контактних напружень по контакту фундамент–основа.

Суттєвим параметром для визначення напружено-деформованого стану є навантаження від матеріалу, що зберігається. Актуальним є питання розподілення навантажень між стінками силосу та днищем. Небезпечними для силосу є динамічні навантаження від матеріалів, що зберігаються. Сучасні дослідження [10] відрізняються від класичних формул Янсена і базуються на результатах динамічних випробувань моделей руху сипких матеріалів [11], у яких отримано експериментальні результати значень вертикального тиску та тиску тертя на конструкцію силосу, фундамент під час фаз завантаження, зберігання та вивантаження зерна кукурудзи. Наведено дані навантажень, що змінюються залежно

від геометричних розмірів силосу, зокрема, при збільшенні діаметра.

Динамічні навантаження на зерносховищах можуть впливати не лише на надземну конструкцію, але й на ґрунти основи, що знаходяться під впливом навантажень від силосів. Проведено дослідження [12] щодо виявлення особливостей роботи ґрунтів основи при сейсмічних навантаженнях на залізобетонну конструкцію силосу для зберігання цементу. Виконано оцінку надійності експлуатації силосу залежно від типу основи фундаменту. Висвітлено ефекти взаємодії між силосом та сипким матеріалом, між фундаментом силосу та ґрунтом.

Моделі взаємодії фундаменту під дією сейсмічних навантажень [13] дозволяють оцінювати вплив фізико-механічних параметрів ґрунту основи на напружено-деформований стан споруди. Лабораторні вишукування на вібраційному столі та численні дослідження [14] підтверджують, що відносне переміщення матеріалу, що зберігається, має амортизуючу дію на конструкцію силосу. Таке дослідження може надати відповідну теоретичну базу та еталонні значення для розрахунку безпечної експлуатації конструкції силосу від дії землетрусу або подібних навантажень, наприклад – для оцінки впливу вібрацій від руху залізничного транспорту на ґрунт основи силосу.

Проведено дослідження ущільнених основ фундаментів [15] на базі сучасної теорії несучої здатності ущільнених ґрунтів. Досліджено негативний вплив пільових фундаментів силосів при їх нерівномірному завантаженні [16]. Для плитно-пільових фундаментів сучасні дослідження [17] загалом підтверджують теоретичні дані експериментальними.

Головною відмінністю сучасних циліндричних силосів є тонкостінна металева конструкція, що є чутливою до нерівномірних навантажень і осідань. В сучасних нормах України осідання металевих силосів обмежено до 15 см.

Аварійні ситуації найчастіше виникають за умов неправильної експлуатації – при несиметричному розвантаженні силосу. Для тонкостінних конструкцій сталевих силосів проведено моделювання [18] надземної конструкції з особливостями її конструктивних рішень та впливу симетричних і несиметричних навантажень. За результатами дослідження призначено критерії забезпечення експлуатаційної надійності конструкції при варіативності різних граничних умов.

**Не розв'язаною раніше частиною проблеми** є дослідження напружено-деформованого стану у контексті моделювання сумісної роботи основа-фундамент-споруда і порівняння за основними техніко-економічними показниками конструкцій залізобетонних заглиблених фундаментів з підземними галереями та фундаментів з надземним підсилосним поверхом, які влаштовують для циліндричних металевих силосів великої ємності.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Осідання фундаменту і прогини його елементів, а також нерівномірність значень контактних напружень на різних ділянках єдиного фундаменту в умовах деформації основи є предметом дослідження.

Завданням роботи є моделювання сумісної роботи основа-фундамент-споруда і порівняння за основними техніко-економічними показниками конструкцій залізобетонних заглиблених фундаментів з підземними галереями та фундаментів з надземним підсилосним поверхом.

Метою роботи є створення ефективного конструктивного рішення залізобетонних заглиблених плитних фундаментів для циліндричних металевих силосів великої ємності з урахуванням їх розмірів, глибини закладення, форми, жорсткості, ефективного армування та можливого посилення основи за умови забезпечення надійності роботи та граничних осідань.

**Основна частина дослідження.**

Конструкція силосів та їх фундаментів суттєво відрізняються. Особливо відрізняються критерії щодо нормативних осідань фундаментів [19]. Це пояснюється різною жорсткістю надземної будови споруд залізобетонного та металевих силосів, що впливає на напружено-деформований стан надземної будови і фундаменту. Так, нормативні осідання для металевих силосів обмежені величиною 15 см, а для залізобетонних – 40 см. Величина осідання фундаментів силосів, а також нерівномірність осідань в його межах потребують дотримання [20] оскільки можливе руйнування конструкції силосу внаслідок нерівномірних понаднормових деформацій фундаменту.

Сучасні методи розрахунку плитних фундаментів здебільшого використовують численні моделювання сумісної роботи основа-фундамент-споруда [21] для виявлення нерівномірності осідань та напружено-деформованого стану конструкції. Зупинимось на роботі фундаменту з основою, оскільки для металевих циліндричного силосу жорсткість його конструкції майже не впливає на роботу фундаменту. Забезпечення умов нормальної експлуатації силосу, що є чутливим до деформацій фундаменту, є важливою та актуальною задачею.

Основними типами фундаментів для плоскостійких силосів великих розмірів є модифікації плитних фундаментів, що споруджуються на природній основі, пильовій основі або на посилені основах.

Для циліндричних металевих силосів за конструктивними особливостями можна класифікувати фундаменти на заглиблені з підземними галереями, фундаменти з надземним підсилосним поверхом та плитні фундаменти з бічним вивантаженням.

Для фундаментів силосів можна визначити основні конструктивні елементи: горизонтальні конструктивні елементи – перекриття підземних галерей, перекриття підсилосного поверху, фундаментні плити,

плити стрічкових фундаментів; вертикальні конструктивні елементи – стіни, колони і діафрагми; технологічні елементи – аераційні підлоги та решітки, лотки, отвори для вивантаження продукту, конструкції для встановлення аераційних вентиляторів; інші елементи та деталі – анкери кріплення металевих силосів, деталі герметизації, деформаційні шви.

Вертикальна стінка розміщується по периметру фундаменту і сприймає зусилля від спираючого силосу та елементів фундаменту, що примикають до неї. Конструктивно вона нагадує стрічковий фундамент, що приєднується до підземного тунелю, а також поєднується з фундаментною плитою.

Фундаментна плита зазвичай виконується у верхній частині фундаменту. Також існують моделі з виконанням плити в рівні підшви. Елементи фундаменту з горизонтальними поверхнями, які сприймають навантаження ґрунту зворотної засипки, накопичують додаткові навантаження окрім корисних експлуатаційних навантажень і через це вони не є достатньо ефективними.

Також до неефективних конструкцій відносяться фундаменти з відокремленням верхньої фундаментної плити від периметральної стінки та підземної галереї. Для них відмічено більш складний напружено-деформований стан фундаменту та проблеми з'єднання силосу з фундаментом [22]. Конструкція такого типу фундаменту сприяє утворенню розтягуючих зусиль в периметральній стінці, що послаблена отворами входів в підземні галереї. Конструкція вважається недостатньо надійною через некомпенсований вплив розпору.

Напружено-деформований стан подібних конструкцій фундаментів досліджено [8, 22] для фундаментів у вигляді конічних оболонок, що спираються на стрічкові фундаменти, а також у розрахунках фундаментів з кільцевою плитою. У роботах зазначено значний вплив

форми та жорсткості конструкції фундаменту на розподіл контактних напружень.

Для силосів великих діаметрів деформації нерівномірності осідання зазвичай складають до 30 % від загального нормативного осідання 15 см [19].

Для фундаментів металевих силосів перевалочних терміналів характерні значні навантаження.

Розглянемо приклад для визначення навантажень згідно з чинними нормативними методиками [19]. Для силосу діаметром  $D = 27,5$  м і повної висоти споруди 29,683 м ємність силосу становить 14326 м<sup>3</sup>. Висота завантаження зерном 24,2 м. Заповнення силосу передбачено пшеницею з нормативною питомою вагою  $\gamma = 8,0$  кН/м<sup>3</sup>. При цьому коефіцієнт тертя зерна по стінці силосу  $f = 0,4$ , а коефіцієнт бічного тиску зерна прийнято  $\lambda = 0,44$ . Слід враховувати коефіцієнт надійності по навантаженню  $\gamma_m = 1,3$ . Нормативне навантаження снігового покриву становить 1,6 кПа.

Визначено параметр  $\rho$ , який дорівнює  $\rho = D / 4 = 6,9$  м. Значення безрозмірного параметру  $\xi$  на глибині  $z = 24,2$  м від верху засипки становить  $\xi = (\lambda \cdot f \cdot z) / \rho = (0,44 \cdot 0,4 \cdot 24,2) / 6,9 = 0,62$ .

Нормативний горизонтальний тиск зернових  $p_h^n$  на стінки силосу на глибині  $z$  від верху засипки дорівнюватиме  $p_h^n = (\gamma \cdot \rho \cdot A_1) / f = (8 \cdot 6,9 \cdot 0,462) / 0,4 = 63,8$  кПа, при цьому доданок  $A_1$  становить  $A_1 = 0,462$  м. Кільцеве вертикальне навантаження на фундамент від стін силосу в нижній точці  $p_f^n = (f \cdot p_h^n) = (0,4 \cdot 63,8) = 25,5$  кПа. Повний вертикальний тиск на фундамент від стін силосу становитиме  $d_z = 340$  кН/м.

Вертикальний нормативний тиск на днище силосу  $p_v^n = (1 \cdot 63,8) / 0,44 = 145$  кПа. Навантаження від аераційних каналів  $0,6 \cdot 24 = 14,4$  кПа. Вага силосу 1,1 МН, навантаження на фундамент 13 кН/м. Навантаження від надсилосної галереї 3,2 кН/м. Навантаження від засипки ґрунту на фундамент 26,4 кПа, тиск від власної ваги

фундаменту 54 кПа. Розрахункове значення снігового навантаження 4,6 кН / м. Підсумкове середнє горизонтальне навантаження під фундаментною плитою складає 240 кПа.

За таких умов вертикальних навантажень ґрунти не завжди можуть сприймати напруження під підошвою фундаменту без посилення.

Пальові фундаменти є популярними, але не завжди економічно доцільні та обґрунтовані за конкретних геологічних умов ділянки. Зазвичай, виконується посилення основи фундаментів шляхом влаштування ґрунтової подушки, армування більш міцними та жорсткими елементами, або посилення шляхом ін'єктування мінеральними чи полімерними в'язучими. Конструкція фундаменту та деформаційні параметри посиленої основи надають можливість регулювання осідань і прогинів фундаменту та, як наслідок, розподілу контактних напружень. Визначення параметрів посиленої основи відіграє визначну роль.

Слід враховувати, що за умови посилення ґрунту основи методом армування жорсткими включеннями треба враховувати анізотропні властивості основи, що викликають концентрацію напружень  $\sigma_z$  під фундаментом і, як наслідок, більш значні осідання його локальних частин. Збільшення жорсткості верхньої стисливої зони посиленого ґрунту [23] сприяє зменшенню вертикальних деформацій ґрунту та зменшенню вертикальних напружень.

Для визначення параметрів необхідного посилення ґрунту за умови осідання фундаменту та розподілу контактних напружень скористаємось методом [24] для введення коефіцієнту, що регулює рівень напружень на покрівлі непосиленого шару:

$$n_0 = \frac{E_1(1-\mu_2^2)}{E_2(1-\mu_1^2)}, \quad (1)$$

де  $E_1$ ,  $\mu_1$ ,  $E_2$ ,  $\mu_2$  – модулі деформації та коефіцієнти поперечної деформації верхнього та нижнього шарів ґрунту відповідно.

Для прикладу розглянемо реалізований фундамент силосу, що виконаний на посиленій основі з урахуванням нормативних осідань та міцності підстилаючого шару ґрунту. Фундамент з підземною галереєю та периметральною стінкою типу стрічкового фундаменту. Висота стрічки залізобетонного фундаменту 600 мм, периметральна стінка прийнята товщиною 450 мм, стіни галереї і фундаментна плита завтовшки 450 мм.

Для порівняння розглянемо варіант реалізованої конструкції фундаменту з підсилюючим поверхом. Фундаментна плита товщиною 600 мм із локальним збільшенням товщини в місцях спирання колонн підземного поверху на 500 мм. Колони згідно розрахунку прийнято із прямокутними перерізами із розмірами від 700×600 мм до 500×500 мм. Переріз кільцевої обрамлюючої балки перекриття 600×1200 (h) мм. Стінки діафрагм товщиною 300 мм. Несуча плита покриття товщиною 500 мм.

Фундаменти побудовано в подібних геологічних умовах посиленого ґрунту методом вертикального армування включеннями з ґрунтоцементних елементів. Критерії першої та другої груп граничних станів при розрахунку та проектуванні було витримано. Обчислення осідання, контактних напружень та визначення напружено-деформованого стану виконувалось за допомогою методу скінчених елементів при вирішенні задачі на пружному напівпросторі. Осідання окремо перевірялися розрахунком за методом пошарового підсумовування.

Слід зауважити, що будівництво морських та річкових терміналів для перевалки зернових культур часто відбувається в умовах підтоплених територій за умови географічного розташування. Так, силоси на фундаментах з підсилюючим поверхом було побудовано на території з високим рівнем ґрунтових вод, де заглиблення фундаментів і влаштування підземної галереї було неможливим. Приведемо показники витрат на влаштування силосів при однакових діаметрах та об'ємах силосів. Результати отриманих показників наведено в табл. 1, 2.

Таблиця 1

Показники витрат при влаштуванні фундаментів силосів з підсилюючою галереєю

| № з/п | Найменування показника та одиниці виміру  | Величина показника | Перевищення матеріальних витрат | Перевищення вартості (тис. грн) |
|-------|-------------------------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1     | Загальний об'єм бетону (м <sup>3</sup> )  | <b>560</b>         | -41%                            | -350                            |
| 2     | Загальна витрата арматури (т)             | <b>101</b>         | -27%                            | -1170                           |
| 3     | Питома витрата сталі (кг/м <sup>3</sup> ) | <b>170</b>         | 13%                             | –                               |
| 4     | Об'єм земляних робіт (м <sup>3</sup> )    | <b>1900</b>        | 104%                            | 165                             |

Таблиця 2

Показники витрат при влаштуванні фундаментів силосів з підсилюючим поверхом

| № з/п | Найменування показника та одиниці виміру  | Величина показника | Перевищення матеріальних витрат | Перевищення вартості (тис. грн) |
|-------|-------------------------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1     | Загальний об'єм бетону (м <sup>3</sup> )  | <b>950</b>         | 70%                             | 350                             |
| 2     | Загальна витрата арматури (т)             | <b>140</b>         | 39%                             | 1170                            |
| 3     | Питома витрата сталі (кг/м <sup>3</sup> ) | <b>150</b>         | -12%                            | –                               |
| 4     | Об'єм земляних робіт (м <sup>3</sup> )    | <b>930</b>         | -51%                            | -165                            |

Із аналізу показників можна зробити висновок, що конструкція фундаменту з підсилюючим поверхом у свою чергу має значно більшу матеріалоемність на відміну від фундаменту з підсилюючою галереєю в той час, коли економія об'ємів земляних робіт не надає економічного ефекту.

Осідання плитного круглого фундаменту силосу залежить від геологічних умов основи, значень навантажень, розподільчих властивостей конструкції фундаменту, його розмірів, глибини його закладення, впливу навантажень від сусідніх споруд.

Для визначення осідання фундаменту застосовуються численні рішення та інженерні методи розрахунків [2]. Точність визначення розрахункових осідань та параметрів жорсткості основи суттєво впливає на визначення напружено-деформованого стану фундаменту і подальше його проектування. При порівнянні з даними геодезичного моніторингу осідання силосів на різних об'єктах можна зробити висновок, що методи розрахунків часто дають завищені результати щодо осідань та деформацій, окрім випадків будівництва на слабких ґрунтах.

Для великих розмірів фундаментів із значними навантаженнями, що мають відповідну глибину стисливої зони ґрунту дані розрахункових та фактичних осідань, обчислених за підходами як для висотних будівель з плитними фундаментами великих розмірів згідно з узагальненими та приведеними даними [24] вказують на те, що у процесі збільшення розмірів фундаменту приріст глибини стислового ґрунту основи суттєво не збільшується. Таким чином, розрахунок має відбуватися із обмеженням граничної стисливої товщини ґрунту  $H_c$ , як для моделі скінченного шару. При цьому запропонована градація

$$\sigma_{zp} = k \cdot \sigma_{zg}, \quad (2)$$

де  $\sigma_{zp}$  – вертикальні напруження від зовнішнього навантаження;

$\sigma_{zg}$  – побутові напруження;

$k = 0,2$  при  $b \leq 20$  м;  $k = 0,5$  при  $b \geq 50$  м; при  $20 \leq b \leq 50$  м значення  $k$  визначається по інтерполяції;

$b$  – ширина фундаменту.

Але це ствердження не може бути цілком прийняте для слабких ґрунтів з модулем деформації  $E$ . Товщина стисливої зони ґрунту  $H_c$  при цьому не залежить від гнучкості фундаменту, оскільки вертикальні напруження  $\sigma_{zp}$  за глибиною вирівнюються.

Вважається, що 70 % деформацій осідання відбувається на глибині  $0,25 d$  (діаметру фундаменту) через високі концентрації деформацій у верхній зоні ґрунту.

Враховуючи особливості конструкції фундаментів розрахунок осідань має виконуватися за двома групами граничних станів. Розміри підшви локальних елементів фундаменту силосу визначаються за умови забезпечення міцності ґрунту  $R$ , але контактні напруження не можуть перевищувати значень, при яких може бути досягнуте граничне значення осідань споруди  $S_u$ . Повне осідання фундаменту має відбуватися за умови дотримання критерію граничної міцності ґрунту основи  $R$ .

Для фундаментів металевих силосів збільшених діаметрів жорсткість основи суттєво впливає на напружено-деформований стан фундаменту та розподіл контактних напружень під його підшвою. Конструкція фундаменту та деформаційні параметри його основи надають можливість регулювання осідань і прогинів фундаменту та, як наслідок, розподілу контактних напружень. Визначення напружено-деформованого стану конструкції залізобетонного фундаменту та розподіл контактних напружень залежить від власної гнучкості фундаменту як споруди. У випадку, коли деформації основи та жорсткість споруди є порівняними, то має місце перерозподіл контактних напружень

внаслідок їх сумісної роботи. За критерій гнучкості фундаменту, загалом, можна прийняти залежність Горбунова-Посадова:

$$t \approx 10 \frac{El^2}{E_k h^2}, \quad (3)$$

де  $E$  та  $E_k$  – модуль деформації ґрунту основи та матеріалу конструкції;

$l$  та  $h$  – напівдовжина (радіус) та висота перерізу конструкції.

Під час осідання фундаменту більші значення напружень виникають в центральній частині фундаменту, а на бічних ділянках – менші внаслідок розсіювання. Механізм утворення ущільненого ядра основи зумовлює підвищення жорсткості основи в центральній частині фундаменту. Таким чином, при збільшенні навантаження на фундамент контактні напруження  $\sigma_z$  перерозподіляються від країв фундаменту до центру.

Особливістю конструкцій фундаментів для металевих силосів великих розмірів є характерна підвищена гнучкість конструкції, яка значно впливає на розподіл контактних напружень і напружено-деформований стан самого фундаменту.

У фундаментів з підсилюючим поверхом, представлених на рис. 1 та плитних фундаментів із бічним вивантаженням гнучкість майже однакова в усіх напрямках і напружено-деформований стан майже не відрізняється від стандартного для круглих плитних фундаментів. Для плитної конструкції фундаменту з підсилюючим поверхом характерна незначна глибина закладення, що зумовлено конструктивно. Слід зауважити, що за умов високих напружень та високої концентрації деформацій у верхній зоні ґрунту вплив поперечних

деформацій значно зростає. Таким чином, при незначному заглибленні вкрай можливе виникнення випору ґрунту, що призведе до додаткових значень осідань та перерозподілу зусиль до центру фундаменту. Тому, при розрахунку опору ґрунту слід приймати найменше значення заглиблення плити фундаменту від рівня планування.

Для фундаментів із підземними галереями, поданих на рис. 2, що розміщені у напрямку розвантаження продукту, гнучкість кардинально відрізняється. Так, в напрямку галереї – це фундамент скінченної жорсткості, а в поперечному – це абсолютно гнучкий фундамент. Товщина плити з урахуванням розмірів відноситься до тонких плит або жорстких мембран, що мають незначну жорсткість на згин. Так, напружено-деформований стан окремих частин фундаменту силосу має свої особливості. Підземний тунель суттєво підвищує жорсткість в одному напрямку і навантаження частково передається на периметральну стінку. При цьому трансформуються контактні напруження в середній зоні фундаменту – відбувається їх передача на зовнішній контур в місці примикання тунелю та концентрація реакцій від зовнішніх навантажень відповідно жорсткості конструкції. У периметральній зоні заглибленої вертикальної стінки фундаменту напруження різко зростають унаслідок передачі лінійного навантаження від металевих силосів. Це явище стримує утворення ущільненого ядра в центральній частині фундаменту на відміну від звичайного плитного фундаменту.

Для фундаментів однакового діаметру характерні різні форми деформування, різна величина осідання і, як наслідок – різне розподілення контактних напружень.

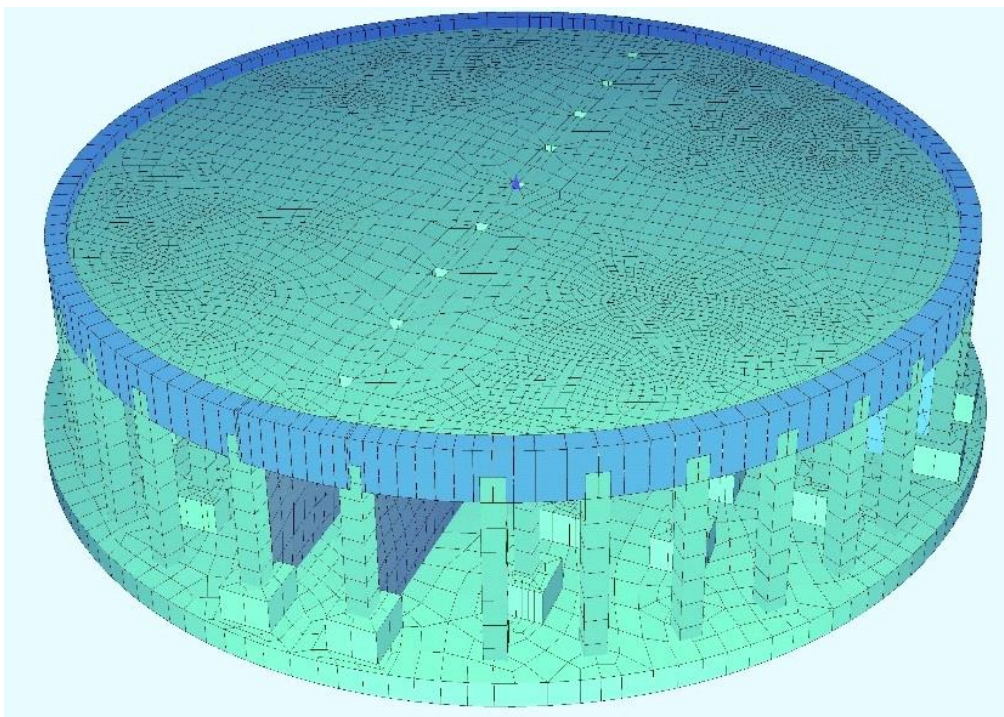


Рис. 1. Скінчено-елементна модель фундаменту силосу з підсилюючим поверхом

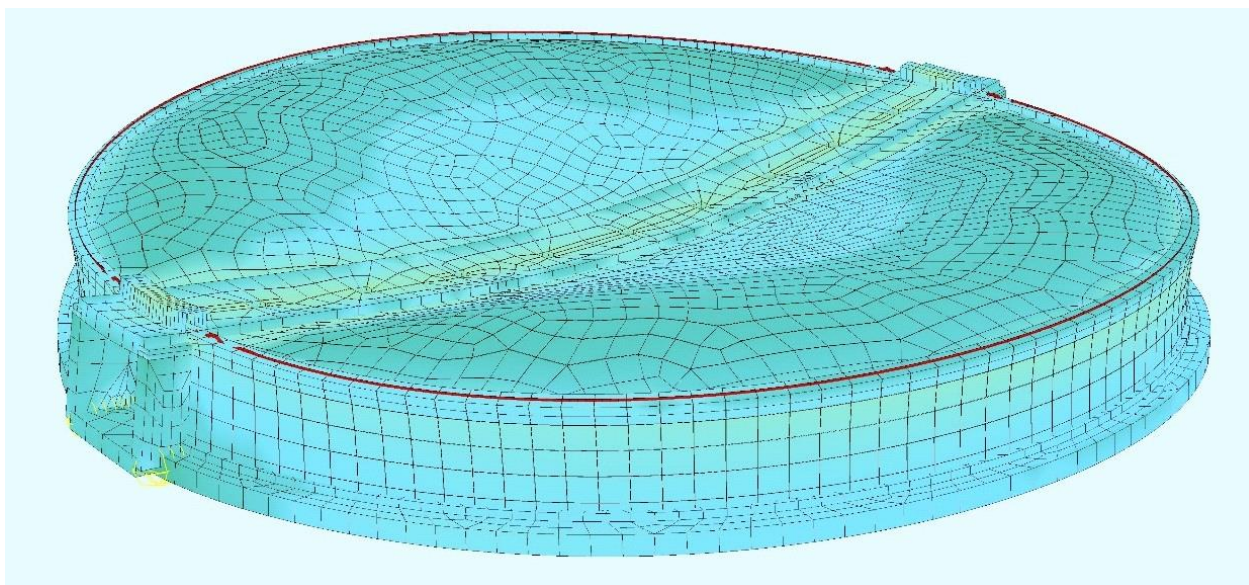


Рис. 2. Скінчено-елементна модель фундаменту силосу з підземною галереєю

**Аналіз результатів.** Як приклад реалізації розглянутих вище конструктивних рішень фундаментів силосів проаналізовано загальне осідання в межах фундаменту для конструкції з підсилюючим поверхом, подане на рис. 3, та для конструкції з підземною галереєю,

подане на рис. 4 для силосів діаметром 27,5 м. Осідання фундаменту обчислено методом скінчених елементів із використанням розрахункової схеми у вигляді лінійно-деформованого напівпростору.

Для фундаменту з підземною галереєю прийнято середній тиск під подошвою  $p_{\text{сер}} = 230$  кПа, а середнє значення вертикального напруження від власної ваги ґрунту під подошвою фундаменту силосу  $\sigma_{zg} = \sum \gamma_i \cdot h_i = 22,8$  кПа. Нижню межу стисливої товщі основи прийнято на глибині  $z = H_c$ , де виконується умова  $\sigma_{zp} \leq 0,5 \cdot \sigma_{zg}$ .

У результаті розрахунку визначено, що максимальне розрахункове осідання

фундаменту становить  $S = 8,0$  см. Максимальне розрахункове значення стисливої товщі становить  $H_c = 20$  м. Для фундаменту з підсилюючим поверхом прийнято середній тиск під подошвою  $p_{\text{сер}} = 240$  кПа. Осідання фундаментів силосів склало  $S = 12$  см. При цьому  $S < S_{\text{max,u}} = 15$  см, де  $S_{\text{max,u}}$  – величина гранично допустимого значення осідання.

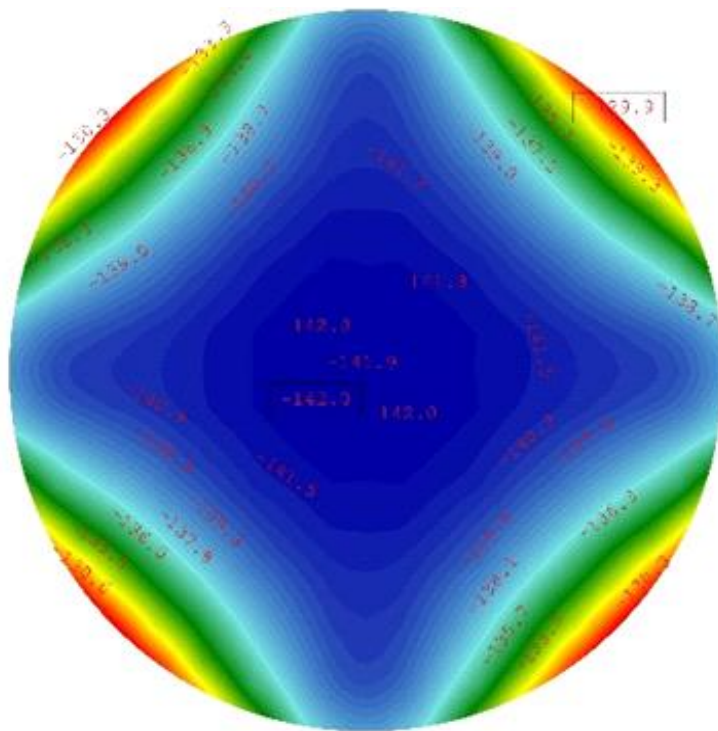


Рис. 3. Вертикальні переміщення (осідання) фундаменту з підсилюючим поверхом за шкалою:  
■ – 143.9 мм, ■ – 137 мм, ■ – 129.9 мм, крок – 0.388 мм

Фундамент з підземною галереєю та периметральною стінкою у вигляді стрічкового фундаменту не тільки більш економічний, але й більш ефективний за величиною осідань у порівнянні з плитним

круглим фундаментом з плоским днищем та підсилюючим поверхом. Це можна пояснити особливостями розподілення контактних напружень та їх розсіювання у стисливій товщі ґрунту [25].

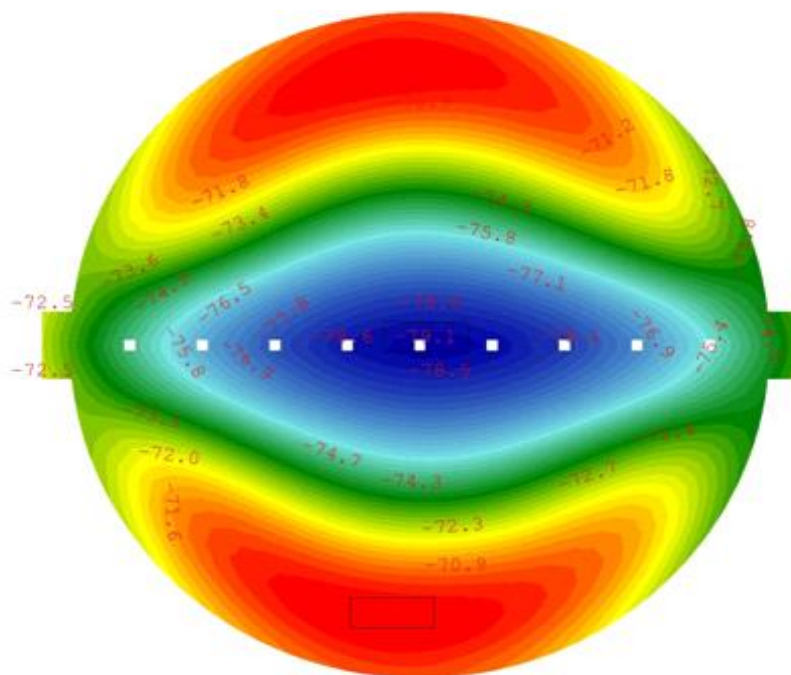


Рис. 4. Вертикальні переміщення (осідання) фундаменту з підземною галереєю за шкалою:  
 ■ – 79.1 мм, ■ – 74.6 мм, ■ – 70.2 мм, крок – 0.222 мм

**Висновки.** Під час численної апробації запропонованих конструктивних рішень фундаментів силосів встановлено, що значення нерівномірності деформації в межах фундаменту складає до 10 % для фундаменту з підсилюючим поверхом і 15 % для фундаменту з підсилюючою галереєю. Для конструкції сталевих силосів важливі не абсолютні значення деформацій, а й відносні осідання в межах ділянок периметру подібно крену. Так, для фундаменту з підсилюючою галереєю маємо більш сприятливий режим роботи щодо локальних осідань в межах фундаменту.

Слід зауважити щодо різкого переходу деформацій в межах радіусу фундаменту з підземною галереєю та якісного вирівнювання деформацій в межах фундаменту з підсилюючим поверхом. Таке

розподілення визначається жорсткістю конструкції фундаменту з підсилюючим поверхом, що зумовлена влаштуванням вертикальних діафрагм в обох напрямках.

Враховуючи геометричні розміри фундаментів силосів і напружено-деформований стан окремих його конструктивних елементів слід зазначити доцільність застосування попереднього напруження з метою підвищення тріщиностійкості. До таких елементів здебільшого можуть бути віднесені стіни та перекриття, що сприймають згин та розтяг. Підвищення жорсткості внаслідок попереднього напруження позитивно впливає на загальний напружено-деформований стан конструкції фундаменту в цілому.

#### Список використаних джерел

1. Латышев Б. В. Практические методы расчета железобетонных силосных корпусов: монография. 2-е изд., доп. и перераб. Ленинград: Стройиздат, 1985. 192 с.
2. Руководство по проектированию плитных фундаментов каркасных зданий и сооружений башенного типа / НИИОСП им. Н. М. Герсевича. Москва: Стройиздат, 1984. 263 с.

3. Bozozuk M. The instrumented tower silo at Hammond, Ontario. *Canadian Agricultural Engineering*. 1979. Vol. 21, No 2. P. 79–84. URL: <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/ft/?id=226f85b4-be7b-4c13-90b6-b5ffeb8dfce2> (last access: 04.10.2021).
4. Scott J. D., Haile G., Bozozuk M. Foundation Performance of a Steel Tower Silo at Richmond, Ontario. *Canadian Agricultural Engineering*. 1979. Vol. 21, No 2. P. 85–89. URL: <https://goo.su/aPtY> (last access: 03.10.2021).
5. Becker D. B., Lo K. Y. Settlement and load transfer of ring foundation for tower silos. *Canadian Geotechnical Journal*. 1979. Vol. 21, No 2. P. 97–110. URL: <https://goo.su/abEu> (last access: 03.10.2021).
6. Turnbull J. E., Jackson H. A., Lowe D. Reinforced extended ring foundations for top-unloading concrete tower silos. *Canadian Agricultural Engineering*. 1979. Vol. 21, No 2. P. 111–116. URL: <https://goo.su/bfqq> (last access: 03.10.2021).
7. Turnbull J. E., Munroe J.A., Darisse J.P.F. Should silo foundations be placed below frost? *Agricultural Engineering*. 1982. Vol. 24, No 149. P. 149–155. URL: <https://goo.su/by4c> (last access: 04.10.2021).
8. Тетиор А. Н. Проектирование и сооружение экономичных конструкций фундаментов: монография. Киев: Будівельник, 1975. 204 с.
9. Martins C. J., Figueiredo O. A., Martins L. A. & Peixoto R. A. F. Silo foundation optimization through reinforcement concrete shell structure. *Computer Aided Optimum Design in Engineering XI*. Ashurst : WIT Press, 2009. P. 233–243. URL: <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/OP09/OP09021FU1.pdf> (last access: 04.10.2021).
10. Jiang H., Xie H. J., Zhang W. Analysis of Dynamic Characteristics for Cylinder Reinforced Concrete Silo Supported by Columns-cylinder. *Xihua Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)*. 2012. Vol. 31, No 1. P. 102–105. URL: [https://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTotat-SCGX201201027.htm](https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotat-SCGX201201027.htm) (last access: 04.10.2021).
11. Fank M. Z., do Nascimento J. W. B., Cardoso D. L., Meira A. S. & Willrich F. L. Vertical pressures and compressive friction force in a large silo. *Engenharia Agrícola*. 2018. Vol. 38. P. 498–503. URL: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n4p498-503/2018> (last access: 04.10.2021).
12. Azadi M. R. E., Soltani A. A. The effects of soil-foundation-structure interaction on the dynamic response of Delijan cement-storage silo under earthquake loading. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2010. Vol. 15. P. 659–676. URL: <https://goo.su/aQ3M> (last access: 07.10.2021).
13. Durmus A., Livaoglu R. A simplified 3 DOF model of A FEM model for seismic analysis of a silo containing elastic material accounting for soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2015. Vol. 77. P. 1–14. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0267726115001165> (last access: 05.10.2021).
14. Li S., Zhao W., Guo Z. Study on Seismic Response of Silo-Stock-Foundation Interaction System. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*. 2018. Vol. 39, No 12. p. 1764. URL: <https://goo.su/aFYb> (last access: 10.11.2021).
15. Shiva Bhushan J. Y. V., Mohammed A. A., Madhira M. Re-evaluation of Failure of Silo Tower Foundations. *Ground Characterization and Foundations*. Singapore: Springer, 2022. P. 831–843. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-3383-6\\_72](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-3383-6_72) (last access: 10.11.2021).
16. Бровко И. С. Негативные последствия взаимного влияния свайных фундаментов и их неравномерного заглубления при эксплуатации силосов. *Повышение качества образования, современные инновации в науке и производстве*. 2018. С. 308–310.

17. Geffen S., Birnbaum I. Raft and piles foundation of a silo. *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2005. P. 1979–1982. URL: <https://goo.su/bif7> (last access: 10.11.2021).
18. Rejowski K., Iwicki P. Buckling analysis of cold formed silo column. *Mechanics and Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 20, No 2. P. 109–120. URL: [http://www.kdm.p.lodz.pl/articles/2016/20\\_2\\_3RKPI.pdf](http://www.kdm.p.lodz.pl/articles/2016/20_2_3RKPI.pdf) (last access: 10.11.2021).
19. ДБН В 2.2-8-98 Підприємства, будівлі і споруди по зберіганню та переробці зерна. [На заміну СНіП 2.10.05-85; чинний від 1998-07-01]. Вид. офіц. Київ: Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України, 1998. 40 с.
20. Основания и фундаменты резервуаров: производств. изд. / Ю. К. Иванов, П. А. Коновалов, Р. А. Мангушев, С. Н. Сотников; под. ред. П. А. Коновалова. Москва: Стройиздат, 1989. 95 с.
21. Poulos H. G. Tall building foundations: design methods and applications. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2016. Vol. 1, No 1. P. 1–51. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41062-016-0010-2> (last access: 10.11.2021).
22. Основи та фундаменти циліндричних силосів для зерна / А. М. Дворник, І. Г. Любченко, В. А. Титаренко, О. В. Шидловська. *Наука та будівництво*. 2019. Т. 21, № 3. С. 12–18. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ntab\\_2019\\_3\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ntab_2019_3_3) (дата звернення: 10.11.2021).
23. Butenko A., Gerasimenko O. Regulation of stress-strain state and calculation of deformations of continuous foundations under increased multiple loads. *MATEC Web Conf. 6th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings» (Transbud-2017)*. 2017. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711601002> (last access: 10.11.2021).
24. Кушнер С. Г. Расчет деформаций оснований зданий и сооружений: монография. Запорожье: ООО «ИПО Запорожье», 2008. 496 с.
25. Santos M. G. C., Correa M. R. S. Analysis of the effects of soil-structure interaction in reinforced concrete wall buildings on shallow foundation. *Structures and Materials Journal*. 2018. Vol. 11, No 5. P. 1076–1109. URL: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952018000500010> (last access: 10.11.2021).

---

Мозговий Андрій Олексійович, доктор технічних наук, доцент кафедри геотехніки, підземних та гідротехнічних споруд Харківського національного університету будівництва та архітектури. ORCID iD: 0000-0002-9142-3169. Тел. (050) 749-03-04. E-mail: [mozgovoyandrey@ukr.net](mailto:mozgovoyandrey@ukr.net)

Бутенко Анатолій Анатолійович, аспірант кафедри геотехніки, підземних та гідротехнічних споруд Харківського національного університету будівництва та архітектури. ORCID iD: 0000-0002-5642-983X. Тел. (067) 281-88-49. E-mail: [butenkoanatoliy@gmail.com](mailto:butenkoanatoliy@gmail.com)

Mozgovuy Andriy, Dr. Sc. (Tech), Associate Professor, Department of Geotechnics, Underground and Hydraulic Structures, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. ORCID iD: 0000-0002-9142-3169. Tel.: (050) 749-03-04. E-mail: [mozgovoyandrey@ukr.net](mailto:mozgovoyandrey@ukr.net)

Butenko Anatolii, postgraduate student, Department of Geotechnics, Underground and Hydraulic Structures, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. ORCID iD: 0000-0002-5642-983X. Tel.: (067) 281-88-49. E-mail: [butenkoanatoliy@gmail.com](mailto:butenkoanatoliy@gmail.com)

Статтю прийнято 14.02.2022 р.

---

## ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ (193)

---

УДК 528.024:528.06

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ НОРМАЛЬНИХ ВИСОТ ПУНКТИВ ЗА ДАНИМИ GNSS-СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Кандидати техн. наук С. В. Нестеренко, Р. А. Міщенко

### EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE ACCURACY OF DETERMINING THE NORMAL HEIGHTS OF POINTS ACCORDING TO GNSS OBSERVATIONS

PhD (Tech.) S. Nesterenko, PhD (Tech.) R. Mishchenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.199.2022.258807>



**Анотація.** Наведено результати експериментальної перевірки точності визначення нормальних висот за допомогою двочастотних GNSS-приймачів у RTK режимі на основі стійкої мережі нівелірних пунктів, які розташовані на геодезичному дослідному полігоні Полтавської гравіметричної обсерваторії. Досліджено умови ефективного використання супутникових геодезичних приймачів. Відмічено, що на сьогодні в Україні немає чинного нормативно-інструктивного документу, який містить положення щодо використання новітніх геодезичних технологій.

**Ключові слова:** GNSS-приймач, нівелірна мережа, перманентні GNSS-станції, координатні поправки, геометричне нівелювання, геодезична точність.

**Abstract.** The article considers the issue of determining the absolute coordinates of points using modern geodetic technologies. The list of networks of active reference stations of Ukraine that transmit differential corrections has been updated. The article presents the results of experimental verification of the accuracy of normal altitudes using dual-frequency GNSS – receivers in RTK mode based on a stable network of leveling points located at the geodetic research site of the Poltava Gravimetric Observatory. The satellite data was transmitted through the Poltava Base Permanent Station (POLV), located on the territory of the geodetic landfill. The observations were based on System.net network. Determination of the quantitative characteristics of the vertical dynamics of the benchmarks under the action of local hydrothermal factors was carried out relative to a stable benchmark with a depth of 6 m geometric leveling using a level H-05. The normal heights of the points according to which further research was performed were adjusted in April 2021. The following results were obtained in the research: 21 % of measurements have gross deviations, 47 % - within acceptable limits, 32 % of measurements have high geodetic accuracy. It was found that the use of network RTK has a number of advantages, such as ease and speed of removal, versatility and cost-effectiveness, the ability to work in almost anywhere in Ukraine. However, gross deviations are likely to occur due to a number of factors, such as ephemeris and time errors, satellite configuration geometry, multipath, ionospheric and troposphere effects, and so on. The conditions of effective use of satellite geodetic receivers are investigated. It is noted that the use of GPS / GNSS receivers is limited in populated areas due to poor image quality. In built-up areas, the method of geometric leveling remains the most accurate for determining the heights of points.

It is noted that today in Ukraine there is no current normative and instructive document, which contains provisions for the use of the latest geodetic technologies.

**Keywords:** *GNSS-receiver, leveling network, permanent GNSS-stations, coordinate corrections, geometric leveling, geodetic accuracy.*

**Вступ.** Технологічна еволюція в геодезичному виробництві призвела до широких можливостей виконання різноманітних інженерно-технічних робіт. Більшість геодезичних робіт пов'язані з визначенням координат точок на місцевості у певній системі координат з подальшим трансформуванням їх у Державну геодезичну референцну систему координат УСК-2000, оскільки обробка матеріалів зйомок при виконанні робіт із землеустрою здійснюється саме в цій системі координат або в місцевій системі координат, яка однозначно зв'язана із системою координат УСК-2000. Визначення абсолютних координат точок можна виконати різними технологічними засобами, досягаючи при цьому достатньої точності. Проте, часто сучасне покоління геодезистів, нехтуючи нормативно-законодавчим підґрунтям, використовує сучасні геодезичні технології з порушенням контрольних заходів. Наприклад, згідно з [1], під час використання супутникових геодезичних GNSS-приймачів для визначення точок знімальної основи та зйомки геопросторових об'єктів із застосуванням технологій RTK необхідно перевіряти диференційне поле координатних поправок, які задаються мережами GNSS. Тобто, виконуючи геодезичну зйомку за допомогою GNSS-приймачів, треба знати про ймовірність виникнення грубих відхилень через ряд факторів: похибки ефемерид та часу, геометрія конфігурації супутників, багатопроменеве поширення, вплив іоносфери та тропосфери тощо [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженнями розвитку глобальних навігаційних супутникових систем, технологій супутникової навігації займалися багато вітчизняних та зарубіжних науковців, таких як Грей Джим, Дж. Розенау, В. В. Дик, Н. Хомські, Г. Р. Громов, Ю. А. Соловйов, А. І. Гусєв, В. Гондюл,

І. Забара [3], А. Й. Віват, В. О. Літинський [4], І. В. Калинич, С. Г. Савчук [5], дослідженнями сучасної геодинаміки в Україні, у тому числі й вертикальної, – К. Р. Третяк [6], В. Г. Павлик [7] та ін.

**Визначення мети та завдання дослідження.** На основі стійкої мережі нівелірних пунктів необхідно виявити вплив факторів на точність визначення нормальних висот у RTK режимі, проаналізувати ефективність використання супутникових геодезичних приймачів GNSS.

**Основна частина дослідження.** Геодезична та картографічна основа Державного земельного кадастру є єдиною для формування та ведення містобудівного кадастру та кадастрів інших природних ресурсів. Тому однією з необхідних умов для якісного ведення земельного кадастру є наповнення баз даних точними і достовірними геодезичними даними [8].

Щоб здійснити дійсно якісну та максимально точну геодезичну зйомку необхідно, щоб вона виконувалася з використанням надійних інструментів, які пройшли перевірку на якість і достовірність. Причому, інструменти для виконання подібних робіт повинні пройти не просто перевірку, а державну атестацію з подальшою щорічною переатестацією. Сам процес зйомки має бути проведений за всіма геодезичними правилами і за певним алгоритмом.

GNSS-технологія зйомки знайшла широке застосування в геодезії, міському і земельному кадастрі, при інвентаризації земель, будівництві інженерних споруд, у геології тощо [9, 10]. GNSS-приймачі для геодезії спеціально створені для точного визначення координат точкових об'єктів [11]. Для створення і розвитку планово-висотного обґрунтування, виконання топографічних зйомок усіх масштабів застосовуються двочастотні GNSS-

приймачі, які дають можливість працювати на великих відстанях від базової станції. GNSS-приймачі мають можливість прийому сигналів декількох супутникових систем, зменшують час роботи і покращують якість і точність вимірювань.

Для корекції GNSS-даних на території України використовуються методи корегування DGPS і RTK з наземних базових станцій. Диференціальний режим DGPS забезпечує дециметрову точність (1–3 м) визначення місцерозташування об'єкту [12]. Цей метод є достатньо простим і економічним, оскільки в роботі застосовуються одночастотні антени. Для високоточної координації знаходження планових координат і висот точок топографічної поверхні із сантиметровою точністю використовується режим RTK. Для роботи в даному режимі необхідні двочастотні антени, які дають можливість картографування ділянок території з геодезичною точністю на всій території покриття мережі RTK.

GNSS-приймачі з RTK – в даній комплектації прилади оснащуються приймально-передавальними радіо або GSM-модемами, що дають можливість отримувати кінцевий результат вимірювань і оцінку точності безпосередньо в полі у режимі реального часу (RTK) із сантиметровою точністю в мережі постійно діючих референцних GNSS-станцій [13]. Вважається, що основним недоліком використання RTK є те, що отримання поправок у реальному часі – це платні послуги.

Світова практика використання активних перманентних станцій почалася з 2000 р. [4]. Такі референцні станції об'єднуються у локальну національну мережу і працюють для реалізації RTK-технологій [5]. У геодезичному сенсі активна мережа референцних станцій є мережею згущення від мережі

перманентних станцій, хоча й відрізняються своїми функціями, точністю, інфраструктурою.

В Україні технологічне обладнання та програмний продукт для забезпечення визначення координат у RTK режимі є на сучасному рівні. Функціонують такі мережі активних референцних станцій, які передають диференційні поправки [14–19]: System.net, Geoterrace, RTK HUB, NGC.NET, UA-EUPOS/ZakPOS, СКНЗУ (табл. 1). Кожна з них використовує спеціальне програмне забезпечення фірм Leica, Trimble, Topcon та наземні GNSS станції. Мережа UA-EUPOS/ZakPOS та System.net повністю автоматизовані.

У Полтавській області створені усі необхідні умови для визначення координат у режимі RTK. Діють три окремих сервіси для передачі поправок у реальному часі: UA-EUPOS/ZakPOS, RTK HUB, System.net. Система RTK HUB забезпечує цілодобовий доступ до сервісу RTK корекції та сирих даних супутникових спостережень. Пропонуються такі сервіси: доступ 24/7; робота від мережевого рішення RTK; робота від найближчої станції; робота від обраної станції; похвилинні пакети доступу до RTK [16]. Вартість однієї години в режимі реального часу (RTK) залежить від вибраної підписки і складає від 0,65 грн до 3,75 грн.

Мережа EUPOS/ZakPOS повністю побудована за принципами та вимогами EUPOS. Використовується апаратне та програмне забезпечення фірми Trimble. Вартість однієї хвилини спостережень базових та віртуальних станцій (постобробка) становить 0,036 €, що за курсом, становить 1,18 грн. Вартість однієї хвилини в режимі реального часу (RTK) за 1 хв 0,06 €, що за курсом приблизно становить 1,92 грн. [18].

Таблиця 1

## Перелік українських мереж перманентних GNSS-станцій

| № з/п | Назва мережі    | Організація                                                                                        | Кількість пунктів ГНСС            | Започаткована, рік |
|-------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 1.    | System.net      | ПрАТ «System Solutions», м. Київ                                                                   | 110                               | 2011               |
| 2.    | Geoterrace      | Інститут геодезії Національного університету «Львівська політехніка», м. Львів                     | 82                                | 2012               |
| 3.    | RTK HUB         | Компанія «TNT-TPI» (представництво TOPCON в Україні), м. Дніпро                                    | 52                                | 2005               |
| 4.    | NGC.NET         | НПП «Навігаційно-геодезичний центр» (офіційний дилер фірми Leica Geosystems, Швейцарія), м. Харків | 10                                | 2010               |
| 5.    | UA-EUPOS/ZakPOS | Компанія «ZakPOS» (представництво Trimble в Україні), Закарпатська обл. м. Мукачево                | 173 – в Україні, 21 – за кордоном | 2009               |
| 6.    | СКНЗУ           | Національний центр управління та випробувань космічних засобів, м. Київ                            | 10                                | 2010               |

Мережа System.net надає послуги для будь-якого споживача, який має GNSS-приймач з можливістю прийняття RTK поправок з Інтернету через GSM / GPRS підключення. RTK поправки передаються у вигляді стандартизованих повідомлень в різних форматах: RTCM v2.x, v3.x, Leica, Leica 4G, CMR, NMEA і т. д. Зв'язок за протоколом NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol – Мережевий протокол передачі RTCM через Інтернет). Зареєструватися в мережі і підписатися на пакет послуг роботи в режимі реального часу можна через систему управління послугами [14]. RTK – базовий пакет для роботи, що включає в себе функції роботи від одиночної базової станції – «nearest» та мережеві рішення – Automax, I-Max, VRS. Мережа System.net надає програмне забезпечення у Telegram і Viber, за допомогою якої можна дізнатись координати потрібної станції або подивитись стан найближчих до нас.

Мережа базових станцій RTK являє собою певну кількість постійно діючих

GPS/GNSS-приймачів, рекомендовано мати мінімум п'ять базових станцій, які об'єднують накопичені супутникові дані і формують RTK поправки для роверів. Відстань між станціями не повинна перевищувати 70 км, радіус перекриття не більше 50 км для двочастотних приймачів.

Дослідження проводилися на геодезичному полігоні Полтавської гравіметричної обсерваторії. На полігоні закладена мережа реперів різної глибини з відомими показниками стійкості. Розташування GPS-станції на території геодезичного полігону (POLV) значно спрощує завдання визначення кількісних характеристик її вертикальної динаміки під дією локальних гідротермічних чинників. На відстані 75 м від станції знаходиться репер А1 глибиною 6 м, який відзначається високою стійкістю впродовж усіх 30 років спостережень. У динаміці цього знаку відсутні повільні та сезонні рухи [7]. Саме даний репер вибрано як вихідний при визначенні характеристик можливої вертикальної динаміки всіх інших реперів

на геодезичному полігоні. Координати пунктів було визначено класичним методом – геометричним нівелюванням за допомогою нівеліру Н-05. Сезонні спостереження здійснювалися також з точністю до 0,05 мм.

Враховуючи сезонні динамічні рухи (квітень 2021 р.), скореговані нормальні висоти пунктів, згідно з якими виконували подальші дослідження (табл. 2).

Таблиця 2

Порівняння координат, визначених традиційним методом  
і в результаті знімання GNSS-приймачем

| Номер<br>рядка | Назва<br>пункту | Висота, м | Середня висота, визначена<br>GNSS-приймачем, м | Похибка, $\Delta$ | $\Delta^2$ |
|----------------|-----------------|-----------|------------------------------------------------|-------------------|------------|
| 1              | Rp 7296         | 148,207   | 148,231                                        | +0,024            | 0,0006     |
| 2              | A 13            | 148,425   | 148,215                                        | -0,210            | 0,0441     |
| 3              | Rp 2            | 149,371   | 149,398                                        | +0,027            | 0,0007     |
| 4              | Rp 4            | 150,071   | 150,217                                        | +0,146            | 0,0213     |
| 5              | Rp 5            | 150,651   | 150,661                                        | +0,010            | 0,0001     |
| 6              | A 1             | 149,811   | 149,918                                        | +0,107            | 0,0115     |
| 7              | A 8             | 150,565   | 150,557                                        | -0,008            | 0,0001     |
| 8              | Rp 9            | 150,535   | 150,532                                        | -0,003            | 0,0000     |
| 9              | Rp 10           | 148,473   | 148,499                                        | +0,026            | 0,0007     |
| 10             | Rp 12           | 146,962   | 146,937                                        | -0,025            | 0,0006     |
| 11             | Rp 13           | 147,671   | 147,657                                        | -0,014            | 0,0002     |
| 12             | Rp 14           | 145,967   | 145,959                                        | -0,008            | 0,0001     |
| 13             | A 9             | 144,368   | 144,379                                        | +0,011            | 0,0001     |
| 14             | Rp 15           | 144,370   | 144,341                                        | -0,029            | 0,0008     |
| 15             | Rp 16           | 143,319   | 143,325                                        | +0,006            | 0,0000     |
| 16             | Rp 17           | 141,269   | 141,284                                        | +0,015            | 0,0002     |
| 17             | A 10            | 139,009   | 139,001                                        | -0,008            | 0,0001     |
| 18             | Rp 18           | 139,507   | 139,512                                        | +0,005            | 0,0000     |
| 19             | Rp 19           | 137,352   | 137,343                                        | -0,009            | 0,0001     |
| 20             | Rp 21           | 135,597   | 135,580                                        | -0,017            | 0,0003     |
| 21             | Rp 24           | 134,211   | 134,246                                        | +0,035            | 0,0012     |
| 22             | Rp 23           | 132,417   | 132,446                                        | +0,029            | 0,0008     |
| 23             | Rp 25           | 134,432   | 134,422                                        | -0,010            | 0,0001     |
| 24             | Rp 26           | 135,173   | 135,107                                        | -0,066            | 0,0044     |
| 25             | Rp 28           | 137,172   | 137,112                                        | -0,060            | 0,0036     |
| 26             | A 11            | 139,787   | 139,801                                        | +0,014            | 0,0002     |
| 27             | Rp 29           | 141,074   | 141,057                                        | -0,017            | 0,0003     |
| 28             | Rp 30           | 139,181   | 139,186                                        | +0,005            | 0,0000     |
|                |                 |           | $\Sigma$                                       | -0,024            | 0,0922     |

Виконані спостереження базувалися на мережі System.net. Вона складається з активних перманентних станцій, які видають поправки в системі координат УСК-2000 з вказівкою точності результатів вимірювання.

Сервіс при сприятливих умовах дає можливість протягом декількох секунд визначити місцезонашування з точністю 10-20 мм у плані і 15-30 мм по висоті. Аналізуючи отримані дані, бачимо, що шість вимірів (2-й, 4-й, 6-й, 21-й, 24-й і 25-й) мають більші відхилення – від 0,035 м

до 0,210 м. У нашому випадку це 21 % вимірів. Походження таких відхилень – надмірне затінення, що спричиняє затування при прямому поширенні сигналу через листя дерев. 47 % вимірів – в допустимих межах, проте не є ідеальними

для точних геодезичних вимірювань (відхилення становить 1–3 см). І лише 32 % вимірів мають відхилення до 0,01 м [14].

Відхилення при визначенні нормальних висот реперів за допомогою GNSS-приймача наведено на рис. 1.

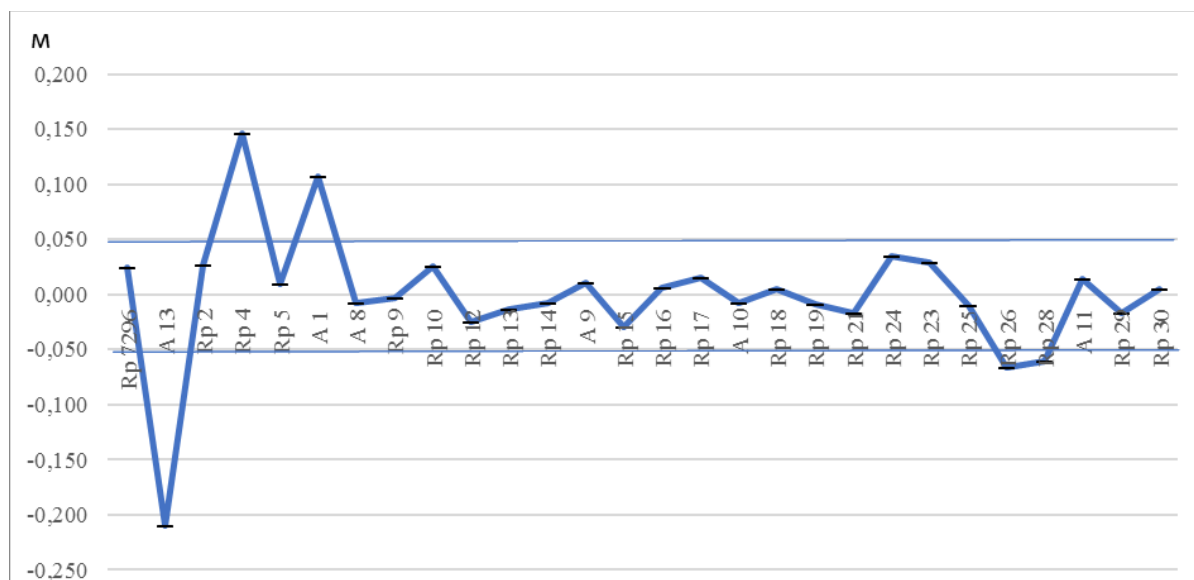


Рис. 1. Відхилення при визначенні нормальних висот реперів за допомогою GNSS-приймача (згідно з табл. 2)

Середньоквадратичну похибку одного виміру даного рядка обчислимо за формулою Бесселя

$$m = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,0922}{28-1}} = 0,058 \text{ м,}$$

де  $\Delta$  – похибки,  $n$  – кількість вимірів.

Граничні значення похибок  $\Delta_{\text{граничне}} = 3m = 0,175 \text{ м.}$

Такі результати дають цілісну характеристику використання GNSS-технологій для визначення нормальних висот пунктів.

Відкинемо «грубі» результати, отримані на точках A 13, Rp 4, A 1, Rp 26, Rp 28, які виникли переважно в результаті надмірного затінення. Отримаємо графік відхилень із середнім трендом в 0,008 м (рис. 2).

В Інструкції з топографічного знімання (п. 1.1.18) [20] зазначено, що

середні помилки знімання рельєфу відносно найближчих точок геодезичної основи не мають перевищувати за висотою: 1/4 прийнятої висоти перерізу рельєфу при кутах нахилу до 2 град.; 1/3 при кутах нахилу від 2 град. до 6 град. для планів масштабів 1:5000, 1:2000 та до 10 град. для планів масштабів 1:1000 та 1:500; 1/3 при перерізі рельєфу через 0,5 м на планах масштабів 1:5000 та 1:2000. У лісовій місцевості ці допуски збільшуються в 1,5 раза. У районах з кутами нахилу понад 6 град. для планів масштабів 1:5000 та 1:2000 та більше 10 град. для планів масштабів 1:1000 та 1:500 кількість горизонталей має відповідати різниці висот, що визначена на перегінах схилів, а середні помилки висот, які визначено на характерних точках рельєфу, не мають перевищувати 1/3 прийнятої висоти перерізу рельєфу.

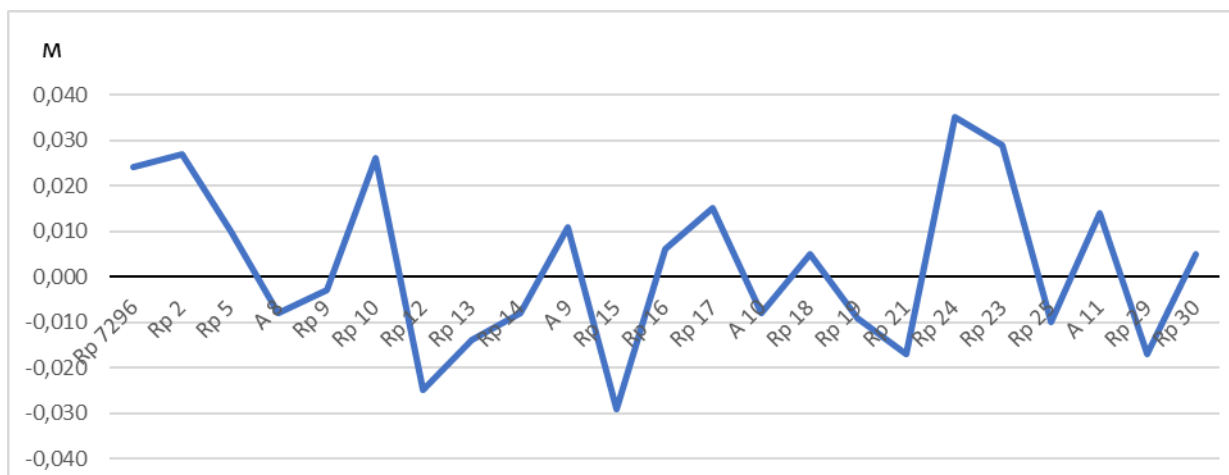


Рис. 2. Відхилення при визначенні нормальних висот реперів за допомогою GNSS-приймача (за виключенням грубих помилок)

Проте такі помилки допустимі лише для топографічного знімання і є занадто великими для проведення точних геодезичних вимірювань. Враховуючи вимоги Інструкції з топографічного знімання [20], вертикальну точність приладу в режимі RTK ( $\pm 20$  мм) та

точність роботи сервісу [14] (до 30 мм по висоті), результати досліджень на геодезичному полігоні мають позитивний характер – всі значення містяться в гранично-допустимих межах (рис. 3).

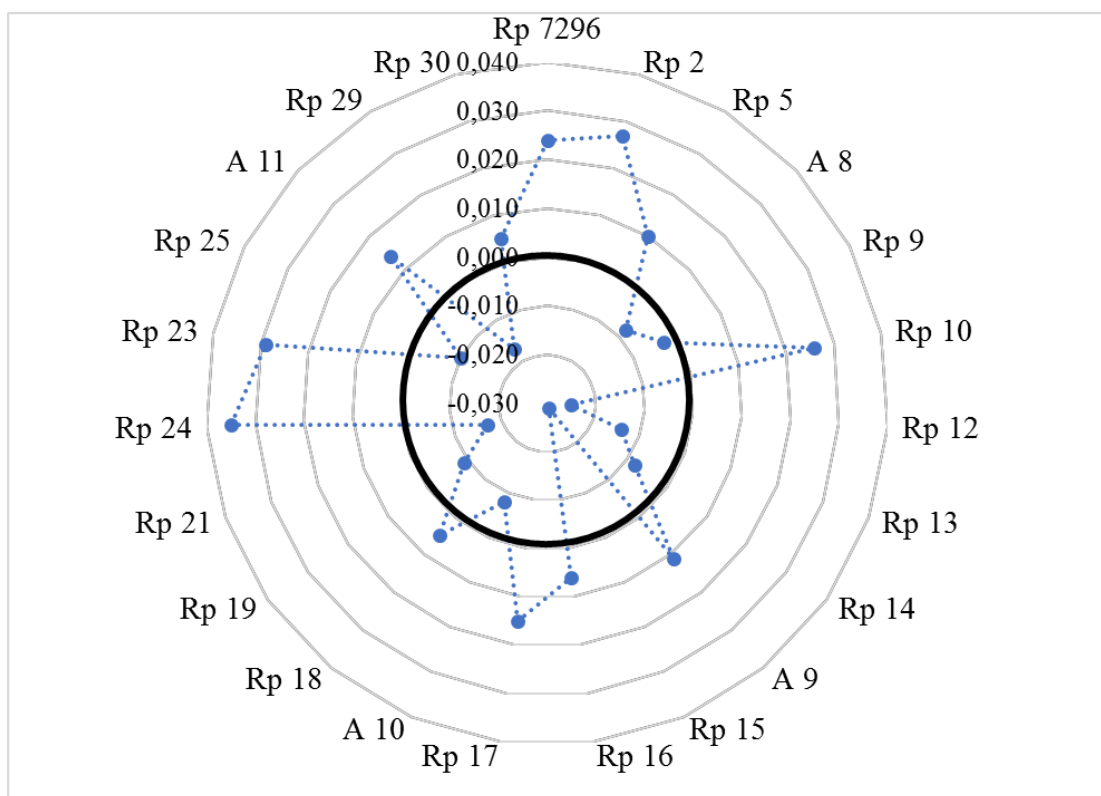


Рис. 3. Кругова діаграма відображення відхилень при визначенні нормальних висот реперів за допомогою GNSS-приймача (за виключенням грубих помилок), м

**Висновки.** З проведенням земельних реформ в Україні з'явилася необхідність проведення різних геодезичних і землевпорядних робіт. Реорганізація земельних структурних одиниць вимагає чіткого розмежування, виготовлення відповідної документації. Сьогоднішній кадастр – це інтегровані бази даних, інформаційні та геоінформаційні технології, цифрові електронні карти, аерофото- та космічні зйомки. Відомості, що надходять до єдиної бази даних вносяться, перевіряються, систематизуються та впорядковуються за єдиними правилами кваліфікованими фахівцями.

На сьогодні майже 60 % землевпорядних підрозділів технічно оснащені GNSS-приймачами, самотужки, без залучення відповідних фахівців з геодезичних служб, виконують знімання. Як правило, такі прилади без свідоцтва про перевірку, основні технологічні вимоги не дотримуються, відповідно й точність знімання може бути різною. Як показали дослідження, використання GNSS-технологій вимагають кваліфікованого підходу, особливо при визначенні висот пунктів.

Використання мережевого RTK має ряд переваг порівняно з поодинокими базовими станціями: більш висока точність, простота, економічність, швидкість знімання, універсальність, можливість роботи практично в будь-якій точці України. Даною мотивацією керується переважна більшість геодезистів в Україні. Проте слід виокремити основні технологічні і законодавчі «перепони».

По-перше, головним законодавчим документом в цій сфері є Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500, яка діє з 1999 р. В Інструкції ще не прописана можливість використання для топографічного знімання GPS/GNSS-технологій з RTK-поправками. Згідно з

наказом Держгеокадастру від 24.11.2020 р. № 500 розроблено проект Порядку топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500, до 17.01.2022 р. приймалися пропозиції та зауваження до нього. Новий нормативний документ має містити положення щодо використання новітніх геодезичних, в тому числі і супутникових, технологій.

По-друге, слід пам'ятати про допустиму точність отриманих даних. Геометрія конфігурації супутників при такій кількості супутників у зоні видимості (у нашому випадку 8–14) практично не впливає на планове положення точок, але має суттєвий вплив на точність визначення нормальних висот. Тому на сьогодні основним найточнішим методом знаходження висот пунктів є геометричне нівелювання.

По-третє, необхідно дотримуватися інструктивних рекомендацій щодо топографічного знімання на забудованій території. Проведені дослідження показали, що при зніманні GNSS-приймачами можуть виникати явища багатопроменевого поширення та затінення. Коли багатопроменевий сигнал відбивається від іншої будівлі чи об'єкта, траєкторія прямого шляху може бути щільно затіненою і приймач може відстежувати тільки багатопроменеві сигнали. Тому найбільш доцільним використанням при топографічному зніманні у населеному пункті є змішаний метод з використанням тахеометра і GNSS-приймача.

Зважаючи на те, що вже у найближчому майбутньому методи геодезичного знімання будуть удосконалюватися, змінюватиметься або доповнюватиметься нормативно-інструктивна база, то й подальші дослідження будуть спрямовані на ефективність використання різних методів топографічного знімання.

*Список використаних джерел*

1. Про затвердження Порядку використання Державної геодезичної референцної системи координат УСК-200 при здійсненні робіт із землеустрою : наказ Міністерства Аграрної політики та продовольства України від 02.12.2016 р. № 509 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1646-16#Text> (дата звернення: 05.02.2022).
2. Precise point positioning and integrity monitoring with GPS and GLONASS / J. Altti, S. Feng, C. Milner, W. Schuster, W. Ochieng, C. Hide, T. Moore, C. Hill. *Paper presented at the European Navigation Conference 2011*. London. 2011.
3. Українська навігаційна супутникова система: стан і перспективи / С. В. Нестеренко, Д. А. Єрмоленко, О. В. Шефер, А. В. Клепко. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава: НУПП ім. Ю.В. Кондратюка. 2021. Вип. 3 (65). С. 4-7.
4. Дослідження точності визначення координат GNSS методом у режимі RTK / А. Й. Віват, В. О. Літинський, В. М. Колгунов, І. Я. Покотило. *Геодезія, картографія і аерофотознімання : міжвідомчий науково-технічний збірник*. Львів : Видавництво Львівської політехніки. 2011. Вип. 74. С. 52–59.
5. До питання точності GPS-спостережень / С. Савчук, Н. Каблук, І. Калинич, І. Проданець. *Геодезія, картографія і аерофотознімання : міжвідомчий науково-технічний збірник*. Львів : Видавництво Львівської політехніки. 2007. Вип. 68. С. 105–108.
6. Tretiyak K., Smoliy K. Modified parameter methods of researching GNSS networks with correlative measurements and systematic errors. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2017. Вип. 2. С. 59–71.
7. Павлик В. Г., Кутний А. М., Нестеренко С. В. Визначення локальних вертикальних рухів перманентної GPS – станції у Полтаві. *Академічна й університетська наука: результати та перспективи: XIII Міжнародна науково-практична конференція*. Полтава: НУПП. 10–11.12.2020. С. 141–145.
8. Особливості функціонування Національної кадастрової системи України в умовах реформування галузі / С. В. Нестеренко, Г. І. Шарий, В. В. Щепак, Т. С. Одарюк. *Містобудування та територіальне планування*. Київ: КНУБА. 2021. С. 182–194.
9. Quesada-Olmo N., Jimenez-Martinez M., Farjas-Abadia M. Real-time high-rise building monitoring system using global navigation satellite system technology. *Measurement*. Vol. 123. pp. 115–124 (2018).
10. Hwang J., Yun H., Park S.-K., Lee D.H., Hong S. Optimal methods of RTK-GPS/accelerometer integration to monitor the displacement of structures. Vol. 12. pp. 1014–1034 (2012).
11. Jiménez-Martínez María Jesús, Farjas-Abadia Mercedes, Quesada-Olmo Nieves. An Approach to Improving GNSS Positioning Accuracy Using Several GNSS Devices. 2021. Vol. 13. P. 1149.
12. Krasuski K., Ćwiklak J. Application of the DGPS method for the precise positioning of an aircraft in air transport. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2018. Vol. 98, pp. 65-79.
13. Darugna F., Wübbena J., Ito A., Wübbena T., Wübbena G., Schmitz M. RTK and PPP-RTK using smartphones: From short baseline to long-baseline applications. In *Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+2019)*. Miami, FL, USA. 2019. pp. 3932–3945.
14. System Solutions. Офіційний сайт. URL: <https://systemnet.com.ua/> (дата звернення: 05.02.2022).

15. Geo Terrace Network. Офіційний сайт. URL: <https://rtkhub.com/> (дата звернення: 05.02.2022).
  16. RTK HUB Network. Офіційний сайт. URL: <https://geoterrace.lpnu.ua/> (дата звернення: 05.02.2022).
  17. NGC.NET. ООО НПП «Навігаційно-геодезичний центр». Офіційний сайт. URL: <http://www.ngcnet.com.ua/> (дата звернення: 05.02.2022).
  18. UA-EUPOS / ZAKPOS. Мережа референцних GNSS станцій. Офіційний сайт. URL: [http://zakpos.zakgeo.com.ua/index.php?option=com\\_content&task=view&id=18&Itemid=86](http://zakpos.zakgeo.com.ua/index.php?option=com_content&task=view&id=18&Itemid=86) (дата звернення: 05.02.2022).
  19. SKNZU. Національний центр управління та випробувань космічних засобів. Офіційний сайт. URL: <https://spacecenter.gov.ua/sknzu> (дата звернення: 05.02.2022).
  20. Про затвердження Інструкції з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 (ГКНТА–2.04–02–98) від 09.04.98 р. № 56. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0393-98#Text>. (дата звернення: 05.02.2022).
- 

Нестеренко Світлана Вікторівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільних доріг, геодезії, землеустрою та сільських будівель Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID iD: 0000-0002-2288-3524. Тел.: +38 (050) 268-17-92. E-mail: [NesterenkoS2208@gmail.com](mailto:NesterenkoS2208@gmail.com)  
Міщенко Роман Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільних доріг, геодезії, землеустрою та сільських будівель Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID iD: 0000-0003-1027-0541. Тел.: +38 (050) 180-00-87. E-mail: [rom2014rom2014@gmail.com](mailto:rom2014rom2014@gmail.com)

Nesterenko Svitlana, PhD (Tech), Associate Professor, department of Highways, Geodesy, Land Management and Rural Buildings, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». ORCID iD: 0000-0002-2288-3524. Tel.: +38 (050) 268-17-92. E-mail: [NesterenkoS2208@gmail.com](mailto:NesterenkoS2208@gmail.com)  
Mishchenko Roman, PhD (Tech), Associate Professor, department of Highways, Geodesy, Land Management and Rural Buildings, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». ORCID iD: 0000-0003-1027-0541. Tel.: +38 (050) 180-00-87. E-mail: [rom2014rom2014@gmail.com](mailto:rom2014rom2014@gmail.com)

Статтю прийнято 04.03.2022 р.

## ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

---

УДК 621.651

### ВИДАЛЕННЯ ВОДИ З ДИЗЕЛЬНОЇ ОЛИВИ ГІДРОДИНАМІЧНИМ ДИСПЕРГУВАННЯМ

Д-р техн. наук Д. С. Жалкін, канд. техн. наук С. Г. Жалкін, асп. Залата А.С.,  
магістранти В. Е. Вініченко, С. В. Скрипченко

### REMOVAL OF DIESEL OIL WATER BY HYDRODYNAMIC DISPERSION

Dr. Sc. (Tech.) D. Zhalkin, Ph.D (Tech.) S. Zhalkin, postgraduate A. Zalata,  
postgraduate V. Vinichenko, postgraduate S. Skripchenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.199.2022.258810>



**Анотація.** З камери згоряння працюючого дизеля в оливу можуть потрапляти води, сполуки сірки й свинцю. Значна кількість дизельної оливи бракується через попадання у неї води або її пари за нещільностями водяної системи та з вихлопними газами, що створює емульсію та осади (шлам) при порівняно низьких температурах й порушує змащення та охолодження поверхонь тертя та збільшує знос деталей двигуна. Така олива підлягає зливу з картера та регенерації.

Найбільш перспективним методом регенерації відбракованої оливи, в тому числі в умовах локомотивного депо, є гідродинамічне диспергування, яке дозволяє вивести воду та модифікувати продукти старіння замість складного процесу коагуляції або випаровування.

В статті розглянуто причину нагріву оливи при її гідродинамічному диспергуванні, виходячи з імовірного припущення, що нагрів обумовлений в'язким (внутрішнім) тертям оливи у гідродиспергаторі та гідроелементах, що забезпечують його функціонування, запропоновано методику розрахунку температури оливи при сталому тепловому режимі гідродинамічного диспергування.

**Ключові слова:** дизельна олива, регенерація, диспергування, модифікація, теплообмін, тиск, в'язке тертя, дизель-генераторна установка, автономний рухомий склад.

**Abstract.** Water, sulfur and lead compounds can enter the oil from the combustion chamber of a running diesel engine. Significant amounts of diesel oil are missing due to water or vapor in the water system and exhaust gases, which creates emulsion and sediment (sludge) at relatively low temperatures and disrupts the lubrication and cooling of friction surfaces and increases wear of engine parts. Such oil must be drained from the crankcase and regenerated.

The most promising method of regeneration of rejected oil, including in the locomotive depot, is hydrodynamic dispersion, which allows to remove water and modify the aging products instead of a complex process of coagulation or evaporation.

The article considers the reason for heating oil during its hydrodynamic dispersion, based on the probable assumption that heating is due to viscous (internal) friction of oil in the hydrodispersant and hydroelements that ensure its operation.

During operation, the oil used in diesel internal combustion engines is a complex mixture of carbohydrates and additive components, has certain physicochemical and operational properties.

*The oil system of the running engine provides greasing and cooling of friction surfaces and is exposed to complex influence of high temperature, oxygen of air, fuel and products of wear of details of the engine and foreign impurity (dust, fuel, water), ie difficult physical and chemical processes occur. aging of oil ".*

*The article considers the reasons for the violation of the oil properties of diesel locomotives due to the modes of operation of diesel engines and the ingress of water or its vapor into the crankcase due to leaks in the cooling system and exhaust gases. When water enters the oil, an emulsion is formed, which leads to the deterioration of the oil layer between the parts in the friction pairs and increased wear of the crankshaft bearings with babbit filling fillings and other parts.*

*The presence of water in the oil contributes to its interaction with additives and their precipitation, creating an oily sticky mass, which can lead to partial or complete cessation of oil supply to friction surfaces, reducing the cooling capacity of refrigerated sections of locomotives and heat exchangers. Diesel oil, which has defective performance, is subject to replacement or high-cost regeneration, ie the restoration of the original properties in order to reuse it. Regeneration is one way to save oil.*

*The following sequence of methods must be followed in the complex of technological processes of regeneration: mechanical – to remove free water and solid contaminants from oil, thermophysical – to evaporate fuel and water residues, as well as physicochemical – coagulation, adsorption. One of the following schemes is used: sludge – treatment with surfactants – fuel distillation – treatment with adsorbent – filtration.*

*The application of these methods requires complex, expensive equipment with high energy consumption, and this in a locomotive depot (or regional center), as a rule, is not economically feasible.*

*Water and fuel are removed in two stages: evaporation (water and fuel) and adsorption (water). Evaporation of spent oils is performed by heating without pressure or using vacuum without pressure or using vacuum with heating the oil to a temperature of 70-80 °C. This method of restoring the properties of the oil, although it leads to positive results, but causes significant energy consumption.*

*The most promising method of waste waste treatment is hydrodynamic dispersion, which allows aging products to be modified instead of a complex coagulation process. In addition, water and fuel are removed from the oil during dispersion as a result of heating.*

*This method can be used in locomotive depots in the regeneration of motor (diesel) oils, which have defective parameters for certain indicators.*

*The most expedient is the use of hydrodynamic dispersant (HD) in volumetric hydraulic drives and internal combustion engines, which with relatively simple design and manufacturability does not cause destruction of oil hydrocarbon molecules, does not require preparation and adjustment before operation, its efficiency in pressure fluctuations decreases. GD is energy efficient, does not cause difficulties when built-in, its durability is higher than ultrasonic and cavitating dispersants.*

*But for the application of GD it is necessary to determine its parameters and regeneration temperature.*

*The article considers the reason for heating oil during its hydrodynamic dispersion, based on the probable assumption that heating is due to viscous (internal) friction of oil in the hydrodispersant and hydroelements that ensure its operation.*

*At the same time, we accept the assumption that the oil pressure before the GD and its flow rate in the hydroelements is constant. It was found that the temperature of the oil when dispersed is proportional to its dynamic viscosity, the square of the velocity of the oil and inversely proportional to the heat transfer coefficient and the radius of the tube, which agrees well with the proposed hypothesis that the cause of oil heating in hydrodynamic dispersion is viscous friction (equation 17), and the oil is heated from 70 ° C to 100 ° C depending on the pressure.*

*The results of experimental studies have shown that the optimal mode of treatment of watered oil with GD is a pressure of 0.5 MPa at the number of cycles  $N = 50$  and a temperature of 130-135 °C, which is much lower than the flash point of the oil.*

**Key words:** diesel oil, regeneration, dispersion, modification, heat transfer, pressure, viscous friction.

**Вступ.** Залізничний транспорт є однією з найбільш енергоємних галузей народного господарства країни. З загальної кількості використання дизельного палива на залізницю приходить більше 15 % (що складає 550 тисяч тон за рік), доля електроенергії близько 6 %, а витрати на оливу досягли 4 %. Збереження паливно-мастильних матеріалів на залізничному транспорті постає актуальним ще й тому, що ціна на ці матеріали постійно збільшується. Дослідні установки в депо Гребінка Південної залізниці та Волноваха Донецької залізниці застосовували випаровування води та палива з оливи та адсорбенти. Такі установки були енергоємними, а вартість регенованої оливи наблизилась до вартості свіжої. На жаль Укрзалізниця не застосовує регенерацію дизельних оливи, а застосовує тільки свіжу.

Аналіз стану тепловозів показує, що більша частина тепловозів експлуатується більш ніж 40 років, тобто 100 % тепловозів виробили нормативний термін експлуатації, що призвело до витрати оливи відносно витрати палива до 5,2 % при нормативі нового дизеля, наприклад 10Д100 або 5Д49, на рівні 1,4-1,5 %. Тому розробка нових технологій та устаткування для регенерації дизельних оливи, які не відпрацювали нормативний строк, а забраковані за окремими показниками (обводненість, розрідження і т. ін.) надасть можливість зменшити витрату оливи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз публікацій і патентів на винахід по очищенню (регенерації) моторних оливи показав, що даною проблемою займалися звісні вчені Крагельський І. В., Венцель С. В., Папок, Смедідо Е. Г., Лисіков Е. Н. та інші науково-дослідні організації, галузеві лабораторії

ХКСИ, ХарДАЗТ, інститут нафтопереробки «МАСМА» (м. Київ) та ін., [1, 2, 3, 4]. Досліджено різні методи діагностики та технології очищення моторних оливи: сернокислотна, ультразвукова, диспергування механічних домішок, поява електропровідності, дозоване введення присадок, сепараційне очищення [5, 6, 7, 8].

Значна кількість технологій очищення відпрацьованих оливи захищена патентами на винахід, надруковані монографії та посібники. Запропоновано та захищено патентами на винахід конструкції гідродинамічних диспергаторів. Наведені дані показують, що теоретичні розробки та практичні дослідження по очищенню та регенерації моторних оливи є в достатній кількості, але діючі установки відсутні, що викликає значні додаткові витрати на мастильні матеріали.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Мета проведення даних досліджень полягає в тому, щоб визначити параметри технології регенерації дизельної оливи, яка відбракована за окремими показниками, наприклад, гідродинамічним диспергуванням в умовах локомотивного депо. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: встановити причини та механізм нагрівання оливи в диспергаторі; визначити температурні межі нагрівання оливи при диспергуванні; встановити найбільш оптимальні режими диспергування з точки зору ефективності видалення води з оливи.

**Основна частина дослідження.** У процесі роботи тепловозних дизелів на холостому ходу, малих навантаженнях і перехідних режимах у картер попадає вода або її пара за нещільностями водяної системи та з вихлопними газами (при згорянні 1 кг палива виникає 1,2...1,4 г

води). При попаданні води в оливі утворюється емульсія, розривається оливна плівка у парах тертя (підшипник – колінчастий вал, кільце – гільза циліндра та ін.), з'являються згустки (шлам), які забивають оливопровідні труби, утворюючи тим самим зменшення подавання оливи до поверхонь тертя, збільшується знос і корозія деталей двигуна [9, 10, 14, 15].

Порушення оливного шару і виникнення граничного тертя призводить до підвищеного зносу підшипників з бабітовою заливкою вкладнів та інших деталей з кольорових металів та сплавів [17, 18]. Наявність парових пухирців у оливі приводить до кавітаційних пошкоджень (каверн), які підсилюються електрохімічною корозією. Відомо, що при наявності у оливі 5 % води знос вкладишів підшипників колінчастого вала протягом 12 год при повному навантаженні відповідає зносу за пробіг 100-110 тис. км [8]. Навіть короточасне знаходження крапель води у системі змащення призводить до їх взаємодії з активною частиною присадок і сприяє випаденню останніх в осад, викликаючи тим самим зміну ряду фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей оливи [14, 16].

Відкладення низькотемпературних осадів, мазеподібної липкої маси у трубопроводах оливної системи та теплообмінниках можуть призвести до часткового і повного припинення подачі оливи до підшипників колінчастих валів і поршнів, до інших вузлів тертя, а також до зниження охолоджувальної здатності водо-оливних радіаторних секцій холодильників тепловозів та теплообмінників.

Найбільш перспективним методом очистки відходів відпрацьованих олив є гідродинамічне диспергування, яке дозволяє продукти старіння модифікувати замість складного процесу коагуляції. Крім того, при диспергуванні в результаті нагріву із оливи виводяться вода та паливо [11].

Цей метод може бути застосовано у локомотивних депо при регенерації моторних (дизельних) олив, які мають бракувальні параметри за окремими показниками.

Найбільш доцільним є застосування в об'ємних гідроприводах і двигунах внутрішнього згоряння гідродинамічного диспергатора (ГД), який при порівняно простій конструкції і технологічності не викликає деструкції молекул вуглеводнів оливи, не вимагає підготовки і регулювання перед експлуатацією, ефективність його роботи при флуктуаціях тиску перед соплом не знижується. ГД енергетично економічний, не викликає труднощів при вбудовуванні, довговічність його вища, ніж ультразвукових і кавітуючих диспергаторів [12, 13].

Диспергування частинок забруднень в гідродинамічному диспергаторі [19] здійснюється за рахунок удару частинок об перешкоду при русі їх в потоці оливи.

На рис. 1 [20] подано принципову схему ГД та конструкцію експериментального зразка. Олива з водою та частинками під тиском надходить в конічне сопло 1, розганяється до великої швидкості і ударяється об перешкоду 2. В результаті удару частинки диспергуються, після чого олива через проріз 3 надходить в систему. Наявність ГД не виключає застосування традиційних оливоочисних пристроїв.

Відомо [21], що гідродинамічне диспергування оливи спричиняє поліпшення її експлуатаційних властивостей. Це обумовлено тим, що у процесі обробки оливи за допомогою гідродинамічного диспергатора (ГД) відбувається зменшення частинок забруднень до розмірів 5 мкм і менше. Крім того, при такій обробці відбувається локальний нагрів мікрооб'єму оливи, яке проходить крізь ГД, що призводить до його механо-хімічної модифікації [12] та видаленню води.

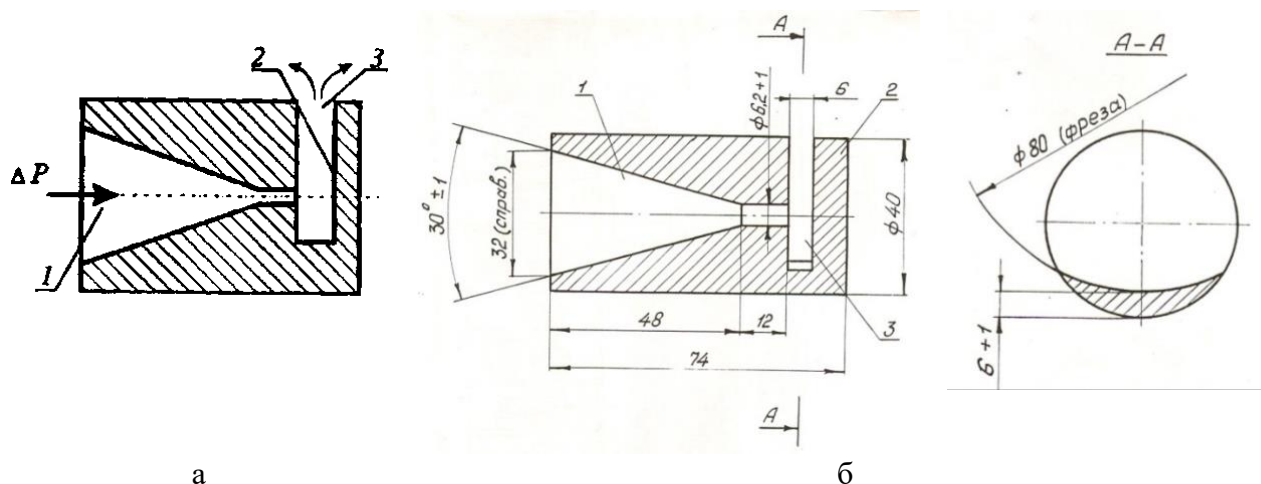


Рис. 1. Принципова схема та конструкція експериментального зразка ГД:  
а – принципова схема ГД, б – конструкція експериментального зразка;  
1 – сопло; 2 – перешкода; 3 – проріз

Розглянемо причину нагріву оливи при її гідродинамічному диспергуванні [22, 23]. Імовірно, що нагрів обумовлений в'язким (внутрішнім) тертям оливи у ГД та гідроелементах, що забезпечують його функціонування (насос, запобіжний клапан та ін.). Приймаючи таку гіпотезу, визначимо температуру оливи при сталому тепловому режимі гідродинамічного диспергування. При цьому припустимо, що тиск оливи перед ГД та швидкість її течії у гідроелементах постійні. Тоді можна вважати, що потужність, яку споживає насос, що живить ГД оливою, дорівнює потужності  $N$  в'язкого тертя, і визначається виразом:

$$N = \frac{\Delta P}{\rho} \cdot m, \quad (1)$$

де  $\Delta P$  – перепад тиску між початковою та кінцевою точками циліндричної трубки радіусом  $R$  і довжиною  $x$ ;

$\rho$  – щільність оливи;

$m$  – витрата оливи.

Зважаючи на те, що потужність в'язкого тертя дорівнює тепловій потужності  $Q$  і користуючись рівнянням Пуазейля, зобразимо (1) таким чином:

$$Q = \frac{4 \cdot \eta \cdot V_0 \cdot x}{\rho \cdot R^2} \cdot m, \quad (2)$$

де  $V_0$  – швидкість руху оливи на осі циліндричної трубки;

$\eta$  – динамічна в'язкість оливи.

Можна припустити, що середня швидкість  $V$  течії дорівнює половині  $V_0$ . У зв'язку з цим

$$Q = \frac{8 \cdot \eta \cdot V \cdot x}{\rho \cdot R^2} \cdot m. \quad (3)$$

Складемо рівняння теплопровідності для оливи, що протікає крізь циліндричну теплоізовану трубку:

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{S} \cdot F(x, t), \quad (4)$$

де  $\chi$  – теплопровідність оливи;

$c$  – питома теплоємність оливи;

$T$  – температура оливи;

$F(x, t)$  – щільність теплових джерел.

Вона може бути визначена співвідношенням:

$$F(x, t) = \frac{\delta Q}{dx}. \quad (5)$$

Будемо вважати, що випромінювання тепла відбувається тільки через бокову поверхню трубки, а торцеві перетини на виході із неї практично тепло не випромінюють. Тоді, згідно із законом Ньютона-Ріхмана, щільність  $j_q$  випромінюваного потоку дорівнює

$$j_q = \alpha(T - T'), \quad (6)$$

де  $T'$  – температура навколишнього середовища;

$\alpha$  – коефіцієнт теплообміну.

Кількість тепла, розсіяного ділянкою бокової поверхні  $\Delta S = 2\pi R \Delta x$  за час  $\Delta t$ , дорівнює

$$\delta Q = \alpha \cdot (T - T') \cdot 2\pi \cdot R \cdot \Delta x \cdot \Delta t. \quad (7)$$

Із (7) витікає

$$\frac{\delta Q}{\Delta x \cdot \Delta t} = \frac{dQ}{dx} = \alpha(T - T') \cdot 2\pi \cdot R. \quad (8)$$

Величину  $\frac{dQ}{dx}$  можна розглядати як негативну щільність теплових джерел, а саме:

$$F_1 = -\left(\frac{\delta Q}{dx}\right)_1 = -2\pi \cdot \alpha \cdot R \cdot (T - T'). \quad (9)$$

Щільність  $F(x, t)$  джерел, що генерують тепло, можна знайти, підставивши в рівняння (5) похідну від теплової потужності по координаті, знайдену із рівняння (3)

$$F(x, t) = \frac{\delta Q}{dx} = \frac{8 \cdot \eta \cdot v}{\rho \cdot R^2} \cdot m. \quad (10)$$

Підставивши знайдене значення  $F$ , яке не залежить від  $x$  і  $t$ , в рівняння (4) для теплопровідності, та алгебраїчно додаючи до неї негативну щільність  $F_1$  теплових джерел, яка враховує втрати на теплообмін з навколишнім середовищем, відповідно до рівняння (9) знайдемо

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \chi \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{S} \left[ \frac{8\eta v}{\rho R^2} \cdot m - 2\pi \cdot \alpha \cdot R(T - T') \right]. \quad (11)$$

Підставивши в (11)  $S = \pi R^2$  та поділивши це рівняння на  $c \cdot \rho$ , одержимо

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - b^2(T - T') + g, \quad (12)$$

де

$$\left. \begin{aligned} a^2 &= \frac{\chi}{c\rho}; \\ b^2 &= \frac{2\alpha}{c\rho R}; \\ g &= \frac{8\eta v^2}{c\rho R^2} \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

Сформулюємо початкові та граничні умови.

У початковий момент усі точки трубки мають температуру навколишнього середовища а саме:

$$T_{(0,l)} = T'. \quad (14)$$

Граничні умови, які відбивають теплову квазіізоляцію торців трубки на вхіді та виході, мають вигляд

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0; \quad (15)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=l} = 0, \quad (16)$$

Використавши початкові та граничні умови та розв'язавши після відповідних перетворень диференціальне рівняння, одержимо остаточний вираз для температури, яку буде мати олива за рахунок в'язкого тертя при сталому тепловому режимі гідродинамічного диспергування

$$T = \frac{4v^2}{\alpha R} \eta_0 \cdot l^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} + T', \quad (17)$$

де  $l$  – довжина циліндричної трубки;

$\eta_0$  – динамічна в'язкість оливи при  $0^\circ\text{C}$ ;  $T_0=273^\circ\text{K}$ ;

$\beta$  – коефіцієнт, залежний від в'язкості оливи.

Із рівняння (17) видно, що температура  $T$  оливи пропорційна її динамічній в'язкості, квадрату швидкості руху течії оливи і обернено пропорційна коефіцієнту теплообміну  $\alpha$  та радіусу трубки. Це добре узгоджується із запропонованою гіпотезою про те, що причиною нагріву оливи при гідродинамічному диспергуванні є в'язке тертя.

Оскільки рівняння (17) не може бути розв'язане аналітично, його розв'язання було знайдено графічним шляхом. У результаті цього було визначено показники температури оливи залежно від її тиску  $P$  перед ГД. Обробивши ці дані на ПЕОМ за допомогою Microsoft Graph 5, було знайдено із достовірністю 0,9998 таке рівняння:

$$t_{теор} = -64,186 p^2 + 137,29 p + 64,514. \quad (18)$$

Графік залежності температури оливи від її тиску перед ГД побудовано згідно з рівнянням (18) і наведено на рис. 2 (крива 1). Як видно з рис. 2, згідно з розрахунками за рівняннями (17) та (18) при сталому режимі

гідродинамічного диспергування олива розігрівається до значної температури залежно від тиску перед ГД від  $70^\circ\text{C}$  до  $100^\circ\text{C}$ .

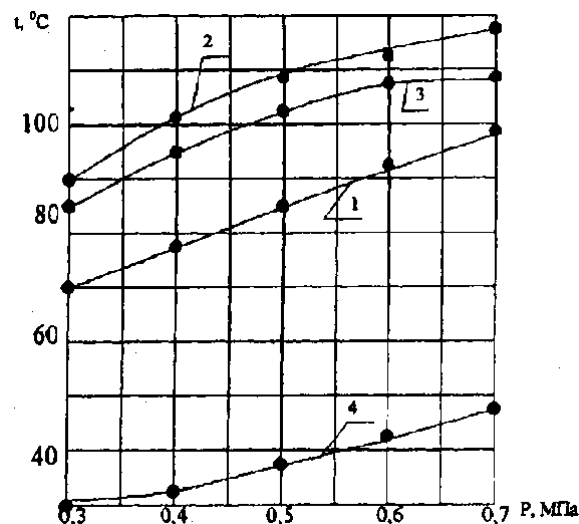


Рис. 2. Змінення температури оливи залежно від її тиску перед ГД:

1 – вираховано згідно з рівнянням (18); 2 – у зоні перепони ГД;

3 – у соплі ГД; 4 – у зливному трубопроводі

Запропоновані теоретичні положення відносно причин нагріву оливи було перевірено експериментальним шляхом. Для цього було здійснено дослідження температури оливи М-14-В<sub>2</sub> у зоні удару її об перепону ГД у соплі ГД без перепони і у зливному трубопроводі (при відсутності ГД) спеціального лабораторного стенда, який дає змогу здійснювати гідродинамічне диспергування оливи при різних тисках її перед ГД [12, 13].

Вимірювання температури виконувалось за допомогою мідь-константанової термопари, підключеної до потенціометра ПП-64.

Результати експериментальних досліджень показали, що у початковий період спостерігається інтенсивне зростання температури оливи, після чого настає сталий тепловий режим гідродинамічного диспергування. При цьому найбільшу температуру олива має у зоні удару її об перепону ГД при усіх значеннях тиску (крива 2 на рис. 2):

наприклад, при  $P = 0,3$  МПа,  $t_m = 90$  °С, а при  $P = 0,5$  МПа,  $t_m = 108$  °С [7].

Якщо із ГД прибрати перепону, то температура оливи у соплі дещо нижча, ніж у зоні удару (крива 3), а значення температури оливи у зливному трубопроводі без ГД найнижчі: залежно від тиску у гідросистемі стенда вона коливається від 30 °С до 47 °С (крива 4), пробна обробка оливи при високому тиску перед ГД призводить до відновлення кінематичної в'язкості і температури спалаху практично до рівня свіжої оливи, проте при різній кількості циклів обробки. Для забезпечення ефективного диспергування частинок забруднень, механіко-хімічної активації оливи, а також видалення з них води слід вважати, що оптимальним режимом обробки оливи за допомогою ГД є тиск 0,5 МПа при числі циклів  $N = 50$  та температури на рівні 130-135 °С, що значно нижче температури спалаху оливи (рис. 3) [21].

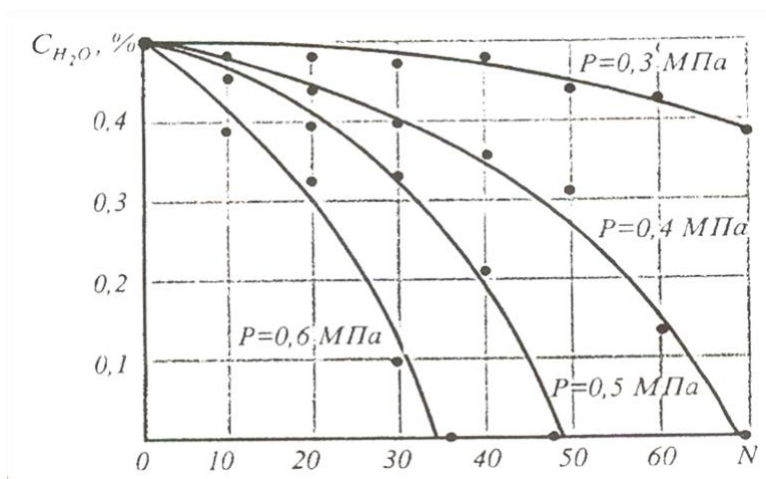


Рис. 3. Зміна змісту води ( $C_{H_2O}$ ) в свіжій обводненій оливі М-14-В<sub>2</sub>, залежно від числа циклів диспергування

Результати досліджень показали, що після п'ятдесятикратного диспергування при  $p=0,5$  МПа в оливі повністю відсутня вода, лужність її збільшилася в 1,22 раза, кінематична в'язкість в 1,1 раза, а кислотне число зменшилося в 1,2 раза.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що головною причиною нагріву оливи є її в'язке тертя у соплі ГД, що підтверджується не тільки результатами експериментальних даних, але і цілком задовільною кореляцією їх з теоретичними

розрахунками згідно з рівнянням (18). При цьому середня помилка дорівнює близько 25 %.

Наведені результати досліджень підтверджують справедливості прийнятої початкової гіпотези відносно причин нагріву оливи при її гідродинамічному диспергуванні і дозволяють використовувати даний ефект, наприклад для регенерації обводнених та розріджених олив.

**Висновки.** Виходячи із прийнятої гіпотези, що нагрів обумовлений в'язким (внутрішнім) тертям оливи у гідродинамічному диспергаторі (ГД) було визначено температуру оливи при сталому тепловому режимі гідродинамічного диспергування. При цьому тиск оливи перед ГД та швидкість її течії в гідроелементах постійні. Було встановлено, що за рахунок в'язкого тертя, при сталому тепловому режимі гідродинамічного диспергування, температура оливи пропорційна її динамічній в'язкості, квадрату швидкості руху течії оливи та обернено пропорційна коефіцієнту теплообміну та радіусу трубки (див. рівняння (17)), що підтверджує причину нагріву оливи при

гідродинамічному диспергуванні – є в'язке тертя.

Розрахунки за рівняннями (17) та (18) показали, що при сталому режимі гідродинамічного диспергування олива нагрівається від 70 °С до 100 °С залежно від тиску. Це підтверджується експериментальними дослідженнями, а найбільшу температуру олива має у зоні удару її об перепону ГД при всіх значеннях тиску.

Для забезпечення ефективного диспергування частинок забруднень, механіко-хімічної активації оливи, а також видалення з неї води та палива оптимальним режимом обробки оливи за допомогою ГД є тиск 0,5 МПа при числі циклов  $N=50$  та температура 130-135 °С, що нижче температури спалаху оливи [21, 23]. Отримані дані дозволяють спроектувати та виготовити установки для диспергування оливи, відбракованій за окремими показниками, в умовах локомотивного депо (або центрі залізниці).

Подальші дослідження доцільно виконувати у напрямку створення мобільної (бортової) установки диспергування оливи безпосередньо в оливній системі дизеля, що значно зменшить витрати оливи при експлуатації тепловозів.

### Список використаних джерел

1. Крагельский И. В. Новые аспекты науки о трении. *Физико-химическая механика контактного взаимодействия и фреттинг-коррозия*: тр. всесоюзной конф. Киев: КИИГА, 1973.
2. Венцель С. В. Смазка и долговечность двигателей внутреннего сгорания. Киев: Техника, 1977. 208 с.
3. Розробити рекомендації і організувати регенерацію масел з низькою температурою застигання: звіт про науково-дослідну роботу інституту нафтопереробки "МАСМА". Д.Р. № ИА 010123621 / М. А. Альтшулер, М. М. Дец, С. И. Горбенко и др. Київ, 1993.
4. Розробка технологічних процесів оснастки для регенерації дизельних мастил в умовах депо: звіт про науково-дослідну роботу. ГР01930014274. Харків: ХарДАЗТ, 1994. 144 с.
5. Асеев Н. В. Повышение износостойкости тепловозных и других, двигателей внутреннего сгорания путем ультразвуковой обработки в смазочного масла: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Харьков : 1969. 21 с.
6. Улучшение эксплуатационных свойств масел для гидравлических приводов путем диспергирования механических примесей / Г. А. Аврунин, Е. С. Венцель, Г. Р. Ливада, В. А. Рокшевский. *Трение и износ*. 1983. № 1. С. 155–159.

7. AndrzejKraśiński, ŁukaszSołtana, JoannaKacprzyńska-Gołąckab. Effect of fiber surface modifications on the coalescence performance of polybutylene terephthalate filter media applied for the water removal from the diesel fuel Separation and Purification Technology. Vol. 236. 1 April 2020, 116254. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116254>.
8. Беленький А. Д., Иванов Г. Н., Ремпель А. И. Экономия моторных масел на тепловозах. Москва: Транспорт, 1984. 88 с.
9. Березняков А. И., Венцель Е. С., Бабенко А. А. Уравнение интенсивности изнашивания узла трения, учитывающее взаимодействие частиц износа с поверхностью. *Трение и износ*. 1998. № 5. С. 579–584.
10. Венцель Е. С. Повышение износостойкости трибосопряжений гидродинамическим диспергированием масла: дис. ... д-ра техн. наук. Киев: 1990. 397 с.
11. Венцель Е. С. Механизм улучшения противоизносных свойств масел при гидродинамическом диспергировании. *Трение и износ*. 1992. № 5. С. 905–910.
12. Березняков А. И., Венцель Е. С., Бабенко А. А. Уравнение интенсивности изнашивания узла трения, учитывающее взаимодействие частиц износа с поверхностью. *Трение и износ*. 1998. № 5. С. 579–584.
13. Руднев В. К., Лысков Е. Н., Венцель Е. С. Повышение эксплуатационной надежности гидроприводов строительных и дорожных машин: учеб. пособ. Киев: УМК ВО, 1989. 136 с.
14. Method and means for maintaining an effective concentration of additives in oils: пат. 3336223 США: С1. 252 – 9/Paul D/ Rneeland (США).
15. Addition of oxidation inhibitor to lubricating oil: пат. 374924 США: МКИ В 01 d 27/00 Raymond Rohde (США).
16. Руднев В. К., Венцель Е. С., Лысков Е. Н. Эксплуатационные материалы для строительных и дорожных машин: учеб. пособ. Киев: ИСИО, 1993. 236 с.
17. Fuels and lubricants containing inclusion compjunds: пат. 3314884 США: С1. 252-10 / Richard E. Cover (США).
18. Bearing material employing frangible microcapsules containing lubricant: пат. 4056478 США: МКИ<sup>2</sup> С 10 М 5/00; С 10 М 7/00; F 16 С 27/00 / Alfred I. Capelli (США).
19. Гидродинамический диспергатор: а. с. 1114455 СССР, МКИ<sup>3</sup> В01В 11/02 / Е. С. Венцель, Г. Ф. Ливада, В. А. Рокшевский и др. 5 с.
20. Гидродинамический диспергатор: а. с. 1560293 СССР, МКИ<sup>4</sup> В 01 F 11/02 / В. К. Руднев, Е. С. Венцель, И. Г. Панев и др. 3 с.
21. Венцель Є. С., Жалкін С. Г., Данько М. І. Поліпшення якості та підвищення термінів служби нафтових олій. Харків: УкрДАЗТ, 2003. 168 с.
22. Венцель С. В., Миронов Е. А. Застосування положень термодинаміки нерівноважних процесів у хімотології та триботехніці. *Хімія та технологія палив та масел*. 1982. № 2. С. 16-18.
23. Жалкін С. Г., Корепанов С. Ю. Про причини локального нагріву мастила при його гідродинамічному диспергуванні. *Зб. наук. праць*. Харків: ХарДАЗТ, 2000. Вип. 42. С. 40–43.

---

Жалкін Денис Сергійович, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-3450-160X Тел.: +38 (093) 911-10-40 E-mail: abdddennis@gmail.com

Жалкін Сергій Григорович, кандидат технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-0089-3489 Тел.: +38 (093) 275-51-66 E-mail: zhalkinsg@gmail.com

Залата Андрій Сергійович, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0003-0557-795X. Тел.: +38 (097) 710-69-81. E-mail: zalata.ac@gmail.com

---

Вініченко Валентин Едуардович, другий (магістерський) рівень навчання, група 221-ЛЛГ-Д20 Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (067) 839-44-20.

Скрипченко Сергій Валерійович, другий (магістерський) рівень навчання, група 211-ЛЛГ-321 Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (095) 536-51-02.

Zhalkin Denis, Dr. Sc. (Tech.). Associate Professor, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-3450-160X. Tel. +38 (093) 911-10-40 E-mail: abdddenis@gmail.com

Zhalkin Sergij, PhD (Tech). Associate Professor, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-0089-3489. Tel. +38 (093) 275-51-66 E-mail: zhalkinsg@gmail.com

Zalata Andrii, postgraduate student, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0003-0557-795X.

Tel.: +38 (097) 710-69-81. E-mail: zalata.ac@gmail.com

Vinichenko Valentin, undergraduate, master, Group 221-ЛЛГ-Д20 department of construction machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0000-0000-0000. Тел.: +38 (067) 839-44-20.

Skripchenko Sergij, undergraduat, master, Group 211-ЛЛГ-321 department of construction machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0000-0000-0000. Тел.: +38 (095) 536-51-02.

Статтю прийнято 14.03.2022 р.

## ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

---

УДК 656.025.2

### ЕВОЛЮЦІЯ ТРАНСПОРТУ ТА СУЧАСНА ПРОБЛЕМА УКРАЇНСЬКОЇ ЗАЛІЗНИЦІ

Д-р техн. наук С. В. Панченко, канд. екон. наук Є. І. Балака,  
кандидати техн. наук В. В. Панченко, М. Є. Резуненко

### TRANSPORT EVOLUTION AND MODERN CHALLENGES OF UKRAINIAN RAILWAY

Dr. Sc. (Tech.) S. Panchenko, Cand. of Economical Sc. Ye. Balaka,  
Cand. of Technical Sc. V. Panchenko, M. Rezunenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.199.2022.258816>



**Анотація.** У статті розглянуто закономірності розвитку транспортної системи і, зокрема, залізничного вантажного транспорту під дією загальних законів діалектики. Визначено, що існуючий стан залізниці вимагає негайного вирішення техніко-технологічних задач модернізації рухомого складу залізниці. Проведено кореляційно-регресійний аналіз впливу наявності магістральних локомотивів та вантажних вагонів на обсяг перевезення вантажів. Встановлено, що рівень впливу парку магістральних локомотивів на забезпечення безперебійного перевезення майже в два рази вищий за вплив експлуатаційного парку вагонів. Зроблено висновок, що пріоритетним завданням сьогодення є впровадження інноваційних заходів, які дають змогу подовжити експлуатаційні можливості діючого локомотивного парку.

**Ключові слова:** закони розвитку, транспорт, залізниця, рухомий склад, вантажні перевезення.

**Abstract.** The article deals with the patterns of the transport system development and, in particular, rail freight transport under the influence of the general laws of dialectics. There has been conducted a comparative analysis of the performance of rail and road transport, in particular freight traffic, freight turnover and the average distance of transportation. The volumes of freight transportation by Ukrainian railways and the availability of rolling stock have been analyzed. The main identified quality indicators of the economic-mathematical model and regularities between quantitative changes in the system of social division of labour led to quantitative changes in the transport sector, which serves the manufacturing sector. It has been determined that the current state of the railway and further maintenance of its competitiveness even taking into account the existing volume of transport services requires immediate solution of technical and technological as well as organizational issues regarding modernization of rolling stock, improvement of railway infrastructure and management system. The analysis of foreign and domestic experience of transport activity testified to the narrowing of railway transportation segment, with the railways dealing mostly with the transportation of bulk cargo. There has been conducted a correlation-regression analysis of the impact of the main locomotives and freight cars on the volume of freight traffic. It has been defined that the level of influence of the main locomotives fleet on the provision of uninterrupted transportation is almost twice as high as the influence of the operational fleet of cars. It has been found out that the most important issue is to further ensure the functionality of available means of transport. It has been concluded that the priority task today is the introduction of innovations that

*can extend the operational capacity of the available locomotive fleet through the introduction of modern technologies.*

**Key words:** *development laws, transport, railways, rolling stock, freight service.*

**Вступ.** Основною складовою стратегії розвитку суб'єктів господарського права усіх видів у сфері реальної економіки країни є формування технічної політики, яка окреслює основні напрями інноваційно-інвестиційної діяльності на довгостроковий період, уточнюється комплексом середнь-острокових завдань тактичного характеру та конкретизується детально спланованими оперативними задачами поточного і найближчого часів. Ефективна реалізація таких ієрархічно побудованих рішень можлива лише за умови їхньої відповідності загальним законам розвитку (законам діалектики) і закономірностям, що впливають з них як форми прояву загальних законів в окремому середовищі чи окремій системі господарської діяльності. Повною мірою це стосується як транспортної системи в цілому, так і залізничної галузі зокрема. Такий дедуктивний підхід дає змогу зробити логічний висновок щодо пріоритетності інноваційних заходів, спрямованих на поліпшення функціональних можливостей залізниці, і обґрунтувати їх.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Конкурентна боротьба на ринку перевезень обумовила чисельні дослідження організаційно-технічного та економічного характеру щодо подальшого розвитку залізничної галузі. Питання закономірностей розвитку транспортної системи розглядалися в роботах [1, 2]. Авторами цих досліджень показано, як під дією загальних законів діалектики еволюціонувала транспортна система в процесі розвитку суспільно-економічних відносин. У роботі [3] запропоновано шляхи підвищення ступеня обґрунтованості управлінських рішень щодо використання рухомого складу. Питання підвищення ефективності роботи локомотивів розглянуто в роботі [4], доцільність

диверсифікації залізничного транспорту та створення нових транспортних систем обґрунтовано в роботі [5]. У роботі [6] виокремлено основні питання використання вантажних вагонів різної форми власності та розроблено організаційно-технологічну модель управління парком вантажних вагонів з урахуванням пріоритетного обслуговування вантажовідправників і вантажоодержувачів. Світові тенденції залізничних вантажних перевезень досліджено в роботі [7].

Проте наукове передбачення подальшого розвитку залізничного транспорту та виявлення пріоритетних напрямків цього процесу потребує більш поглибленого розгляду закономірностей формування ринку перевезень та змін, що відбувались протягом його функціонування, тобто встановлення взаємозв'язків явищ, що мають місце, і впливу елементів транспортної системи на ці явища. Такий підхід створює підґрунтя для об'єктивного оцінювання процесів і тенденцій, які зумовлюють майбутній розвиток ринку транспортних послуг, місце і значення на ньому окремих його елементів, перш за все – залізничного транспорту. Більш чітке розуміння закономірностей дає можливість їхнього практичного використання в системі транспортного обслуговування та стає необхідною умовою прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою статті є оприлюднення результатів поглибленого дослідження дії загальних законів розвитку на еволюцію транспортної системи і на цій основі визначення актуальних задач з модернізації локомотивів експлуатаційного парку і обґрунтування необхідності невідкладного їх вирішення. Це дасть змогу вирішити завдання з подовження «життєвого циклу» локомотивів і

збільшення обсягів перевезень вантажів у сучасних умовах. Дослідження здійснювалось із застосуванням методів наукової дедукції, кореляційно-регресійного та економічного аналізів.

#### **Основна частина дослідження.**

Відомо, що становлення будь-якого окремого виду трудової діяльності, в тому числі і транспортного обслуговування, як інфраструктурної складової економічної системи в цілому, зумовлено суспільним розподілом праці і, перш за все, виділенням в окремі галузі промисловості та сільського господарства. Причинно-наслідковий зв'язок цього процесу проявився у виникненні ринку товарів і послуг, що надало поштовх розвитку товарно-грошових відносин. На цьому етапі процес перевезення товарів і людей здійснювався виключно гужовим транспортом на невеликі відстані і в незначних обсягах. Подальший розвиток цих галузей потребував кількісного збільшення обсягів вантажних перевезень, що обумовило виникнення якісно нової транспортної системи, основою якої став залізничний транспорт. Принциповими техніко-технологічними відмінностями залізниці від гужового транспорту було: застосування єдиного силового тягового засобу (локомотива) для швидкого одночасного переміщення великої сукупності окремих завантажених транспортних одиниць (вагонів); незалежність транспортного процесу від погодних умов. Це дозволило здійснювати перевезення великих мас вантажів в значно коротші терміни. Тобто, збільшення кількісних явищ і, передусім, потреб базових галузей економіки в транспортних послугах призвело до якісних змін в діючій на той час транспортній системі.

Проте потреби виробництва обмежувались можливостями залізниці здійснювати перевезення лише між окремими станціями і унеможливлювали доставку вантажів безпосередньо від виробника до споживача без використання

гужового транспорту. Це, в свою чергу, обумовило швидкий розвиток автомобільного транспорту та постійне його вдосконалення перш за все в напрямі створення спеціалізованих та великовантажних транспортних засобів, а також якісної дорожньої інфраструктури.

Стрімке будівництво мережі автомобільних доріг в економічно розвинутих країнах, насамперед швидкісних автомагістралей, дало змогу суттєво розширити функціональні можливості автомобільного транспорту. У другий половині ХХ сторіччя він перетворився з допоміжного транспортного засобу місцевого значення, що переважно забезпечував перевезення вантажів між залізничною станцією і підприємством, в потужного самостійного гравця на транспортному ринку. Вантажопідйомність сучасного автомобільного тривісного напівпричепа досягає 70 т, а обсяг кузова наближається до 100 м<sup>3</sup>, що перевищує технічні характеристики вантажного вагона. Про сталу тенденцію зростання конкурентоспроможності автомобільного транспорту свідчать порівняльні показники його роботи з залізницею, наведені в табл. 1 [8].

Як бачимо, середньорічний обсяг перевезення вантажів автомобілями за цей період в 3,21 раза більший за обсяг залізничних перевезень, проте залізниця поки що випереджає в 3,26 раза за обсягом вантажообігу (середня відстань залізничних перевезень більша за автомобільні понад 10,7 раза).

При цьому слід зазначити, що географічне положення України і площа її території, щільність розташування населених пунктів і структура економіки країни, а також активне відновлення та розбудова автомобільних доріг в Україні відповідно з Державною програмою «Велике будівництво» в подальшому створить сприятливі умови для постійного зростання дальніх автомобільних перевезень.

Таблиця 1

## Показники роботи залізничного та автомобільного транспорту

| Рік  | Залізничний транспорт       |                        |                      | Автомобільний транспорт     |                        |                      |
|------|-----------------------------|------------------------|----------------------|-----------------------------|------------------------|----------------------|
|      | Перевезення вантажів, млн т | Вантажообіг, млрд т*км | Середня відстань, км | Перевезення вантажів, млн т | Вантажообіг, млрд т*км | Середня відстань, км |
| 2014 | 386                         | 211,2                  | 547                  | 1131                        | 56,0                   | 50                   |
| 2015 | 350                         | 195,1                  | 557                  | 1021                        | 53,3                   | 49                   |
| 2016 | 343                         | 187,6                  | 545                  | 1086                        | 58,0                   | 53                   |
| 2017 | 339                         | 191,9                  | 566                  | 1022                        | 62,3                   | 56                   |
| 2018 | 322                         | 186,3                  | 561                  | 1206                        | 71,7                   | 59                   |
| 2019 | 313                         | 181,8                  | 581                  | 1147                        | 64,2                   | 56                   |
| 2020 | 306                         | 175,5                  | 573                  | 956                         | 42,2                   | 44                   |

Середні відстані таких перевезень наближатимуться до залізничних і неминучість цього процесу закономірна. Такий тренд розвитку ринку перевезень звужує можливості транспортного обслуговування залізницею, які обмежаться здебільшого перевезенням масових вантажів. Останніми роками середньорічний темп зменшення обсягів перевезення вантажів залізницею складав 0,96, а вантажообіг щорічно скорочувався на 3 %. У той же час середньорічний темп автоперевезення вантажів складав 1,003, а вантажообіг щорічно збільшувався на 2,8 %. В майбутньому цей процес набиратиме більш швидких темпів, про що переконливо свідчить закордонний досвід [7].

Отже, кількісні зміни в системі суспільного розподілу праці призвели до кількісних змін у транспортній галузі, яка обслуговує виробничу сферу, що, у свою чергу, стало причиною якісних змін на ринку транспортних послуг. Ця закономірність має об'єктивний характер і є проявом першого закону діалектики – переходу кількісних змін у якісні в транспортній системі.

Основою існування будь-якої системи є постійне знаходження компромісних рішень між суперечливими (протилежними) елементами, які її утворюють. Наявність протилежностей, що проявляється у вигляді суперечностей в різних формах, є запорукою існування цілісності будь-якої

системи і її розвитку, в тому числі і транспортної галузі.

Суперечності між попитом виробництва та можливостями гужового транспорту щодо перевезень дали поштовх розвитку залізниці, яка стала протилежністю гужовому транспорту та надала йому суто допоміжні функції. Їхнє існування в межах однієї транспортної системи в подальшому не забезпечувало потреби виробничої сфери, тобто обумовило протиріччя між цими двома системами, які входять до складу системи вищого порядку – економіки країни. Це дало поштовх розвитку автомобільного транспорту, який спочатку виконував допоміжні функції відносно залізничного. Проте з моменту свого виникнення автомобільний транспорт стає протилежністю залізничному, і їхнє співіснування в умовах компромісів, які постійно змінюються, забезпечує існування та розвиток транспортної системи в цілому. В подальшому розвиток автомобільного транспорту, що знаходиться в постійному протиріччі з залізничним, обумовлює розвиток саме залізниці як свого конкурента (контрейлерні перевезення, маршрутні поїзди тощо) і таке співіснування протиріч між елементами транспортної системи є запорукою їхнього сумісного функціонування.

Компромісне розв'язання протиріч між елементами транспортної системи призводить до виникнення її нового якісного стану, оптимізує систему. Постійна

боротьба внутрішніх протиріч в транспортній системі та їхнє рішення є рушійною силою подальшого розвитку всієї транспортної системи у повній відповідності з дією другого закону діалектики – єдності і боротьби протилежностей.

Як було показано, під дією двох вищезначених законів діалектики транспортна система піднімається на більш високий ступінь розвитку і набуває нового якісного стану.

Виникнення залізничного транспорту зупинило монополію гужових перевезень, проте транспортна система успадкувала кращі можливості цього транспорту, який в співіснуванні зі своєю протилежністю – залізницею, оперативно забезпечував локальні перевезення невеликих обсягів вантажу. В свою чергу, виникнення і подальший розвиток автомобільного транспорту заперечили використання гужового, перейнявши на себе його функції. У наш час автомобільний транспорт виступає як відносно заперечення залізниці, конкуруючи з нею в транспортному обслуговуванні не тільки малих і середніх, а, в окремих випадках, і великих матеріальних потоків (перевезення зерна, контейнерів тощо). Проте залізниця зберегла і перенесла в сучасну транспортну систему свої найкращі позитивні якості: можливість перевезення масових вантажів, мінімальний вплив погодних умов на процес транспортування тощо. Таким чином, заперечення є умовою розвитку будь-якої системи, зокрема транспортної системи, і залізниці як одного з її елементів.

Запереченням старої системи не закінчується процес розвитку, оскільки в якісно новій системі виникають свої внутрішні протиріччя (заперечення) між її елементами, а постійне знаходження консенсусних умов їхнього вирішення є рушійною силою майбутнього оновлення системи. Проте консенсус повністю не виключає боротьбу між елементами системи, оскільки зберігається конфлікт інтересів, який створює умови для

виникнення нових протиріч. Необхідно зазначити, що протиріччя між елементами системи мають причинно-наслідковий зв'язок і виникають разом з виникненням причини, але вони можуть відчуватись в тій, чи іншій формі значно пізніше, тобто може існувати проміжок часу між виникненням причини і відчуттям її наслідків у вигляді протиріч (взаємних заперечень). Так, протиріччя (взаємне заперечення) між залізницею і автомобільним транспортом виникло з появою першого автомобіля, а відчуття цих протиріч з'явилося тільки при значному збільшенні кількості автотранспорту і зростанні його функціональних можливостей. Цей процес відбувається відповідно з третім об'єктивним законом діалектики, тобто законом «заперечення заперечення» і є віддзеркаленням його дії в ході розвитку транспортної галузі.

Закордонний та вітчизняний досвід транспортної діяльності свідчить про звуження сегменту залізничних перевезень, залишаючи залізниці транспортування масових вантажів (вугілля, руда, зерно тощо), а автомобільний транспорт в умовах європейських країн набуває домінуючого значення [9]. Слід зазначити, що світові тенденції зменшення видобування вугілля та перехід на оновлювані джерела енергії (зелена енергетика) безпосередньо торкнуться і національної економіки. Це призведе до зменшення обсягів залізничних вантажних перевезень (в наш час частка вугілля та коксу складає понад 17 % в загальному обсязі перевезення вантажів залізницею) [9]. При цьому можна очікувати, що саме перевезення масових вантажів стане запорукою подальшої життєдіяльності залізничної галузі. Проте теперішній стан залізниці та подальше утримання її конкурентоспроможності навіть в існуючому обсязі транспортних послуг вимагає негайного вирішення техніко-технологічних та організаційних задач щодо модернізації рухомого складу, удосконалення інфраструктури залізниці та системи управління нею.

Відповідно до законів діалектики якісне оновлення транспортної системи в цілому і залізничної галузі зокрема передбачає успадкування позитивних якісних властивостей старої системи новою. Виходячи з цього, умовою конкурентоспроможності залізниці є набуття нею властивостей, що притаманні автомобільному транспорту (а стрімкий розвиток великовантажних автоперевезень свідчить про набуття ним властивостей залізничного транспорту). Стратегічною метою такого оновлення є можливість доставляти середні і невеликі обсяги вантажів в стислі терміни за принципом «від дверей до дверей». Не викликають сумніву пропозиції [5], що для цього АО «Укрзалізниця» має розширювати коло своєї діяльності в напрямі комплексного задоволення потреб клієнтів, перетворюючись з вузькоспеціалізованого рейкового суб'єкта перевезень в багатофункціональну транспортно-логістичну компанію, що здатна використовувати різні види транспорту, а саме: мати власний парк великовантажних автомобілів, впроваджувати гібридний транспорт на базі вантажних тролейбусів, вантажних електропоїздів, здатних перевозити невеликі вантажі з пасажирською швидкістю і можливістю виходу на під'їзні колії завдяки акумуляторним джерелам енергії тощо. Такий концептуальний принцип

багатофункціональності доцільно використовувати і в сфері пасажирських перевезень.

Зрозуміло, що вирішення таких завдань потребує значних інвестиційних витрат протягом тривалого часу. Проте стабільне функціонування виробничої сфери країни і, насамперед, її базових галузей в умовах існування фінансових складнощів в Україні в теперішній період можливе лише за наявності безперебійного залізничного обслуговування на основі раціонального використання існуючого парку рухомого складу, насамперед локомотивів. Пріоритетна роль локомотивів в існуючих умовах технічного переозброєння рухомого складу залізниці підтверджується висновками про їхню ключову значущість у процесі перевезення вантажів. Про обґрунтованість таких висновків свідчать отримані результати аналізу побудови множинної кореляційно-регресійної моделі, яка визначає залежність обсягів вантажних залізничних перевезень від кількості магістральних локомотивів та вантажних вагонів експлуатаційного парку. В табл. 2 наведено статистичні дані цих показників за десять попередніх років [8, 9], які покладено в основу побудови означеної математичної моделі (з урахуванням роботи залізниці в 2011 – 2014 р. на всій території Донецької, Луганської областей та АР Крим).

Таблиця 2

Обсяги перевезення вантажів залізницею України та наявність експлуатаційного парку рухомого складу

| Показник                                                        | Рік    |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                                                 | 2011   | 2012   | 2013   | 2014   | 2015   | 2016   | 2017   | 2018   | 2019   | 2020   |
| Обсяг вантажних перевезень, млн т                               | 469    | 457    | 444    | 386    | 350    | 343    | 339    | 322    | 313    | 306    |
| Кількість магістральних локомотивів експлуатаційного парку, од. | 817    | 776    | 703    | 641    | 619    | 596    | 589    | 659    | 680    | 688    |
| Кількість вантажних вагонів експлуатаційного парку, од.         | 119265 | 120814 | 144641 | 145029 | 143313 | 140964 | 135792 | 142547 | 128303 | 110267 |

Двофакторна регресійна модель  $y = a + b_1x_1 + b_2x_2$ , що описує залежність обсягів вантажних залізничних перевезень

від кількості магістральних локомотивів та вантажних вагонів експлуатаційного парку, має вигляд

$$y_{o.l.} = -618,474 + 0,9031x_{л.} + 0,00286x_{в.}, \quad (1)$$

де  $y_{o.l.}$  – обсяг вантажних залізничних перевезень;

$x_{л.}$  – кількість магістральних локомотивів;

$x_{в.}$  – кількість вантажних вагонів експлуатаційного парку.

Якісні властивості моделі характеризуються ознаками, що наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Основні показники якості економіко-математичної моделі

| Показник                                    | Значення |
|---------------------------------------------|----------|
| Коефіцієнт детермінації, ( $R^2$ )          | 0,7263   |
| Середня помилка апроксимації, ( $\bar{A}$ ) | 7,05%    |
| Стандартна помилка, ( $S$ )                 | 36,861   |
| Критерій Фішера, ( $F$ )                    | 9,29     |

Отримана кореляційно-регресійна модель показує, що збільшення локомотивного парку на 1 од. забезпечує зростання вантажоперевезень на 0,9031 од. за рік і, відповідно, внаслідок збільшення вагонного парку на 1 од., річний обсяг вантажних перевезень може зрости тільки на 0,00286 од., а константа (-618, 474) оцінює вплив інших факторів, які в своїй сукупності негативно впливають на обсяги

вантажних перевезень залізничним транспортом, зменшуючи їх.

Для оцінки ступенів значущості експлуатаційних парків магістральних локомотивів та вагонів на обсяги перевезення вантажів було визначено розрахунковий обсяг залізничних вантажних перевезень з використанням даних 2020 р. про кількість локомотивів та вагонів експлуатаційного парку, а саме:

$$\begin{aligned} y_{o.l.} &= -618,474 + 0,9031 \cdot 688 + 0,00286 \cdot 110267 = \\ &= -618,474 + 621,36 + 315,36 = 318,22 \quad (s = \pm 36,86). \end{aligned}$$

Тобто розрахунки свідчать, що за існуючого стану залізничного транспорту, надання послуг з необхідних обсягів вантажних перевезень здійснюються за умов, коли значущість експлуатаційного парку магістральних локомотивів у 1,97 раза  $\left(\frac{621,36}{315,36}\right)$  перевищує значущість експлуатаційного парку вантажних вагонів.

Цей висновок підкріплюється логічним аналізом статистичних даних роботи АТ «Укрзалізниця» за 2019 р. [6] (офіційні статистичні дані 2020, 2021 рр. не містять повною мірою необхідну інформацію), що наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Основні показники роботи рухомого складу залізниці в 2019 році

| Показник                                                                        | Величина показника |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Тривалість обігу вантажного вагона ( $t_{об.}$ ), доб                           | 9,68               |
| Простій вагона під однією вантажною операцією ( $t_{в.р.}$ ), год               | 50,57              |
| Середньодобовий пробіг локомотива ( $I_{л.}$ ), км                              | 436,2              |
| Середня відстань перевезення вантажу [табл. 1] ( $S_{пер.}$ ), км               | 581                |
| Доля пробігу порожнього вагона ( $D_{пор}$ ) до пробігу навантаженого вагона, % | 70,8               |

Виходячи з наведених даних, визначено:

- середню тривалість пробігу завантаженого вагона ( $T_{зв}$ )

$$T_{зв} = 24 \cdot \frac{S_{пер}}{I_{л.}}; \quad (2)$$

$$T_{зв} = \frac{24 \cdot 581}{436,2} = 31,97 \text{ год};$$

- середню тривалість пробігу порожнього вагона ( $T_{пв}$ )

$$T_{пв} = T_{зв} \frac{D_{пор}}{100}; \quad (3)$$

$$T_{пв} = 31,97 \cdot \frac{70,8}{100} = 22,63 \text{ год};$$

- середню сукупну тривалість пробігу завантаженого та порожнього вагона ( $T_{сук}$ )

$$T_{сук} = T_{зв} + T_{пв}; \quad (4)$$

$$T_{сук} = 31,97 + 22,63 = 54,60 \text{ год};$$

- середню сукупну тривалість навантаження та розвантаження вагона ( $T_{НР}$ )

$$T_{НР} = 2t_{в.р.} \quad (5)$$

$$T_{НР} = 2 \cdot 50,57 = 101,14 \text{ год};$$

- середню тривалість простою вагона в очікуванні формування, відправлення та розформування поїзду ( $T_{пр}$ )

$$T_{пр} = t_{об} - T_{НР} - T_{сук} \quad (6)$$

$$T_{пр} = 232,32 - 101,14 - 54,60 = 76,58 \text{ год.}$$

Що становить 3,19 доби.

Таким чином, очікування формування (розформування) та відправлення вантажного поїзду в 2019 р. складало біля 33 %  $\left(\frac{3,19}{9,68}\right)$  тривалості обігу вагона насамперед внаслідок нестачі локомотивів.

Впевненість у такому висновку надають аналітичні дані про співвідношення експлуатаційних парків магістральних локомотивів та вантажних вагонів протягом попередніх десяти років (табл. 2), що наведено в табл. 5.

За даними Укрзалізниці в 2019–2020 рр. вантажний поїзд складався в середньому з 53 вагонів, тобто вони виконували свою пряму функцію, оскільки знаходились в стані руху, в той же час близько 136 вагонів (188,7 – 53) в 2019 р. та близько 107 вагонів (160,3 – 53) в 2020 р. у розрахунку на один магістральний локомотив простоювали в очікуванні відправлення, що складає відповідно 72 % та 66 % експлуатаційних парків вагонів в ці роки. За таких умов залізниця втрачає будь-які можливості конкурувати з автомобільним транспортом в обсягах повагонних перевезень вантажів.

Таблиця 5

Співвідношення експлуатаційного парку вантажних вагонів і магістральних локомотивів

| Показник                                                        | Рік   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                                 | 2011  | 2012  | 2013  | 2014  | 2015  | 2016  | 2017  | 2018  | 2019  | 2020  |
| Кількість вантажних вагонів в розрахунку на один локомотив, од. | 145,8 | 155,7 | 205,7 | 226,3 | 231,5 | 236,5 | 230,5 | 216,3 | 188,7 | 160,3 |

Враховуючи, що фактичний знос локомотивів складає понад 90 % інвентарного парку, найсуттєвішим і найбільш актуальним питанням сьогодення залишається подальше забезпечення функціональних можливостей існуючих транспортних засобів, зокрема локомотивів, шляхом впровадження технічних новацій, що дозволить збільшити їхній «життєвий цикл». Виходячи з того, що Україна не має необхідних потужностей для випуску локомотивів, будь-яке відтермінування виведення їх з експлуатації дасть змогу знизити ризики для всієї економіки країни. З огляду на це, на сьогодні при формуванні технічної політики залізничної галузі на середньостроковий період пріоритетним завданням, а можливо і єдиним вірним рішенням, є впровадження інноваційних заходів, що дають змогу подовжити експлуатаційні можливості діючого локомотивного парку. Це суттєво знизить вірогідність виникнення непередбачених ситуацій в перехідний період оновлення парку локомотивів і зробить цей процес більш прогнозованим і керованим.

**Висновки.** Досліджено закономірності розвитку транспортної системи, і зокрема залізничного вантажного транспорту, під дією загальних законів діалектики. Визначено, що залізницю очікує неминуче якісне оновлення, але це потребує значних інвестиційних витрат протягом тривалого часу. Проте існуючий стан залізниці та подальше утримання її конкуренто-

спроможності навіть у теперішньому обсязі транспортних послуг вимагає негайного вирішення техніко-технологічних та організаційних задач щодо модернізації рухомого складу, удосконалення інфраструктури залізниці та системи управління нею. Проведено кореляційно-регресійний аналіз впливу наявності магістральних локомотивів та вантажних вагонів на обсяг перевезення вантажів. Він дав змогу обґрунтувати висновок, що в теперішніх умовах саме локомотиви відіграють вирішальну роль у задовільненні потреб у масових вантажних перевезеннях. Встановлено, що в перерахунку на річний обсяг вантажних перевезень, рівень впливу парку магістральних локомотивів на забезпечення безперебійного перевезення майже в два рази вищий за вплив експлуатаційного парку вагонів на цей процес. Аналіз показників роботи залізниці свідчить, що очікування формування (розформування) та відправлення вантажного поїзду в 2019 р. складало близько 33 % тривалості обігу вагона і, насамперед, через нестачу локомотивів, а простоювало з різних причин одночасно близько 70 % експлуатаційного парку вагонів. Зроблено висновок, що на сьогодні пріоритетним завданням при формуванні технічної політики залізничної галузі на середньостроковий період є впровадження інноваційних заходів, що дають змогу подовжити експлуатаційні можливості діючого локомотивного парку.

*Список використаних джерел*

1. Альошинський Є. С., Балака Є. І., Резуненко М. Є. Діалектика логістики і задачі сьогодення: кластеризація та підготовка фахівців. *Залізничний транспорт України*. 2016. № 3–4. С. 8–13.
2. Балака Є. І., Лючков Д. С. Закономірності розвитку вантажних перевезень і задачі залізниці. Тенденції розвитку вантажних перевезень в Україні. *Українська залізниця*. 2019. № 7 (73). С. 13–17.
3. Lomotko D., Kovalov A., Koval'ova O. Formation of the fuzzy support system for decision-making on merchantability of rolling stock in its allocation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Т. 6. No. 3 (78). Р. 11–17. URL: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2015.54496>.
4. Butko T., Prokhorchenko A., Muzykin M. Improvement of methods for determining locomotive circulation patterns with regard to the technological features of car-stream flows. *Eastern-European Journal of Advanced Technologies*. 2016. Vol. 5. No. 3. Р. 47–55.
5. Концептуальні підходи до диверсифікації діяльності ПАТ «Укрзалізниця» / С. В. Панченко, Г. Л. Ватуля, Є. І. Балака, Д. С. Лючков. *Українська залізниця*. 2018. № 9 (63). С. 15–19.
6. Данько Н. И., Ломотько Д. В., Кулешов В. В. Разработка организационно-технологической модели управления парком грузовых вагонов разной собственности. *Инновационный транспорт*. 2012. № 4 (5). С. 8–13.
7. Тенденції розвитку залізничних перевезень у провідних країнах світу / О. І. Зоріна, Н. М. Колеснікова, С. О. Погасій та ін. *Залізничний транспорт України*. 2000. № 1. С. 22–23.
8. Україна в цифрах 2014–2019 рр. Державна служба статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua>.
9. Довідник основних показників роботи регіональних філій АТ «Українська залізниця» (2004–2019 роки). Київ, 2020. 39 с.

---

Панченко Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, ректор Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків, Україна, ORCID iD: 0000-0002-7626-9933.

Тел.: +380994886100. E-mail: [panchenko074@ukr.net](mailto:panchenko074@ukr.net).

Балака Євгеній Іванович, кандидат економічних наук, доцент кафедри транспортних систем та логістики Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків, Україна. ORCID iD: 0000-0002-0508-937X. Тел.: +380974541488. E-mail: [ev.balaka@gmail.com](mailto:ev.balaka@gmail.com).

Панченко Владислав Вадимович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків, Україна.

ORCID iD: 0000-0003-4822-7151. Тел.: +380661878961. E-mail: [vlad\\_panchenko@ukr.net](mailto:vlad_panchenko@ukr.net).

Резуненко Марина Євгенівна, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри вищої математики та фізики Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків, Україна. ORCID iD: 0000-0003-2073-5242. Тел. +380974401096. E-mail: [Rezuneneko@kart.edu](mailto:Rezuneneko@kart.edu).

Panchenko Serhii, Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of the Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: 0000-0002-7626-9933. Tel.: +380994886100. E-mail: [panchenko074@ukr.net](mailto:panchenko074@ukr.net).

Balaka Yevhenii, Candidate of Economical Sciences, Associate Professor, Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: 0000-0002-0508-937X. Tel.: +380974541488. E-mail: [ev.balaka@gmail.com](mailto:ev.balaka@gmail.com).

Panchenko Vladyslav, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: 0000-0003-4822-7151. Tel.: +380661878961. E-mail: [vlad\\_panchenko@ukr.net](mailto:vlad_panchenko@ukr.net).

Rezuneneko Maryna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Higher Mathematics and Physics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: 0000-0003-2073-5242. Tel.: +380974401096. E-mail: [Rezuneneko@kart.edu](mailto:Rezuneneko@kart.edu).

Статтю прийнято 18.03.2022 р.

УДК 656.2

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ РУХУ ПОЇЗДОПОТОКІВ НА ВАНТАЖОНАПРУЖЕНОМУ ЗАЛІЗНИЧНОМУ ПОЛІГОНІ

Аспірант М. А. Кравченко, магістрант Є. М. Стебницька, д-р техн.  
наук А. В. Прохорченко, канд. техн. наук А. М. Киман, магістрант А. Є. Кірієнков

## STUDY OF STABILITY OF TRAIN FLOWS ON HEAVILY USED FREIGHT RAILWAY REGION

Graduate student Mikhail Kravchenko, master's student Elizaveta Stebnitskaya,  
Dr. Sc. (Tech.) Andrii Prokhorchenko, Ph.D. (Tech.) Andrii Kyman, master's student Artem  
Kirienko

---

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.199.2022.258820>

---



**Анотація.** У статті досліджено стабільність руху вантажних поїздопотоків у різні періоди перевезень на полігоні регіональної філії «Одеська залізниця» АТ «Укрзалізниця», який є «вузьким місцем» з'єднання залізничної системи з найбільшими морським портами України. Виявлено закономірності впливу експлуатаційних показників на загальну тривалість руху поїздопотоків. На основі кореляційного аналізу чисельно доведено вплив пасажирського руху на тривалість слідування вантажних поїздопотоків на різних маршрутах руху. Розраховано кластерограму взаємозв'язків впливу пасажирського руху на тривалість руху вантажних поїздів на різних маршрутах, що дозволяє комплексно проаналізувати взаємозалежності експлуатаційних показників ділянок в умовах зміни інтенсивності руху та перенаправлення поїздопотоків за паралельними лініями.

**Ключові слова:** залізничний полігон, поїздодільниця, маршрут, дільнична швидкість, поїздопотік.

**Abstract.** The article examines the stability of freight trains in different periods of traffic at the landfill of the regional branch of "Odessa Railway" JSC "Ukrzaliznytsia", which is a "bottleneck" of the railway system with the largest seaports in Ukraine. It is offered to analyze the consolidated daily operational indicators on the main routes of train flows: density at the train station (traffic density per 1 km, tons); average daily speed of trains (km / h); the number of freight trains that have passed (train). For a comprehensive analysis of changes in operational indicators in the low (I-III quarter) and high season (IV quarter) of traffic summarized indicators in the sequence of train flows. This allowed us to identify the most influential train stations for the stability of train traffic. Regularities of influence of operational indicators on the general duration of movement of train streams are revealed. Based on the correlation analysis, the influence of passenger traffic on the duration of freight trains on different routes has been proved numerically. Correlations can be described as strong and significant. The interaction of changes in operational indicators on different routes of train flows at the investigated landfill was revealed. Significant impact on the stability of train flows occurs at train stations, where sorting stations operate. Increasing the share of scheduled departures in 2019 and working to extend the service in 2020 has reduced the gap between the total duration of trains on the routes to acceptable values. A cluster diagram of the relationship between the impact of passenger traffic on the duration of freight trains on different routes, which allows a comprehensive analysis of the interdependence of operational performance of sections in terms of changes in traffic intensity and redirection of trains on parallel lines.

**Keywords:** railway region, train section, route, section speed, train flow.

**Вступ.** Дотримання стабільності руху поїздопотоків у залізничній системі є одним із важливих факторів сталого розвитку

економіки України. Однак останніми роками у залізничній системі України спостерігається високий рівень дезорганізації

в пікові сезони навантаження [1, 2]. Одним із факторів збільшення навантаження на залізничну систему є розвиток агропромислового комплексу, що призводить до значних обсягів навантаження зернових вантажів починаючи з серпня-жовтня кожного року. Співпадаючи із збільшенням попиту на продукцію гірничо-металургійного комплексу на зовнішніх ринках, обсяги перевезень вантажів до основних морських портів досягають критичних значень. Виникають затори на основних маршрутах слідування вагонопотоків, збільшуються строки доставки вантажів, і, як наслідок, стейкхолдери залізничного ринку несуть значні збитки. На відміну від залізничних систем, де рух вантажних поїздів відбувається за нормативним розкладом, залізниця України та її подібні відносяться до вертикально інтегрованих систем з частковим дотриманням розкладу руху, де дотримуються заздалегідь розробленого розкладу руху тільки пасажирські поїзди, а рух вантажних поїздів виконується без розкладу. Це спричиняє значну невизначеність перевізного процесу, який досить складно передбачити.

Приймаючи до уваги виникнення значних заторів на мережі у 2019 р. в умовах рекордних обсягів перевезень вантажів і запровадження масового руху маршрутних зернових поїздів за розкладом (РРМП) у четвертому кварталі [3] та майже відсутність залізничного пасажирського руху у 2020 р. з причини запровадження карантинних обмежень по всій території України з метою запобігання поширенню гострої респіраторної хвороби COVID-19, спричиненої коронавірусом SARS-CoV-2, вперше в історичній ретроспективі залізничної системи України з'явилася нагода дослідити експлуатаційні умови роботи залізничних дільниць та вплив пасажирського руху на стабільність руху вантажних поїздів на ключових маршрутах. Враховуючи важливість виявлення причин, що призводять до

перевантаження залізничної мережі і погіршення кількісних та якісних експлуатаційних показників в системі, актуальним є проведення наукових досліджень, спрямованих на вивчення стабільності руху вантажних поїздів у різні періоди перевезень на вантажонапружених полігонах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У наукових працях є багато досліджень, що присвячені аналізу стабільності руху поїздів, зокрема досліджувалась дільнична швидкість на мережі, виявлявся вплив раціональних рівнів завантаження мережі на швидкість руху поїздів з урахуванням максимальної пропускної спроможності залізничної інфраструктури [4, 5]. У роботі [6] розглянуто один із найважливіших показників якості руху поїздів – дільничну швидкість. Виявлені фактори, що впливають на втрату дільничної швидкості, та які регульовальні заходи дозволяють її підвищити.

Окрім аналізу впливу факторів на дільничну швидкість, досить багато досліджень присвячено визначенню пропускної спроможності залізничних інфраструктур та встановленню раціональних меж завантаження для стабільного руху поїздів в мережі. Завдання аналізу стабільності руху поїздів тісно пов'язані з проблемою перевантаження залізничної інфраструктури, де рівень точності визначення величини пропускної спроможності має великий вплив на якість досліджень. Встановлення верхньої межі використання елементу інфраструктури різними методами досліджень та оцінка інтенсивності руху в цих умовах дозволяє встановити взаємозалежність швидкості слідування поїздів від рівня завантаження. Однак підходи щодо удосконалення методів визначення пропускної спроможності залізничних дільниць та станцій спрямовані на декомпозицію полігонів, що не дозволяє врахувати взаємозалежність експлуатаційних

показників ліній в межах залізничного полігону. В роботі [7] проведено аналіз методів розрахунку пропускної спроможності залізничних дільниць, виявлено переваги і недоліки різних методів розрахунку. При розрахунку пропускної спроможності, з урахуванням недоліків кожного з методів, запропоновано застосувати інтегровану методологію. Наголошено, що підходи на основі комплексного аналізу взаємозалежності експлуатаційних показників дільниць на досліджуваному полігоні є більш ефективними. Лай [8] описав два поширені методи оцінки пропускної спроможності: параметричний та моделювання. За допомогою запропонованих методів можна порівнювати та оцінювати пропускну спроможність з різних ліній або залізничних систем, що призводить до значущих і корисних результатів для забезпечення стабільності руху поїздопотоків. В роботі [9] розглянуто методичні підходи до виявлення факторів, що впливають на стабільність пропуску поїздів. У статті [10] розглянуто основні концепції виконання аналізу пропускної спроможності, яка надзвичайно залежить від інфраструктури та ефективності її використання. У результаті показано, як пропускну спроможність змінюється залежно від швидкості поїзда, комерційних зупинок та надійності розкладу. В роботі [11] наголошено, що будівництво нових інфраструктур допоможе збільшити пропускну спроможність та забезпечити стабільність руху поїздопотоків. Доведено, що зміна планування в поєднанні з ефективним керуванням поїздом являє перспективний недорогий підхід для збільшення пропускної спроможності та забезпечення стабільності руху поїздопотоків на залізничних мережах із змішаним рухом, які значно завантажені. В роботі [12] проведено аналіз методів оптимізації пропускної спроможності та їх застосування на «Литовських залізницях», а в роботі [13] описано методи аналізу пропускної спроможності в Швеції. Дослідження [14] на

прикладі національної залізничної мережі Rah Ahane Iran визначає абсолютні рівні пропускної спроможності, і показано, що збільшення швидкості поїздів може бути не зовсім рентабельним. У роботі [15] для нової двоколійної дільниці досліджено пропускну спроможність залізниці, використовуючи два аналітичні методи – індонезійський та UIC 405. Дане дослідження присвячено аналізу використання пропускної спроможності на перспективу. У статті [16] використано понад 50 досліджень пропускної спроможності США та Європи. Зроблено висновок, що європейські залізничні дослідження є більш уніфікованими з точки зору можливостей, концепцій та методів, тоді як американські дослідження використовують більшу різноманітність методів, інструментів та цілей.

Враховуючи відсутність досліджень комплексного аналізу зміни швидкості руху поїздопотоків на основних взаємопов'язаних маршрутах на залізничних полігонах, в роботі запропоновано проаналізувати стабільність руху поїздопотоків на полігоні регіональної філії «Одеська залізниця» АТ «Укрзалізниця», який є «вузьким місцем» з'єднання залізничної системи з найбільшими морськими портами країни.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Мета дослідження полягає у виявленні причин порушення стабільності руху поїздопотоків на перевантаженому залізничному полігоні та теоретичному обґрунтуванні впливу пасажирського руху на стабільність руху вантажних поїздопотоків на ключових маршрутах. Досягнення поставленої мети здійснено шляхом проведення порівняльного аналізу експлуатаційних показників роботи поїздодільниць у різні періоди перевезень на основних маршрутах, що ведуть до найбільших морських портів України та проведення розрахунків кластерограми взаємозв'язку відсотку т-км брутто в пасажирському русі від загальних перевезень вибраних дільниць, що

досліджуються, до загальної тривалості руху поїздопотоків за маршрутами.

**Основна частина дослідження.** Для проведення дослідження стабільності руху поїздопотоків у роботі запропоновано проаналізувати основні маршрути руху на полігоні регіональної філії «Одеська залізниця» АТ «Укрзалізниця». Граф полігону мережі наведено на рис. 1. Даний полігон в піковий період навантаження є критичним елементом на маршрутах руху всіх вагонопотоків, що прямують до портів «Великої Одеси». Для аналізу використані дані з довідки форми ЦО-4АР. Звіт про роботу та показники використання рухомого складу Розділ 3. Показники використання рухомого складу по поїздодільницям і напрямкам. Для виявлення коливань показників руху поїздопотоків та зміни експлуатаційної ситуації на полігоні запропоновано порівняти експлуатаційні показники за період I-III та IV кварталів за 2019 та 2020 рр. Четвертий квартал

характеризує піковий період навантаження та дозволяє виявити фактори, що впливають на стабільність руху поїздопотоків в умовах перевантаження мережі, що виникало у IV кварталі 2019 р. Важливим є порівняльний аналіз змін експлуатаційної роботи у 2019 р., який є піковим для перевезень вантажів [17] та 2020 р., впродовж якого було введено карантинні обмежувальні заходи з відміною пасажирського руху поїздів на мережі АТ «Укрзалізниця» [18]. В історичній ретроспективі це була унікальна ситуація для залізничної системи України, що потребує аналізу. В межах дослідження запропоновано проаналізувати рух поїздопотоків за маршрутами до морських портів Південний (залізнична станція Берегова) та Чорноморськ (станція Чорноморськ-Порт). На графі полігона (рис. 1) наведено маршрути чотирьох поїздопотоків призначенням до даних морських портів.



Рис. 1. Граф полігона мережі регіональної філії «Одеська залізниця» АТ «Укрзалізниця» та маршрути руху поїздопотоків

На першому етапі дослідження запропоновано проаналізувати зміну вибраних щодобових показників на маршрутах – щільність на поїздодільниці (щільність руху на 1 км, тонн); середньодобову швидкість поїздів (км/год); кількість вантажних поїздів, що проїхали (поїзд). Згідно з даними, отриманими з довідки форми ЦО-4АР, запропоновано послідовно зібрати за поїздодільницями експлуатаційні показники та порівняти їх. На рис. 2 та 3 наведено порівняльні діаграми експлуатаційних показників роботи поїздодільниць у непарному напрямку на маршруті Помічна – Подільськ – Чорноморськ-Порт ( $\mu_1$ ) за періоди I-III та IV кварталів 2019 та 2020 рр. Даний маршрут  $\mu_1$  можна розкласти на обмежувальну частину Помічна – Подільськ та головний хід – маршрут  $\mu_4$  Подільськ – Чорноморськ-Порт.

Порівняльний аналіз показників у I-III та IV кварталах 2019 р. частини дільниці

Помічна – Бешкетове – Побережжя свідчить про зміну навантаження поїздодільниць даної частини маршруту з меншим значенням густини руху на кілометр колії у піковий період навантаження. Можна припустити, що причиною такої ситуації могло бути перевантаження даної дільниці великою кількістю кинутих поїздів та корегування плану формування поїздів для перенаправлення магістральних локомотивів на основні магістральні лінії Подільськ – Чорноморськ-Порт та Помічна – Колосівка – Чорноморська, на яких в цей період значно зростала інтенсивність поїздопотоку. За статистичними даними з 1.09.2019 по 31.01.2020 р. на станції Помошна було кинуто 57 поїздів із середнім простоем 23,5 год; на станції Бандурка – 8 поїздів з середнім простоем 58,9 год; на станціях дільниці Підгородна – Обхідна – 97 поїздів з середнім простоем 261,2 год; Побережжя – 11 поїздів з середнім простоем 23,9 год; на станції Подільськ – 669 поїздів з середнім простоем 49,5 год.

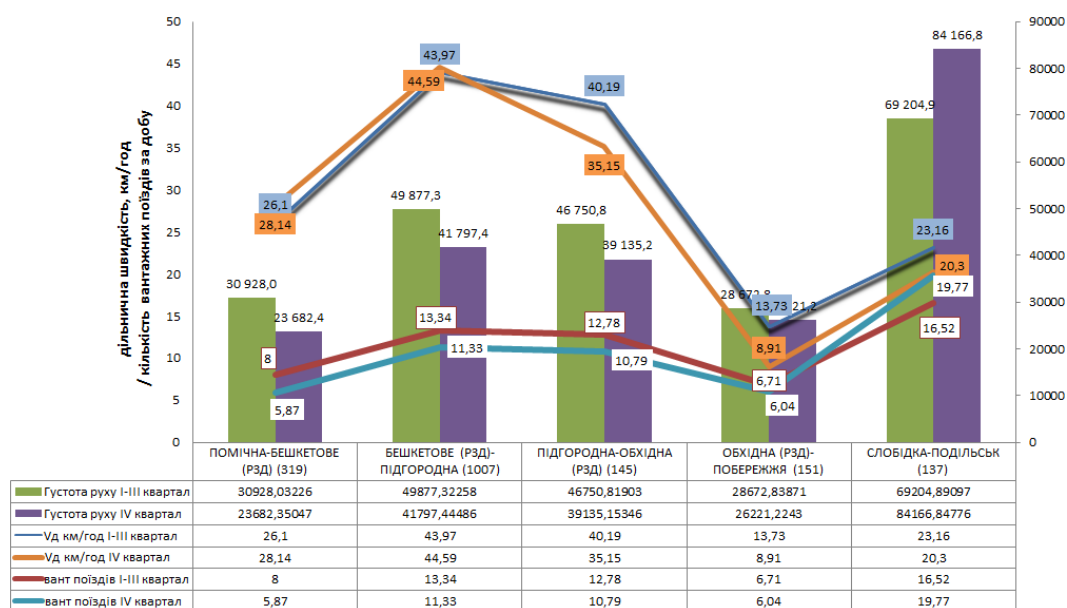


Рис. 2. Діаграма експлуатаційних показників роботи поїздодільниць у непарному напрямку на маршруті Помічна – Подільськ призначенням Чорноморськ-Порт ( $\mu_1$ ) за періоди I-III та IV кварталів 2019 р.

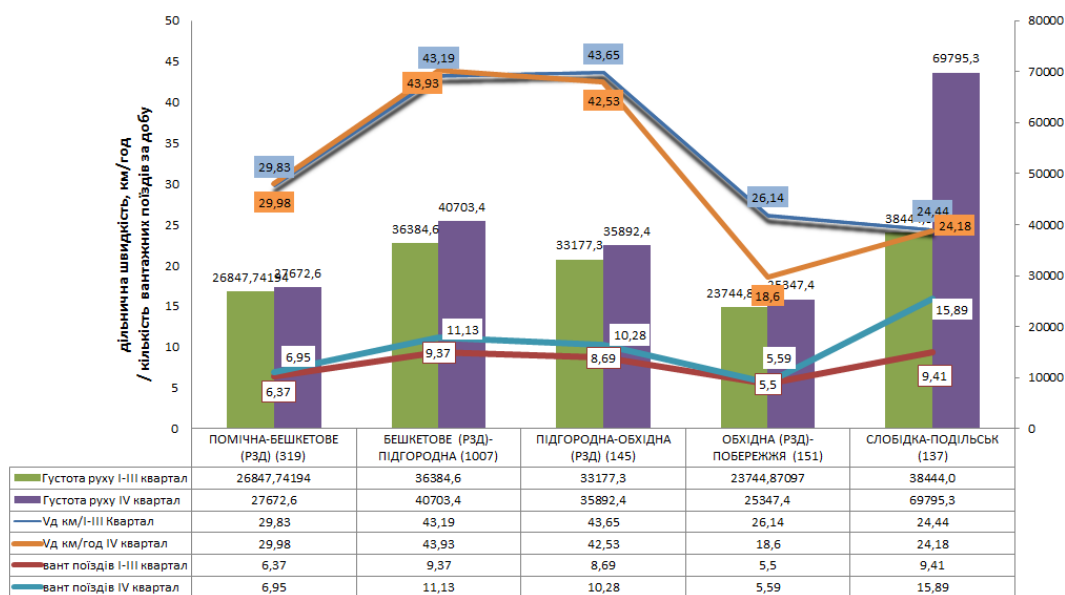


Рис. 3. Діаграма експлуатаційних показників роботи поїздодільниць у непарному напрямку на маршруті Помічна – Подільськ призначенням Чорноморськ-Порт ( $\mu_1$ ) за періоди I-III та IV кварталів 2020 р.

У 2020 р. обсяги перевезень вантажів були меншими, ніж у 2019 р., крім того були відсутні затори, що утворювались з кинутих поїздів, а тому розрив між величинами щільності руху на поїздодільницях у I-III та IV кварталах були меншими, а у IV кварталі дана лінія використовувалась більш інтенсивно. У 2019 р. розрив складав 28,45 % від середнього найбільшого значення густини, тоді як у 2020 р. – 9,53 %. Відповідно середня дільнична швидкість була більша у 2020 р., а тривалість руху на частині маршруту у піковий період навантаження (IV квартал) складала 5,94 год при 7,2 год у аналогічний період 2019 р.

Пояснити збільшення щільності руху на 1 км поїздодільниць у IV кварталі 2020 р. можна зміною плану формування поїздів та тарифних відстаней, що спричинило перенаправлення вагонопотоків з полігонів навантаження регіональних філій «Південна залізниця» та «Придніпровська залізниця» через Подільськ призначенням на станцію Чорноморськ-Порт. У 2020 р. в пікових умовах перевезень на дільниці Підгородна – Обхідна було відсутнє падіння дільничної швидкості з причини відсутності кинутих

поїздів на лінії. Збільшилась дільнична швидкість на короткій дільниці Обхідна – Побережжя, що передуює станції Подільськ. Це пояснюється значно меншими проблемами з відмовою у прийманні поїздів з причини відсутності вільних колій по станції Подільськ у 2020 р.

Друга частина маршруту  $\mu_1$  співпадає з маршрутом  $\mu_4$  Подільськ – Чорноморськ-Порт. Діаграми порівняльного аналізу експлуатаційних показників роботи поїздодільниць у непарному напрямку на маршруті  $\mu_4$  за періоди I-III та IV кварталів 2019 та 2020 рр. наведено відповідно на рис. 4 та 5.

Вже на основному шляху слідування поїздопотоків з напрямку станції Жмеринка регіональної філії «Південно-Західна залізниця» величина щільності руху на поїздодільницях збільшується у IV кварталі. Порівняльний аналіз зміни середньої дільничної швидкості на поїздодільницях за різні періоди та роки (рис. 4 та 5) свідчить про стійку взаємозалежність – у піковий період перевезень при збільшенні кількості вантажних поїздів дільнична швидкість поїздодільниць зменшується. Дільницю, на

маршруті якої за напрямком руху поїздопоток знижується дільнична швидкість, а на наступній – даний показник зростає, можна вважати обмежуючим елементом, робота якого впливає на стабільність руху поїздопоток. На маршруті  $\mu_4$  таким елементом є поїздодільниця Мигаєве – Роздільна І, що має довжину 16 км. На даній дільниці

знаходиться сортувальна станція Роздільна-Сорт, що ускладнює роботу даної дільниці. За статистичними даними з 1.09.2019 по 31.01.2020 р. на станції Мигаєве було кинуте 67 поїздів із середнім простоем 114,8 год; на станції Роздільна-Сорт – 532 вантажних поїзди з середнім простоем 112,01 год; на станції Роздільна І – 60 поїздів з середнім простоем 207,9 год.



Рис. 4. Діаграма експлуатаційних показників роботи поїздодільниць у непарному напрямку на маршруті Подільськ – Чорноморськ-Порт ( $\mu_4$ ) за періоди I-III та IV кварталів 2019 р.

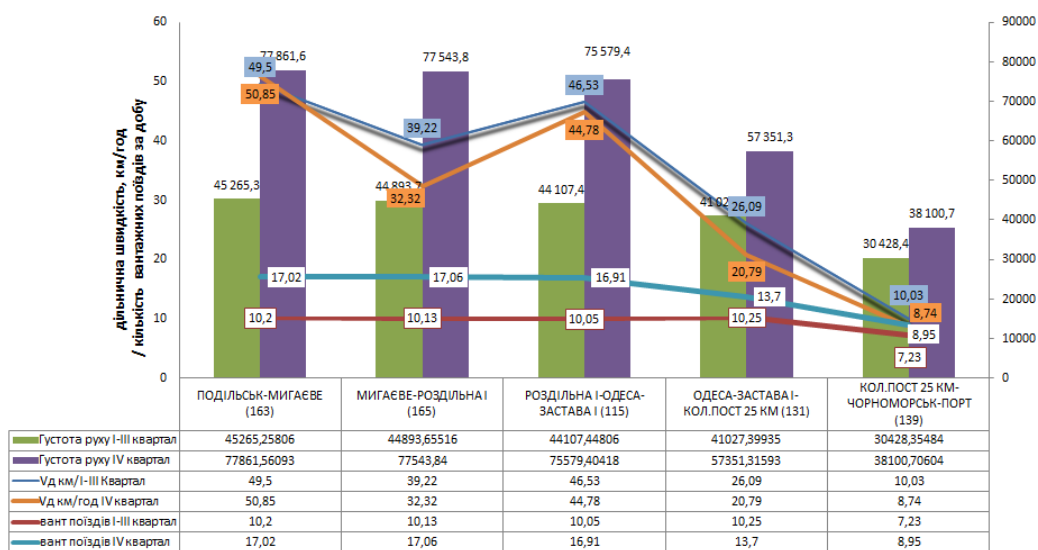


Рис. 5. Діаграма експлуатаційних показників роботи поїздодільниць у непарному напрямку на маршруті Подільськ – Чорноморськ-Порт ( $\mu_4$ ) за періоди I-III та IV кварталів 2020 р.

Аналіз стабільності руху поїздопотоків на маршруті Помічна – Берегова ( $\mu_2$ ) свідчить, що спостерігається класична закономірність залежності дільничної швидкості від щільності руху та інтенсивності руху. Порівняльний аналіз

експлуатаційних показників роботи поїздодільниць у непарному напрямку на маршруті Помічна – Берегова ( $\mu_2$ ) за періоди I-III та IV кварталів 2019 та 2020 рр. наведено на рис. 6 та 7.

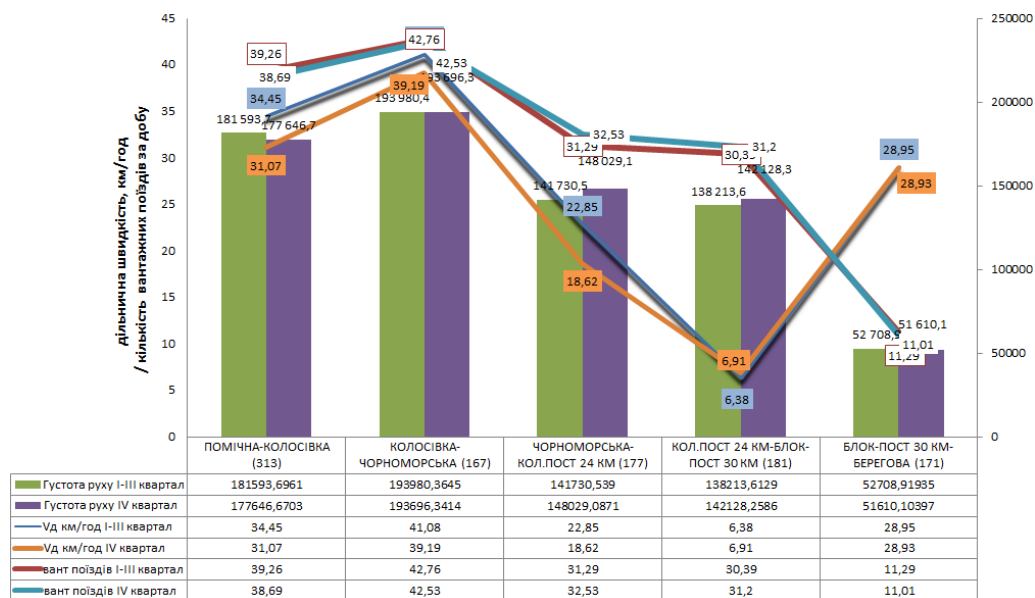


Рис. 6. Діаграма експлуатаційних показників роботи поїздодільниць у непарному напрямку на маршруті Помічна – Берегова ( $\mu_2$ ) за періоди I-III та IV кварталів 2019 р.

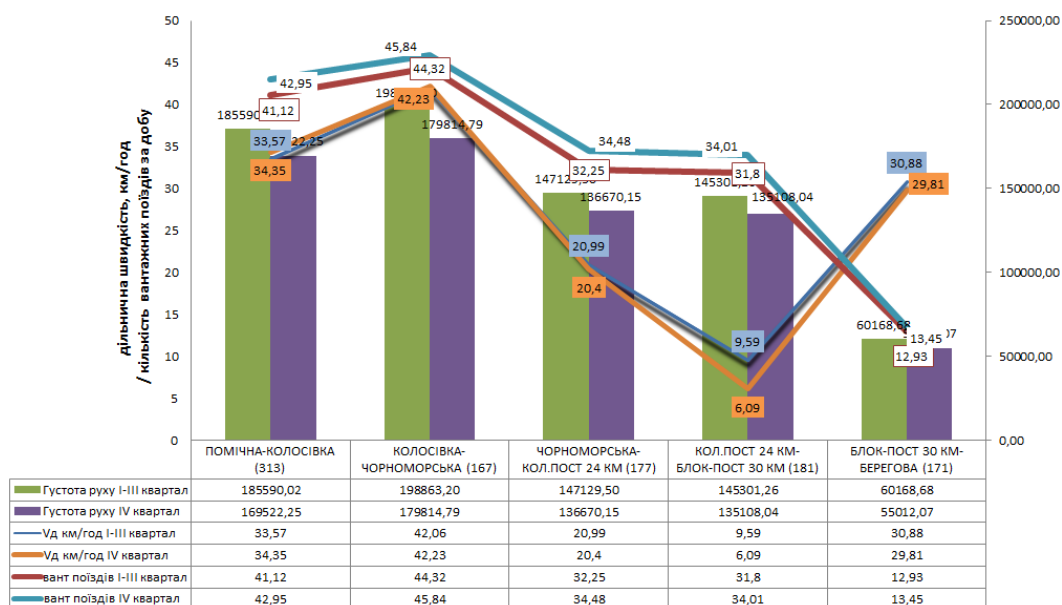


Рис. 7. Діаграма експлуатаційних показників роботи поїздодільниць у непарному напрямку на маршруті Помічна – Берегова ( $\mu_2$ ) за періоди I-III та IV кварталів 2020 р.

В піковий період дільнична швидкість зменшується, але значного збільшення у 2019 р. не спостерігається. Поїздопотік на даному маршруті характеризується найбільшою інтенсивністю руху з всіх маршрутів, що досліджуються в даній роботі. На однокільній з двоколійними вставками дільниці Помічна – Колосівка інтенсивність досягає 42,95 поїздів за добу у піковий період 2020 р. Дана дільниця є однією з найбільш завантажених на полігоні регіональної філії «Одеська залізниця».

За обома роками, що досліджуються, спостерігається зменшення щільності руху на поїздодільницях маршруту у IV кварталі, що можна пояснити більш інтенсивною роботою з перевезення вантажів в першому півріччі, зокрема з причини вивозу рекордного врожаю, що був зібраний у 2019 р. У 2020 р. врожайність була значно нижчою, що не спричинило значного навантаження на мережу.

Маршрут Помічна – Чорноморськ-Порт ( $\mu_3$ ) частково співпадає з маршрутом Помічна – Берегова ( $\mu_2$ ) (рис. 1). Після станції Чорноморська інтенсивність поїздопотіку значно зменшується.

Швидкість поїздопотіку на дільницях невисока, а загальна тривалість руху на маршруті тримається близько 9 годин у різні періоди перевезень. Повільність руху можна пояснити проходженням через Одеський залізничний вузол, де зустрічаються дві сортувальні станції, зокрема Одеса-Сортувальна та Одеса-Застава I з подальшим прослідкуванням через однокільну дільницю з двоколійними вставками – Одеса-Застава I – колійний пост 25 км.

На маршруті найбільш критично змінюється величина дільничної швидкості на дільницях Одеса-Сортувальна-Одеса-Пересип та Одеса-Застава II-Одеса-Застава I. Спостерігається ситуація, коли щільність руху у піковий період навантаження знижується у порівнянні з I-III кварталом у 2019 та 2020 р. Протилежна ситуація лише на дільниці Одеса-Застава I – колійний пост 25 км. Це пояснюється входженням на дану дільницю поїздопотіку з напрямку Подільська, що слідує за маршрутами  $\mu_1$  та  $\mu_4$ .

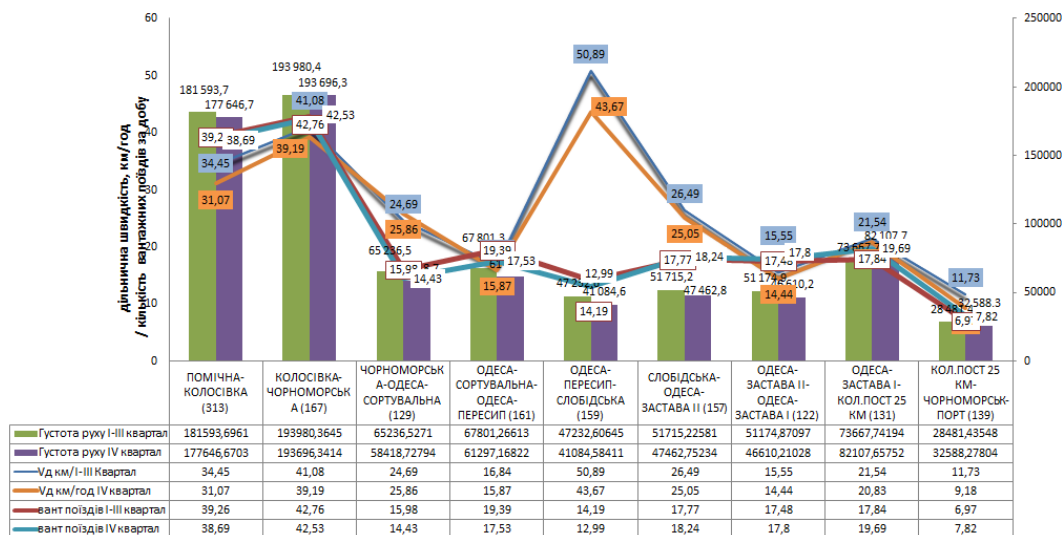


Рис. 8. Діаграма експлуатаційних показників роботи поїздодільниць у непарному напрямку на маршруті Помічна – Чорноморськ-Порт ( $\mu_3$ ) за періоди I-III та IV кварталів 2019 р.

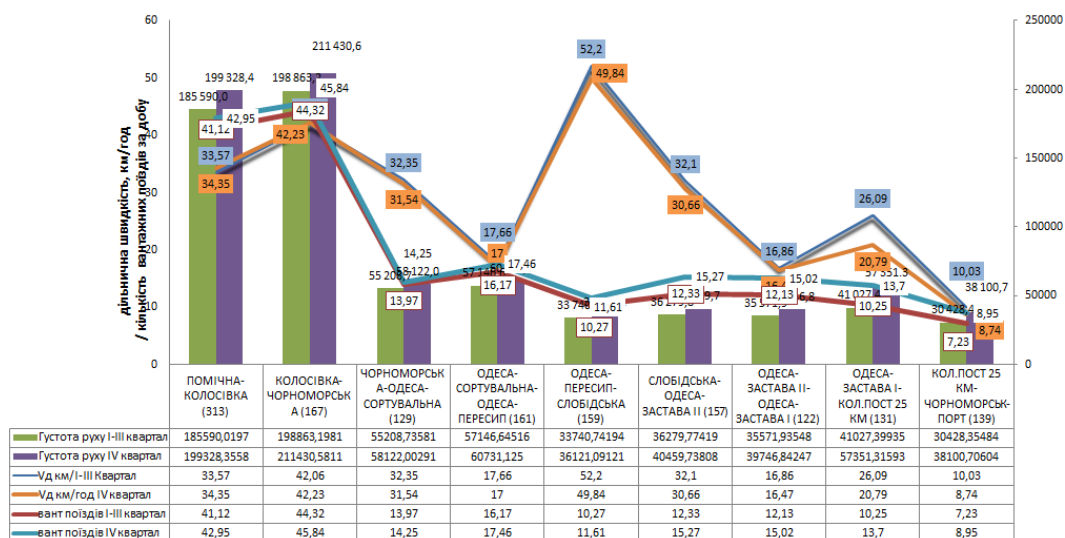


Рис. 9. Діаграма експлуатаційних показників роботи поїздодільниць у непарному напрямку на маршруті Помічна – Чорноморськ-Порт ( $\mu_3$ ) за періоди I-III та IV кварталів 2020 р.

На другому етапі дослідження запропоновано дослідити вплив експлуатаційних параметрів на загальну тривалість слідування на маршрутах, що досліджуються. Діаграма загальної тривалості руху поїздів за кожним з маршрутів наведена на рис. 10.

Запропоновано на кожному з маршрутів визначити дільницю, яка характеризує експлуатаційні умови зміни стабільності руху поїздопотоків за досліджувальними маршрутами. Для маршруту Помічна – Подільськ – Чорноморськ-Порт ( $\mu_1$ ) прийнята дільниця Підгородна – Обхідна; для маршруту Помічна – Берегова ( $\mu_2$ ) – Помічна-Колосівка; для маршруту Помічна – Чорноморськ-Порт ( $\mu_3$ ) – Колосівка-Чорноморська; для маршруту Подільськ – Чорноморськ-Порт ( $\mu_4$ ) – Подільськ – Мигаєве. Дільниці вибирались за критерієм більшої довжини з причини кращої реакції експлуатаційних показників на зміну умов експлуатації та їх положення на маршруті для якіснішого відображення характеристик руху поїздопотоку на маршрутах.

На коротких за довжиною дільницях неможливо дослідити зміну експлуатаційних показників та їх вплив на загальну тривалість руху за маршрутами. Дані дільниці є короткими за відстанню, найчастіше вміщують лише декілька блок-дільниць та передують великим станціям або є розв'язками, де умови руху не дозволяють поїзду їхати з встановленою швидкістю, що призводить до низьких показників дільничної швидкості, яка більше залежить від експлуатаційних умов власне станції або руху у вузлі. Наприклад, станція просто може не приймати поїзди з причини зайнятості колій приймання, що спричинить в деякий період значне зменшення дільничної швидкості на поїздодільниці, що їй передує.

Враховуючи наявність особливості експлуатаційних умов у 2020 р., коли був відмінений та зменшений до мінімальних обсягів пасажирський рух на полігоні, в роботі запропоновано чисельно дослідити вплив пасажирського руху на стабільність руху вантажних поїздопотоків.

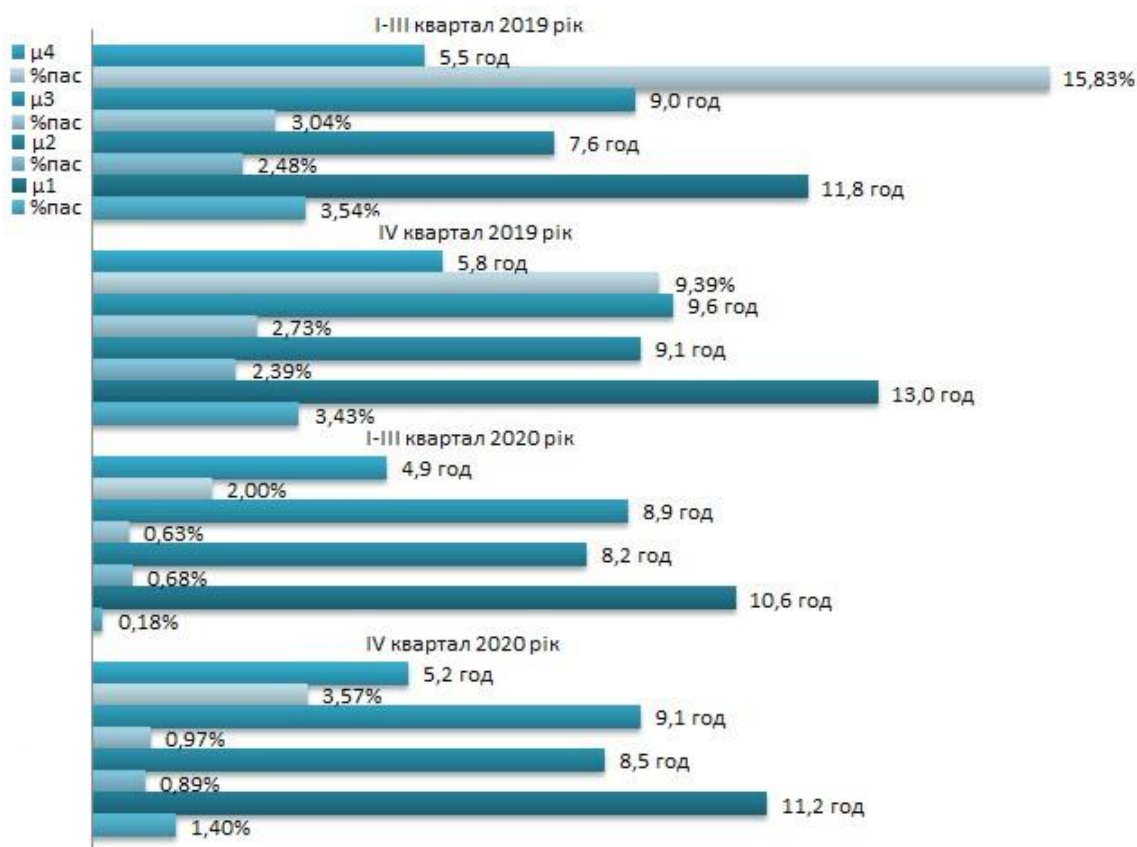


Рис. 10. Діаграма тривалості руху поїздопотоків та відсотку т-км брутто в пасажирському русі від загальних перевезень за маршрутами в період I-III та IV кварталів 2019 та 2020 рр.

Для виявлення впливу відсоткової частки т-км брутто в пасажирському русі від всіх поїздів на дільниці на загальну тривалість на маршруті запропоновано провести кореляційний аналіз з побудовою кластерної дендограми. Враховуючи, що аналізовані змінні (впливаючі та залежні) вимірюються в шкалах відношень для перевірки гіпотез про наявність зв'язків між змінними доцільно застосувати метод кореляційного аналізу. Перевагою параметричного методу кореляції Пірсона є його простота та швидкість встановлення тісноти лінійних зв'язків, чого достатньо на першому етапі даних досліджень. На рис. 11 наведено дендроподібну кластерограму ієрархічного взаємозв'язку відсоткової частки т-км брутто в пасажирському русі від всіх поїздів на вибраних дільницях на загальну тривалість руху на маршрутах.

Для побудови кореляційної матриці виконано розрахунок кореляційних коефіцієнтів Пірсона [18]. Перевірку значущості відмінності коефіцієнтів кореляції від нуля виконано за допомогою критерію Стюдента – нульова гіпотеза відкинута. Встановлені кореляції достовірні при  $p < 0,05$ . Побудова кластерограми виконана в середовищі Matlab із застосуванням методу зв'язування 'average'.

Виходячи з встановленої шкали загальної класифікації кореляційних зв'язків за «таблицею Чеддока» [18], дуже сильний ( $0,9 > r > 0,99$ ), сильний ( $0,7 > r > 0,89$ ) та значний ( $0,50 < r < 0,69$ ) зв'язок впливу величини пасажирського руху на загальну тривалість на маршруті мають дільниці на маршрутах Подільськ – Чорноморськ-Порт ( $\mu_4$ ) та Помічна – Подільськ – Чорноморськ-Порт ( $\mu_1$ ).

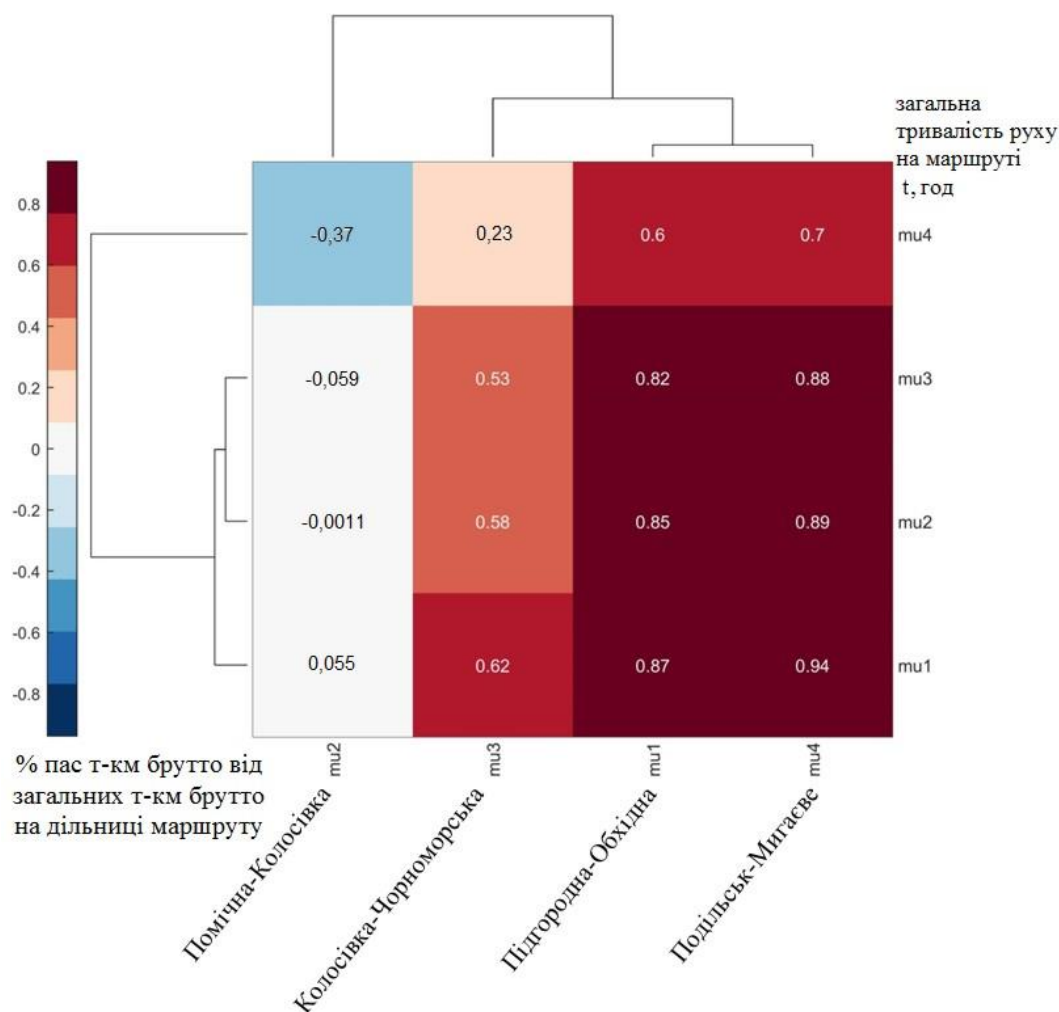


Рис. 10. Кластерограма взаємозв'язку відсотку т-км бруто в пасажирському русі від загальних перевезень вибраних ділянок на маршрутах, що досліджуються до загальної тривалості руху поїздопотоків за маршрутами в період I-III та IV кварталів 2019 та 2020 р.

Зв'язок впливу пасажирського руху на ділянці Колосівка-Чорноморська на тривалість руху на маршрутах  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  та  $\mu_3$  є значним ( $0,50 < r < 0,69$ ). Пояснити можна й слабку кореляцію ( $r=0,23$ ) між пасажирським рухом на ділянці Колосівка-Чорноморська на маршруті  $\mu_3$  з тривалістю руху вантажного поїздопотоків на маршруті Подільськ – Чорноморськ-Порт ( $\mu_4$ ) – географічно дані маршрути роз'єднані і сходяться лише в одеському вузлі, де маршрути пасажирських поїздів заходять до станції Одеса-Головна, а маршрут вантажних відхиляється від головного ходу по станції Одеса-Застава I. Зворотній зв'язок – вплив пасажирського руху на

маршруті Подільськ – Чорноморськ-Порт ( $\mu_4$ ) на загальну тривалість руху вантажних поїздів на маршруті Помічна – Чорноморськ-Порт ( $\mu_3$ ) характеризується як сильний ( $0,88$ ). Це пояснюється перетином даних потоків по станції Одеса-Застава I, де виникає ворожість маршрутів та зменшується пропускна спроможність.

Взаємозалежність величини пасажирського руху на маршруті можна охарактеризувати як слабкий ( $0,1 < r < 0,29$ ) та відсутній лише на маршруті Помічна – Берегова ( $\mu_2$ ). Цікаво, що від'ємна кореляція між маршрутами  $\mu_2$  та  $\mu_4$  (коефіцієнт кореляції складає  $-0,37$ ), що характеризує взаємозалежність, яку можна описати так:

при підвищенні інтенсивності пасажирського руху на дільниці Помічна-Колосівка маршруту  $\mu_2$  зменшується тривалість руху вантажного поїздопотоків на маршруті Подільськ – Чорноморськ-Порт ( $\mu_4$ ). Хоч зв'язок і класифікується як помірний ( $0,30 < r < 0,49$ ), але можна припустити, що при збільшенні пасажирського руху на дільниці Помічна-Колосівка частина пасажирського потоку поїздів не пройде по дільницям маршруту  $\mu_4$ , що підвищить дільничну швидкість, і як наслідок, скоротить загальну тривалість руху вантажних поїздів на маршруті. Однак, такі припущення слід перевірити додатковими даними інших років, які поки відсутні. В піковий період (IV квартал) 2020 р. відсоток т-км брутто пасажирського руху від загальних перевезень на дільниці Помічна-Колосівка ( $\mu_2$ ) складав лише 0,89 %. Тоді як на маршруті Подільськ – Чорноморськ-Порт ( $\mu_4$ ) в аналогічний період – 3,57 %.

**Висновки.** Результати аналізу стабільності руху поїздопотоків на перевантаженому залізничному полігоні регіональної філії «Одеська залізниця» вперше чисельно дозволили оцінити взаємозалежність впливу пасажирського руху на дільницях на загальну тривалість руху вантажних поїздів на основних

маршрутах, що ведуть в морські порти. Кореляційний аналіз показує, що за майже всіма основними маршрутами, що запропоновано дослідити в даній роботі, вплив пасажирського руху є високим або середнім за таблицею Чеддока. Виявлено значний вплив на стабільність руху поїздопотоків знаходження технічних станцій на поїздодільницях. Запропонована методика макроаналізу з використанням побудови кластерограм взаємозв'язку дозволяє в подальших дослідженнях вивчити вплив інтенсивності та щільності руху поїздів, зокрема кількості кинутих вантажних поїздів на станціях полігону на стабільність руху вантажних поїздопотоків. Збільшення частки маршрутних відправлень у 2019 р. та робота з подовження пліч обслуговування у 2020 р. дозволили зменшити розрив загальної тривалості руху поїздів на маршрутах до допустимих значень. Отже, запровадження технологій перевезень, що дозволяють поєднати вагонні і групові відправки в межах маршрутних поїздів, зокрема організація вагонопотоків у ступеневі маршрути за принципом райдшерингу, є важливим напрямом підвищення стабільності руху поїздопотоків в піковий сезон навантаження.

### Список використаних джерел

1. Причиной введения масштабных ограничений грузоперевозок по ЮЗЖД называют дефицит тяги и локомотивных бригад. Центр транспортних стратегий: веб сайт. URL: [https://cfts.org.ua/news/2019/09/11/prichinoy\\_vvedeniya\\_masshtabnykh\\_ogranicheniy\\_gruzoperevozok\\_po\\_yuzzhd\\_nazyvayut\\_defitsit\\_tyagi\\_i\\_lokomotivnykh\\_brigad\\_55192](https://cfts.org.ua/news/2019/09/11/prichinoy_vvedeniya_masshtabnykh_ogranicheniy_gruzoperevozok_po_yuzzhd_nazyvayut_defitsit_tyagi_i_lokomotivnykh_brigad_55192) (дата звернення 24.12.2021).
2. Кількість покинутих поїздів на мережі Укрзалізниці зросла майже вдвічі. Rail.insider. URL: <https://www.railinsider.com.ua/kilkist-pokynutyh-poyizdiv-na-merezhi-ukrzhalyznyczi-zrosla-majzhe-vdvichi/> (дата звернення 22.12.2021).
3. Прохорченко А. В., Кравченко М. А., Гурін Д. О. Дослідження впливу технології перевезень вантажів за розкладом руху на макропоказники залізничної системи України. *Зб. наук. праць ДУІТ. Сер. Транспортні системи і технології*. 2020. № 36. С. 184–198. URL: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-36-19>.
4. Сухорукова Т. Г., Александрова Е. Ю. Анализ показателей качества использования подвижного состава АО «Украинская железная дорога» и оценка их влияния на работу компании. *Вісник економіки транспорту та промисловості*. 2019. № 68. С. 116–125.

5. Зубков В. Н., Камышова Ю. И. Причинно-следственный анализ факторов невыполнения участковой скорости и меры по ее повышению. *Инженерный вестник Дона*. 2015. № 2, Ч. 2. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/2879>.
6. Солоп И. А., Солоп В. А. Основные причины потерь участковой скорости. *Научный взгляд в будущее*. 2016. Т. 1, № 4. С. 15–18.
7. Прохорченко А. В., Огієнко В. А. Аналіз методів розрахунку пропускної спроможності залізничних дільниць. *Зб. наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2014. № 150. С. 66–73. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.150.2014.67427>.
8. Lai, Y.-C.(R), Liu, Y.-H., Lin, T.-Y. The Development of Base Train Equivalents to Standardize Trains for Capacity Analysis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2012. Vol. 2289, № 1. P. 119–125.
9. Мугинштейн Л. А., Мехедов М. И. Методические подходы к выявлению факторов, влияющих на стабильность пропуска поездопотоков. *Вестник ВНИИЖТ*. 2014. № 2. С. 24–32.
10. Abril M., Barber F., Ingolotti L., Salido M.A., Tormos P., Lova A. An assessment of railway capacity. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2008. Vol. 44, № 5. P. 774–806.
11. Luethi M., Nash A., Weidmann U., Laube F., Wuest R. Other Conference Item. Increasing railway capacity and reliability through integrated real-time rescheduling. *Proceedings of the 11th World Conference on Transport Research Berkeley, USA, June 24–28, 2007. Zurich, 2007*.
12. Valentinoviča LSivilevičiusb., H. Roads and Railways. Railway line capacity methods analysis and their application in «Lithuanian Railways» justification. Vilnius, Lithuania 22–23 May 2014. Vilnius, 2014. P. 1–10.
13. Lindfeldt Anders. Railway capacity analysis. Methods for simulation and evaluation of timetables, delays and infrastructure. Doctoral Thesis in Infrastructure 15:002. Stockholm, 2015. 67 p.
14. Bevrani B., Burdett R., Yarlagadda K.D.V. Prasad. A sensitivity analysis of train speed and its effect on railway capacity. *Advanced Materials Research*. 2015. Vol. 1061–1062. P. 1208–1212.
15. Widyastuti H., Budhi W. S. Railway capacity analysis using Indonesian method and UIC code 405 method. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 930, № 1. P. 1–10.
16. Hamed Pouryousef, Pasi Lautala, Thomas White. Railroad capacity tools and methodologies in the U.S. and Europe. *Journal of Modern Transportation*. 2015. № 32. P. 30–42.
17. УЗА: 2019/2020 зерновий маркетинговий рік встановив кілька рекордів в Україні. Офіційний сайт Української зернової асоціації. URL: <https://uga.ua/news/uz-2019-2020-zernovij-marketingovij-rik-vstanoviv-kilka-rekordiv-v-ukrayini/#undefined> (дата звернення 25.12.2021).
18. УЗ скасувала низку поїздів в областях «червоної» зони. Офіційний сайт видання Слово і Діло. URL: <https://www.slovoidilo.ua/2021/03/10/novyna/suspilstvo/uz-skasovala-ryad-royizdiv-oblastyax-chervonoyi-zony> (дата звернення 25.12.2021).
19. Spanos Aris Probability Theory and Statistical Inference: Econometric Modeling with Observational Data. University of Cyprus. 1999. 844 p.

---

Кравченко Михайло Анатолійович, аспірант кафедри управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-7445-8952. Тел.: +38 (057) 730-10-88. E-mail: m.kravchenkourf@gmail.com

Стебницька Єлизавета Михайлівна, магістр за освітньо-науковою програмою «Організація перевезень і управління на транспорті (залізничний транспорт)», кафедра управління експлуатаційною роботою

Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-3719-3769. Тел.: +38 (057) 730-10-88. E-mail: estebnitskaya@gmail.com

Прохорченко Андрій Володимирович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-3123-5024. Тел.: +38 (066) 635-76-01. E-mail: prokhorchenko@kart.edu.ua

Киман Андрій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною та комерційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-4000-3287. Тел.: +38 (057) 730-10-75. E-mail: uermp@kart.edu.ua

Кірієнков Артем Євгенович, магістр за освітньо-науковою програмою «Організація перевезень і управління на транспорті (залізничний транспорт)», кафедра управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-3731-3409. Тел.: +38 (057) 730-10-88. E-mail: akirienkov999@gmail.com.

Kravchenko Mykhailo Anatoliyovych, graduate student of the Department of Operational Management of the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-7445-8952. Тел.: +38 (057) 730-10-88. Email: m.kravchenkourf@gmail.com

Stebnitska Elizaveta Mykhailivna, Master of Educational and Scientific Program "Organization of Transportation and Management of Transport (Railway Transport)", Department of Operational Management of the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-3719-3769. Тел.: +38 (057) 730-10-88. Email: estebnitskaya@gmail.com

Prokhorchenko Andrii Vladimirovich, Dr. Tech. Sciences, Professor, Professor of the Department of Operational Management of the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-3123-5024. Тел.: +38 (066) 635-76-01. Email: prokhorchenko@kart.edu.ua

Kiman Andrii Mykolayovych, Cand. tech. Sciences, Associate Professor of Freight and Commercial Management of the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-4000-3287. Тел.: +38 (057) 730-10-75. Email: uermp@kart.edu.ua

Kirienkov Artem Yevhenovych, Master of Educational and Scientific Program "Organization of Transportation and Management of Transport (Railway Transport)", Department of Operational Management of the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-3731-3409. Тел.: +38 (057) 730-10-88. Email: akirienkov999@gmail.com. Статтю прийнято 12.11.2021 р.

Статтю прийнято 22.03.2022 р.

## СТАТТІ ОГЛЯДОВО-ДИСКУСІЙНОГО ХАРАКТЕРУ

---

УДК 631.17.1

### ЗАСТОСУВАННЯ ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ В СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

Магістрант Чигурян Я. О., магістрантка Яковенко К. С.

### APPLICATION OF GIS-TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE

Master Chiguryan Ya.O., Master Yakovenko K.S.

**Анотація.** У статті розглянуто та проаналізовано ГІС-технології, які можуть сприяти розвитку сільського господарства в Україні. ГІС-технології допоможуть відновити баланс ведення різних форм господарювання, усунути низькі темпи техніко-технологічного оновлення виробництва, зміцнити економічне підґрунтя розвитку сільських громад, здійснити вплив щодо оптимізації витрат, спрощення управління сільським господарством та підвищення продуктивності. Інноваційні технології сприяють підвищенню врожайності, забезпечують моніторинг погодних умов, поживних речовин в ґрунті. Ряд новітніх технологій значно спростить роботу в сільському господарстві.

**Ключові слова:** геоінформаційні системи, сільське господарство, технології, розвиток, моніторинг, фермерство.

**Abstract.** The article considers and analyzes GIS technologies that can contribute to the development of agriculture in Ukraine. GIS technologies will help to restore the balance of management of various forms of management, eliminate the low pace of technical and technological renewal of production, strengthen the economic basis for the development of rural communities, make an impact on cost optimization, simplify the management of agriculture and increase productivity.

Innovative technologies contribute to increasing yields, provide monitoring of weather conditions, nutrients in the soil. A number of the latest technologies will greatly simplify the work in agriculture.

The efficiency of agricultural enterprises depends on the awareness of the state of lands, crops and the ability to systematically analyze the consequences of work and activities. An important factor in the informatization of agriculture, including the introduction of GIS, is the remoteness of users (specialists of farms) from large cities with developed information infrastructure

It is GIS technologies that provide significant assistance in cost optimization efforts, simplified management of agriculture and increase productivity.

The main advantage of modern means of building GIS is their accuracy and compatibility with other information technologies and data processing systems.

**Keywords:** geoformation systems; agriculture; technologies; development; monitoring; farming.

**Вступ.** Під час впровадження інформаційних технологій виникає ряд питань щодо освоєння та застосування новітніх технологій відносно сільського господарства. Незважаючи на те, що використання геоінформаційних систем (ГІС) набуває великого значення, в Україні не повністю розкрито системи для підвищення діяльності в сільському господарстві, дуже повільно та малоефективно застосовуються сучасні системи технології в даному напрямі. Геоінформаційні системи мають докорінно змінити концепцію сільського господарства, зробивши його більш ефективним, безпечним та простим для застосування. Тому постає актуальність теми щодо застосування ГІС-технологій в сільському господарстві.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Найбільш відомими та розробленими напрямками використання ГІС-технологій є праці Куйбіди В. С. в питаннях регіонального розвитку та просторового планування територій [1].

Також можна виділити роботи науковців: Руденко Л. Г., Бондарь А. Л. в сфері концепції багатоцільової національної геоінформаційної системи України [2].

Вчений Адаменко О. В. працював над темою: «Сучасний стан нормування точності геодезичних робіт під час будівництва інженерних споруд» [3]. Церклевич Н. Л. приділив основну увагу проблемам ведення кадастру нерухомості на території за допомогою інноваційних технологій [4].

Однак попри вагомі теоретичні та практичні напрацювання щодо застосування геоінформаційних системних технологій в сільському господарстві – розкрито недостатньо.

**Визначення мети та завдання дослідження.** На основі вивчення наукових праць щодо ГІС-технологій постає мета: доцільно розкрити критерії, характеристику

та застосування їх в сільському господарстві. Виникає завдання дослідити та описати технології, які будуть застосовуватись в сільському господарстві, значно покращать та вдосконалять роботу відносно збору та обробки даних, внесення їх в базу та ін.

**Основна частина дослідження.** Геоінформаційна система автоматизує процедури аналізу та прогнозу, дозволяє побудувати на основі цього модель того чи іншого явища. Ефективність роботи сільськогосподарських підприємств залежить від інформованості про стан земель, посівів та здатності системно аналізувати наслідки проведених робіт та заходів. Таку інформованість забезпечують дані дистанційного зондування землі (ДЗЗ), які пізніше, після дешифрування, опрацьовуються у геоінформаційних системах [5].

Впровадження комп'ютерних технологій дозволяє не тільки значно спростити формування інформаційних баз даних і понизити вірогідність виникнення помилок, але й запровадити нові методи підтримки ухвалення управлінських рішень на основі аналізу даних та зрештою, підняти продуктивність праці. Оскільки практично вся інформація про ресурси сільського господарства має просторову прив'язку, очевидно, що як базові інформаційні технології краще всього використовувати геоінформаційні системи. Насправді, головна перевага сучасних засобів побудови ГІС – їх точність і сумісність з іншими інформаційними технологіями (ІТ) та системами обробки даних [5].

Для створення і ведення карт та баз просторових даних сільськогосподарського призначення пропонується програма Digital – програмне забезпечення, яке призначене для вирішення завдань цифрової картографії й землевпорядкування в сільському господарстві (рис. 1).

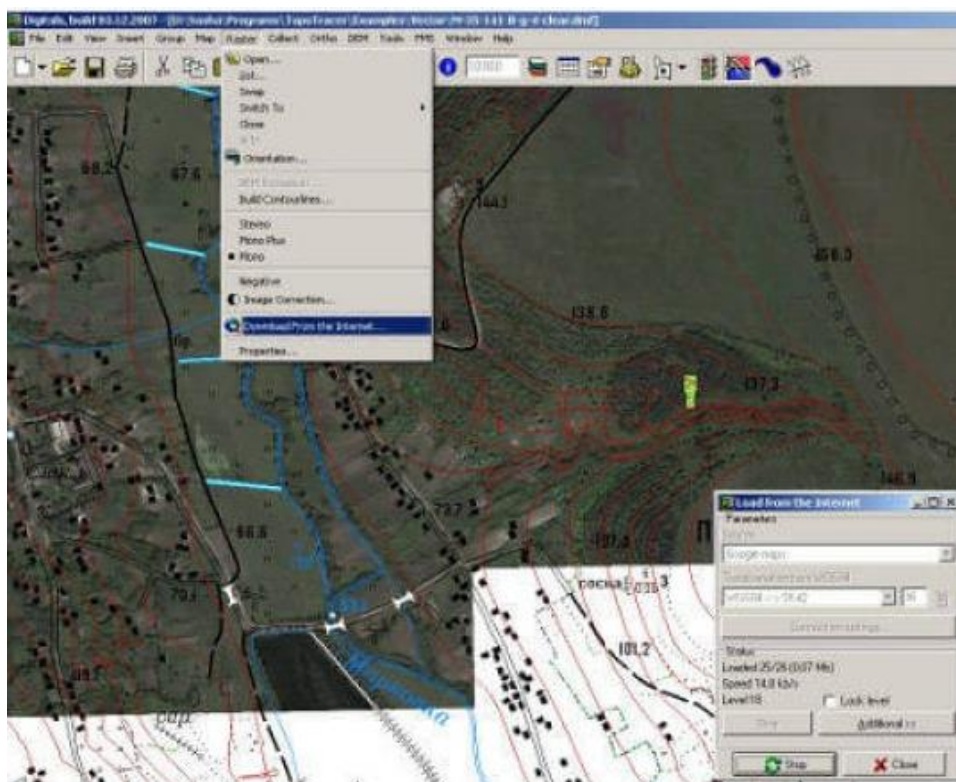


Рис. 1. Робота з растровими зображеннями в програмі Digitalis

Серед основних можливостей програми Digitalis:

- розвинені засоби редагування карт та планів;
- робота з растровими зображеннями;
- завантаження супутникових знімків з Google Maps і Virtual Earth;
- вставка в карту й зшивка безлічі растрів;
- мережевий режим роботи;
- розширюваність програми;
- відображення карт у тривимірному вигляді [6].

Виокремлюють два види Digitalis: Standard містить всі основні можливості: створення цифрових карт в умовних знаках, читання й запис In4 та інших форматів, моделювання рельєфу, розрахунок площ і об'ємів, друк держактів та інших графічних документів.

Digitalis Professional, крім перерахованих функцій, дозволяє працювати з растровими зображеннями, а також зберігати карти на SQL-сервері, з відкритим доступом для користування.

Важливим чинником інформатизації сільського господарства, у тому числі і впровадження ГІС, є віддаленість користувачів (фахівців господарств) від крупних міст, що мають розвинену інформаційну інфраструктуру. Програма DIGITAL може працювати і з локальними даними, що знаходяться на тому ж комп'ютері, і будь-якими іншими наборами даних, доступними через Інтернет за допомогою інтернет-сервера.

Постає перевага Digitalis в тривимірному проектуванні. Будь-яка відкрита в Digitalis карта може бути подана як тривимірна сцена, яку можна обертати і переміщати, розглядаючи з усіх сторін. Цей режим перегляду (Перегляд «Тривимірний») зручний для виявлення помилок присвоєння висот точок.

Режим 3D у вікні Навігатора надає вам змогу оперативно розглядати будь-який позначений об'єкт або групу об'єктів у тривимірному вигляді (рис. 2) [6].

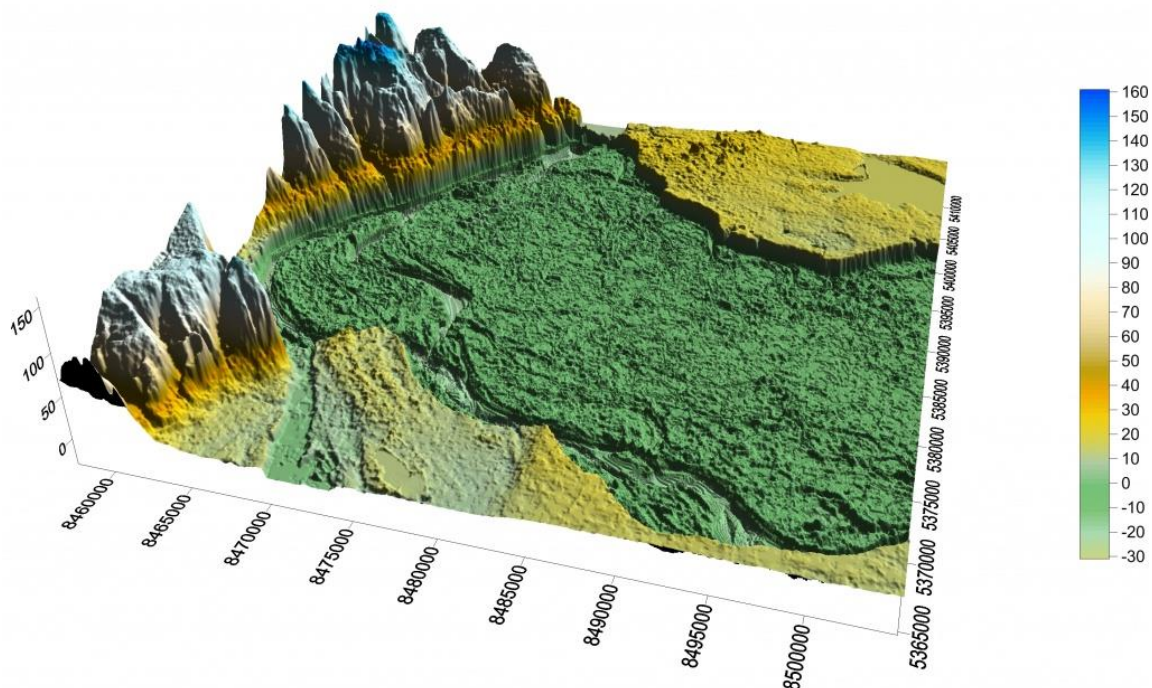


Рис. 2. Тривимірна цифрова модель місцевості (ЦММ) і рельєфу (ЦМР)

Геоінформаційні технології значно покращать роботу в сільському господарстві саме у фермерській діяльності. Ці переваги включають зниження споживання води, поживних речовин та добрив, зниження негативного впливу на навколишню екосистему, зменшення хімічного стоку у місцеві ґрунтові води та річки, підвищення ефективності, зниження цін та багато іншого. Таким чином, бізнес стає економічно вигідним, розумним та стійким [6].

Оскільки поля залежать від місцезнаходження, ГІС-технологія стає неймовірно корисним інструментом з точки зору точного сільського господарства. Використовуючи геоінформаційні технології в сільському господарстві, виникає можливість скласти карту поточних і майбутніх змін кількості опадів, температури, врожайності, здоров'я рослин. Також ці технології дозволяють використовувати результати на основі GPS, сумісні з інтелектуальними технологіями для оптимізації внесення добрив та пестицидів у сільському господарстві [5].

Ще однією великою перевагою ГІС-технологій в сільському господарстві є використання супутників та дронів для збору цінних даних про рослинність, ґрунтові умови, погоду та рельєф. Такі дані значно покращують точність прийняття рішень у сільському господарстві.

Прогнозування врожайності, а також проведення моніторингу полів практично в реальному часі з метою виявлення різноманітних загроз за допомогою супутникових даних ще ніколи не було таким простим, як із застосуванням інноваційних технологій в сільському господарстві.

Датчики здатні давати зображення в різних спектрах, що дозволяє застосовувати численні спектральні індекси, такі як: нормалізований диференційований вегетаційний індекс (NDVI). NDVI дозволяє визначити вміст рослинності, кількість зів'язаних рослин та загальний стан здоров'я рослин. Індекс вмісту хлорофілу в покривах (CCCI), який допомагає при внесенні поживних речовин у сільському господарстві. Нормалізований індекс RedEdge (NDRE) визначає вміст азоту. І

нарешті, модифікований ґрунтово-корегований вегетаційний індекс (MSAVI), призначений для мінімізації впливу ґрунтового фону на самих ранніх стадіях розвитку рослин.

За допомогою сучасних інноваційних технологій в сільському господарстві, таких як дрони або безпілотники, фахівці в сільському господарстві мають можливість з високою точністю визначати біомасу врожаю, висоту рослин, наявність бур'янів та насиченість водою на певних ділянках поля. Вони надають більш якісні і точні дані з вищою роздільною здатністю порівняно зі супутниками. Коли вони працюють на місцях у сільському господарстві, то надають цінну інформацію навіть швидше, ніж розвідники. Дрони також вважаються неперевершеними помічниками у боротьбі з комахами, навала попереджається шляхом застосування інсектициду на небезпечних зонах за допомогою безпілотних технологій, при цьому зменшується ймовірність прямого впливу, що призводить до отруєння хімічними речовинами [7].

Розробки в Україні ведуться у напрямку збільшення використання дронів та літальних апаратів в сільському господарстві. Ця думка співпадає із позицією Національної аграрної академії наук, що говорить про безконтактний (дистанційний) моніторинг, саме це має дозволити у майбутньому замінити вже наявні системи моніторингу ґрунтів. Загалом зазначимо, що є основні позитивні моменти, які дають змогу українським розробкам успішно конкурувати з іншими методами дистанційних досліджень. Найбільш важливою перевагою серед інших джерел дистанційного зондування є виконання аерофотозйомки (АФЗ) у визначений час, а саме кінцевим замовником зйомки, власником. Серед інших переваг використання дронів є:

- помірна або однакова ціна порівняно з космічними знімками, за кращої якості знімка;

- отримання знімків можливе прямо в процесі польоту й періоду чекання (5–6 діб) не існує (якщо треба, можна скорегувати політ згідно з вимогами користувача в реальному часі);

- висока роздільна здатність знімків (до 5 см і менше) — висота польоту на висотах 100–600 м над поверхнею Землі, що дозволяє отримувати плани місцевості в масштабах навіть М 1:100;

- можливість зйомки під хмарами у видимому діапазоні електромагнітних хвиль;

- можливість зйомки тільки одного поля чи його частини [7].

Дрони в сільському господарстві виконують різноманітні операції:

- аерофотозйомка для виявлення пущирів, загибелі врожаю після впливу природних факторів та інших дефектів, які потребують своєчасного усунення, загалом моніторингу земель;

- відеозйомка надає продуктивності літального апарату при відеозйомці сягає 30 км на 1 год, що істотно знижує часові та фінансові витрати порівняно з використанням наземної техніки;

- 3D-моделювання дає змогу визначати перезволожені або посушливі території, виїмку ґрунту, з точністю створювати плани і карти зволоження або осушення ґрунту, рекультивації ділянок або меліорації земель;

- тепловізійна зйомка здійснюється із застосуванням усього спектру інфрачервоного випромінювання: ближнього, середнього і дальнього діапазону. Дослідження дає можливість визначити терміни диференціювання точок зростання, що безпосередньо впливає на врожайність і збереження продуктивних властивостей рослин зі збереженням спадкових можливостей сорту;

- лазерне сканування застосовується для аналізу місцевості на важкодоступних або недоступних територіях. Цей метод забезпечує отримання точної моделі високої щільності з детальним відображенням

рельєфу навіть при роботі в умовах сильної загущеності насаджень;

- обприскування, завдяки можливості дооснащення, дрони використовують для точкового обприскування рослин і плодових дерев. Такий підхід дозволив фермерам обробляти тільки хворі рослини, виключаючи потрапляння хімікатів на решту врожаю (рис. 3).

- посадка насіння, апарати оснащують спеціальними датчиками, які точково виявляють заражені зони посівів, точково наносять добрива і поливають рослини. За три години безпілотник може засіяти 10 км<sup>2</sup> землі. Людині для цього потрібна доба. По суті, виробники експериментують зі специфічними системами, які запрограмовані розкидати насіння в підготовлений ґрунт [7].



Рис. 3. Дрон в процесі обприскування

Попри всі переваги, є два недоліки у використанні дронів:

Їх не можна експлуатувати під час сильного вітру, дощу, грози і при низьких температурах. Впровадження дронів – недешеве задоволення. Поки що його можуть дозволити тільки великі фермерські господарства.

Щоб спростити спостереження за сільськогосподарськими полями, в EOS запроваджують Crop Monitoring – цифрову платформу, яка використовує супутниковий моніторинг задля покращення процесів роботи в сільському господарстві [8].

Моніторинг врожаю дозволяє використовувати NDVI для відстеження стану врожаю у сільському господарстві. Цей індекс контролює кількість хлорофілу в рослинах, що дозволяє отримати інформацію про їх стан. Коли у вас вищі значення NDVI, ви маєте більш здорову рослинність, оскільки чим більше хлорофілу доступно рослині, тим вона здоровіше.

Застосування платформи Crop Monitoring значно полегшить роботу відповідно до моніторингу сільськогосподарських угідь в Україні, яка використовує супутникові дані задля того,

щоб забезпечувати аграріїв інформацією про стан їх полів та врожаю, сприяти підвищенню загальної ефективності підприємства, оптимізації витрат та росту прибутку.

Сервіс обробляє декілька індексів рослинності, серед яких найпопулярніший — NDVI, та історичні дані. В API-версії також доступні індекси EVI, SAVI, MSI. Також EOS Crop Monitoring проводить постійний моніторинг метеорологічної інформації: температури, рівня вологості, швидкості вітру, опадів.

Ще однією важливою особливістю сучасної інноваційної технології в

сільському господарстві Crop Monitoring є застосунок Scouting. Це як мобільний, так і десктопний застосунок, в якому використовуються цифрові карти полів. Використовуючи цю програму у сільському господарстві, спеціаліст може призначати розвідникам кілька завдань в пару кліків [8].

Виступає перевага в аналізі погодних даних, відповідно, про стан рослин, отриманих із супутникових знімків, що значно точно можна застосовувати полив та запобігати пошкодженню від морозу чи спеки. Одним словом це зумовлює створення супутникової екосистеми (рис. 4).

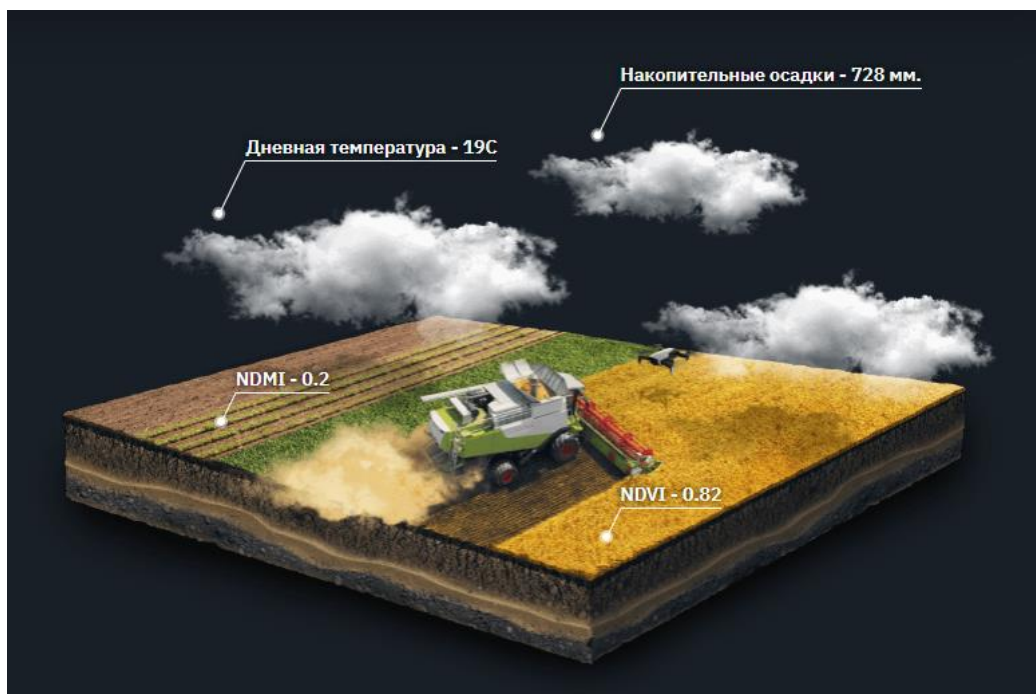


Рис. 4. Створення супутникової екосистеми

Найсильнішою перевагою Crop Monitoring є той факт, що він заснований на супутникових знімках. Він допомагає аналізувати польові умови сільського господарства або стан конкретних територій і оперативно отримувати цінну інформацію, тим самим прискорюючи оптимальний час

реакції, а також приймаючи надійні рішення — які сільськогосподарські культури висаджувати, коли збирати, як ефективно планувати в наступному сезоні, яку кількість поживних речовин та добрив застосовувати, та багато іншого (рис. 5.) [8].

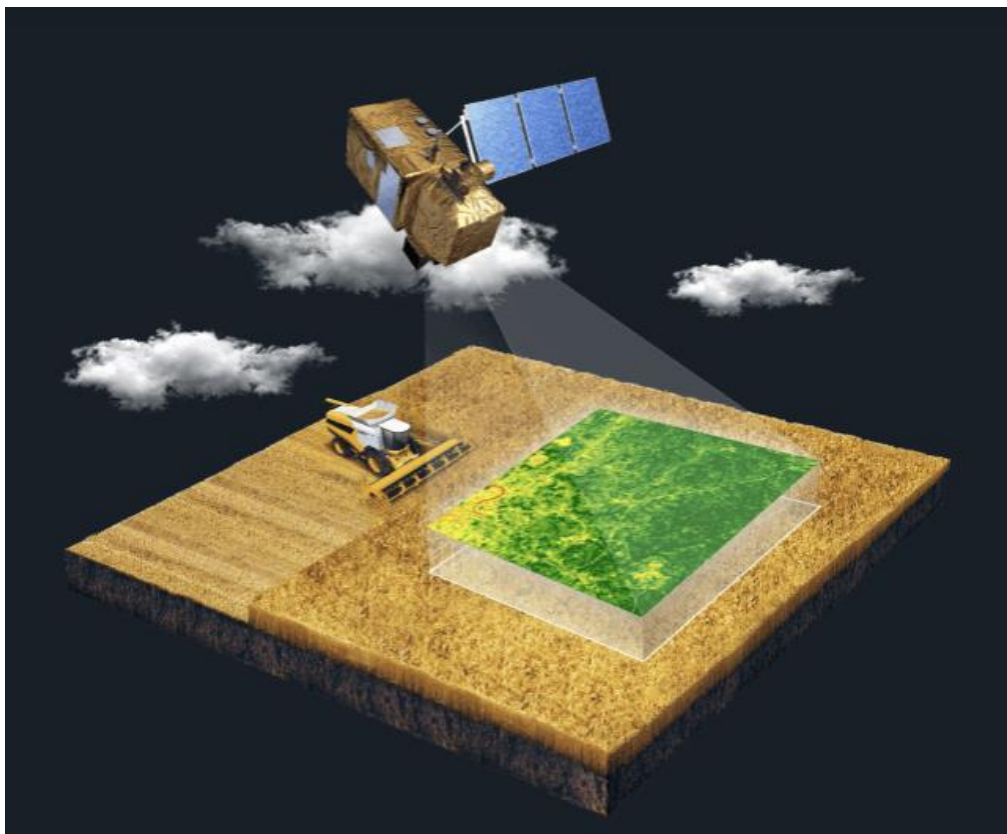


Рис. 5. Спостереження супутника на поле

**Висновки.** Перспективні ГІС-технології в сільському господарстві допоможуть рухатись в майбутнє швидким темпом. Вони надають істотну допомогу в зусиллях по оптимізації витрат, спрощенні управління сільським господарством та підвищенню продуктивності. Інноваційні технології сприяють підвищенню врожайності, забезпечують моніторинг погодних умов, поживних речовин в ґрунті. Ряд новітніх технологій значно спростить роботу при редагуванні карт та планів, роботу з растровими зображеннями та створення карт та зображень поля в тривимірному вигляді. Серед таких ГІС-технологій можна виокремити застосування дронів та літальних апаратів у сільському господарстві скорочує часові затрати на виконання робіт і збільшує ефективність певних процесів.

Digital є універсальним інструментом, що може вирішувати безліч різних завдань. Саме цей інструмент допомагає в обробці

геодезичних вимірювань та створення техдокументації на одну земельну ділянку, ведення чергових планів великих міст та індексно-кадастрових карт масштабу області. Вбудована мова скриптів дозволяє досвідченим користувачам ще більше розширити функціональність програми і максимально автоматизувати вирішення власних типових завдань.

Стор Monitoring дає свій внесок у глобальні зміни, об'єднуючи дані з космосу з прагненням людини до забезпечення розвитку в сільському господарстві. Головне точне землеробство за допомогою супутникових технологій, як загальна стратегія економії часу та ресурсів, скорочення витрат і збитків, отримання прибутку і впливу, з урахуванням всіх поточних змін.

При застосуванні вище наведених технологій піднімає галузь сільського господарства на високий рівень і відкриває нові можливості.

*Список використаних джерел*

1. Куйбіда В. С. Регіональний розвиток та просторове планування територій: досвід України та інших держав-членів Ради Європи. Київ, 2009. 176 с.
2. Руденко Л. Г., Чабанюк В. С., Бондарь А. Л. Концепція багатоцільової національної ГІС України. *Матеріали наук.-практ. семінару з геоінформаційних систем*. Київ, 1993. С. 4–33.
3. Адаменко О. В. Сучасний стан нормування точності геодезичних робіт під час будівництва інженерних споруд. *Інженерна геодезія*. Київ, 2014. Вип. 60. С. 6–11.
4. Церклевич Н. Л. Проблеми ведення кадастру нерухомості на території міст. *Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GPS і GIS технології: XIV Міжнародний наук.-техн. симпозіум*. Алушта: Львівська політехніка, 2009. С. 206–213.
5. Карпінський Ю. О. Стратегія формування національної інфраструктури геопросторових даних в Україні. Сер. Геодезія, картографія, кадастр. Київ: НДІГК, 2006. 107 с.
6. Цифровая аэрофотосъемка. ООО «Аналитика». URL: <http://vingeo.com/Rus/>.
7. Fly technology. URL: <https://flytechnology.ua/ru/dron-v-selhoz>.
8. Earth observing system. URL: <https://eos.com/ru/>.

---

Чигурян Ярослав Олександрович, магістрант, група 618М Чорноморського національного університету імені Петра Могили.

Яковенко Катерина Сергіївна, магістрантка, група 618М Чорноморського національного університету імені Петра Могили.

Chiguryan Yaroslav Aleksandrovych, Master, Group 618M of the Petro Mohyla Black Sea National University. ORCID ID: 0000-0001-6166-3500

Kateryna Yakovenko, Master Student, Group 618M of Petro Mohyla Black Sea National University. ORCID ID: 0000-0003-4418-1475. E-mail: [katiukha.yakovenko@gmail.com](mailto:katiukha.yakovenko@gmail.com)

Статтю прийнято 02.02.2022 р.

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ УКРАЇНСЬКОГО  
ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО  
ТРАНСПОРТУ**

**COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS OF THE  
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF RAILWAY  
TRANSPORT**

*Випуск 199*

«Збірник наукових праць УкрДУЗТ» включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що включаються до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 15.10.2019 р. № 1301).

Статті друкуються в авторській редакції мовою оригіналу.  
Всі статті пройшли подвійне сліпе наукове рецензування.

Відповідальний за випуск Новікова М. А.

---

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 24.03.2022 р.  
Формат паперу А4. Папір писальний.  
Умовн. друк. арк. 11,0. Тираж 55. Замовлення № .

Видавець Український державний університет залізничного транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018р.