КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

КНУБА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

УКРАЇНСЬКА РАДА ІНЖЕНЕРІВ-БУДІВЕЛЬНИКІВ

БУДІВЕЛЬНА ПАЛАТА УКРАЇНИ

АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ»

VII Міжнародна науково-практична конференція

«ЕНЕРГООЩАДНІ МАШИНИ І ТЕХНОЛОГІЇ»

19-20 травня 2026 року

Матеріали конференції

Київ 2026

Рекомендовано до друку Вченою радою Київського національного університету будівництва і архітектури (протокол №43 від 28.05.2026 р.)

Рецензенти:
О.Ф. Луговський, доктор технічних наук, професор
І.В. Кузьо, доктор технічних наук, професор
І.М. Берник, доктор технічних наук, доцент

Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Енергоощадні машини і технології»

Установа-організатор конференції:
Київський національний університет будівництва і архітектури

«Енергоощадні машини і технології», Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції, 19-20 травня 2026 р. К.: КНУБА, 2026. 274 с.

До збірки включено матеріали, які стосуються енергоощадних машин, теорії їх дослідження, принципів створення і впровадження, інноваційних технологій створення енергоощадних систем в умовах сучасного будівництва, методів моделювання систем, моніторингу і діагностики технічних об'єктів.

Матеріали тез розраховані на викладачів, науковців та спеціалістів, що працюють в галузі теоретичних досліджень та практичного застосування енергоощадних машин і технологій, а також на студентів і аспірантів технічних ЗВО, фахівців науково-дослідних організацій та підприємств

Відповідальний за випуск – професор кафедри машин і обладнання технологічних процесів, д.т.н., професор Назаренко І.І.

Редакційна колегія:
І.І. Назаренко – д.т.н., професор кафедри машин і обладнання технологічних процесів – головний редактор;
О.П. Дєдов – д.т.н., професор кафедри машин і обладнання технологічних процесів;
О.С. Дьяченко – к.т.н., доцент кафедри машин і обладнання технологічних процесів;
Д.О. Савчук – асистент кафедри машин і обладнання технологічних процесів.

Матеріали друкуються в авторській редакції.

© Київський національний університет будівництва і архітектури, 2026
© Автори статей, 2026

ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ

Голова програмного комітету:

Дніпров Олексій Сергійович, д.ю.н., ст.досл., ректор Київського національного університету будівництва і архітектури (КНУБА).

Заступники голови програмного комітету:

Куліков Петро Мусійович, д.е.н., професор, голова Вченої ради Київського національного університету будівництва і архітектури (КНУБА).

Ковальчук Олександр Юрійович, к.т.н., професор, проректор з наукової роботи та інноваційного розвитку Київського національного університету будівництва і архітектури.

Назаренко Іван Іванович, д.т.н., професор, професор кафедри машин і обладнання технологічних процесів Київського національного університету будівництва і архітектури, президент Академії будівництва України.

Члени програмного комітету:

Альтенбах Хольм, Магдебург, Німеччина.
Анджей Смолаж, д.т.н., професор, Люблін, Польща.
Барабаш М.С., д.т.н., професор, Київ.
Берник І.М., д.т.н., професор, Київ**.**
Бобир М.І., д.т.н., професор, Київ.
Троян В.В., д.т.н., професор, ЕТН Цюріх, Цюріх, Швейцарія.
Гурський В.М., д.т.н., доцент, Львів.
Данильченко Ю.М., д.т.н., професор, Київ.
Євсєєва Г.П. д.н.д.у., професор, Дніпро.
Згалат-Лозинська Л.О., д.е.н., професор, Київ.
Ковров А.В., к.т.н., професор, Одеса.
Кузьо І.В., д.т.н., професор, Львів.
Ланець О.С., д.т.н., професор, Львів.
Лич В.М., д.е.н., професор, Київ.
Лізунов П.П., д.т.н., професор, Київ.
Ловейкін В.С., д.т.н., професор, Київ.
Луговський О.Ф., д.т.н., професор, Київ.
Нестеренко М.М., к.т.н., доцент, Полтава.
Ніколаєв В.П., д.е.н., професор, Вроцлав, Польща.
Онищенко А.М., д.т.н., професор, Київ.
Оніщенко В.О., д.е.н., професор, Полтава.
Паламарчук І.П., д.т.н., професор, Київ.
Перегінець І.І., к.т.н., Київ.
Петрина Ю.С., д.т.н., професор, Берлін, Німеччина.
Петраков Ю.В., д.т.н., професор, Київ.
Поліщук Л.К., д.т.н., професор, Вінниця.
Рижакова Г.М., д.е.н., професор, Київ.

Роговський І.Л., д.т.н., професор, Київ.
Савицький М.В., д.т.н., професор, Дніпро.
Саленко Ю. С. д.т.н., професор, Кременчук.
Сташевський С.Т., к.т.н., Київ.
Струтинський В.Б., д.т.н., професор, Київ.
Стоцько З.А., д.т.н., професор, Львів.
Стричек Ярослав, Вроцлав, Польща.
Ткаченко Т.М., д.т.н., професор, Київ.
Тугай О.А., д.т.н., професор, Київ.
Шилюк П.С., к.т.н., професор, Київ.
Федоровська Н.В., д.т.н., професор, Харків.
Хмара Л.А., д.т.н., професор, Дніпро.
Якоб Клейман, PhD, професор, Торонто, Канада

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ

Голова оргкомітету:

Назаренко Іван Іванович, д.т.н, професор, професор кафедри машин і обладнання технологічних процесів КНУБА, президент Академії будівництва України.

Заступники голови оргкомітету:

Дєдов Олег Павлович, д.т.н, професор, професор кафедри машин і обладнання технологічних процесів КНУБА.
Клименко Микола Олександрович, к.т.н., доцент, завідувач кафедри машин і обладнання технологічних процесів КНУБА.
Рашківський Володимир Павлович, к.т.н., доцент, завідувач кафедри будівельних машин КНУБА.

Члени оргкомітету:

Міщук Євген Олександрович, к.т.н., доцент.
Ручинський Микола Миколайович, к.т.н., професор.
Орищенко Сергій Вікторович, к.т.н., доцент.
Міщук Дмитро Олександрович, к.т.н., доцент.
Косминський Ігор Владленович, к.т.н., доцент.
Савчук Дмитро Олегович, асистент.

Секретар конференції:

Дьяченко Олександр Сергійович, к.т.н., доцент.

СЕКЦІЯ 1
«ЕНЕРГООЩАДНІ ЗАСОБИ МЕХАНІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ВІДНОВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ І СПОРУД»

FORMATION OF ACTIVE MIXING ZONES IN A GRAVITY CONCRETE MIXER 14
Rostyslav Rudyk[1], ,Roman Salnikov[1], Viktor Virchenko[1],
[1] National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Vitaliia Hrytsaienka, 24, 36011, Ukraine

MODELING OF CONSTRUCTION MIXTURE MIXING PROCESS BASED ON A STOCHASTIC APPROACH 17
Yurij Kuzub[1], Viktor Virchenko[1],
[1] National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Vitaliia Hrytsaienka, 24, 36011, Ukraine

INCREASING OPERATION EFFICIENCY OF EQUIPMENT FOR CONSTRUCTION MIXTURE PREPARATION 20
Viachelsav Polezhaiev[1],
[1] National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Vitaliia Hrytsaienka, 24, 36011, Ukraine

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА СИНХРОНІЗАЦІЯ МОБІЛЬНИХ АВТОНОМНИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ З БУДІВЕЛЬНОЮ ТЕХНІКОЮ, ЩО ПРАЦЮЄ НА ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛАХ ЕНЕРГІЇ 23
Гетьман Вячеслав[1], Васильченко Антон[1],
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ТА БУДІВЕЛЬНІ МАШИНИ У ВИРОБНИЧО-ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМАХ 26
Микола Ручинський[1],
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

RESEARCH OF NOZZLE GEOMETRIC PARAMETER INFLUENCE ON BUILDING MORTAR FLOW PROCESS 30
Roman Salnikov[1], Rostyslav Rudyk[1], Viktor Virchenko[1],
[1] National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Vitaliia Hrytsaienka, 24, 36011, Ukraine

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ МІНІ-НАВАНТАЖУВАЧІВ ДЛЯ РОБОТИ В СКЛАДНИХ УМОВАХ 33
Богдан Федишин [1], Дмитро Кривошия[1],
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТРАДИЦІЙНИХ І СУЧАСНИХ МАШИН ДЛЯ НОВОГО БУДІВНИЦТВА ТА РЕКОНСТРУКЦІЇ 36
Катерина Мішук[1], **Сусанна Пастухова**[1], **Владислав Кузнєцов**[1],
[1] Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні Запорізький національний університет, проспект Соборний, 226, 69000, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ БАШТОВИХ КРАНІВ В УМОВАХ ВИСОКОЇ УРБАНІЗАЦІЇ МІСТ 41
Денис Науменко[1], **Дмитро Міщук**[1],**Максим Балака**[1],
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил, 31, 03037, Україна

ОПИС ДИНАМІКИ ГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДУ МЕХАНІЗМУ ПІДІЙМАННЯ СТРІЛИ КРАНА-МАНІПУЛЯТОРА 44
Дмитро Міщук[1], **Євгеній Горбатюк**[1], **Максим Балака**[1],
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил, 31, 03037, Україна

ВПЛИВ ФОРМИ НАКОНЕЧНИКА ГЛИБИННОГО ВІБРАТОРА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ УЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННОЇ СУМІШІ 47
Микола Нестеренко[1], **Володимир Гавріков**[1],
[1]Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка 24, 36011, Україна

НАУКОВІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ ВІБРАЦІЙНИХ МАШИН ІЗ КЕРОВАНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ВІБРОЗБУДЖЕННЯ 50
Микола Нестеренко[1],
[1]Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка 24, 36011, Україна

АКТУАЛЬНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ НАЗЕМНИХ РОБОТИЗОВАНИХ ТРАНСПОРТНИХ ПЛАТФОРМ В ПРОЦЕСАХ ОБСТЕЖЕННЯ ТЕРИТОРІЙ І СПОРУД У ПОТЕНЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕГІОНАХ 53
Олександр Дьяченко[1], **Євген Міщук**[1], **Павло Кривченков**[1],
[1]Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

МОБІЛЬНИЙ ПІДЙОМНО-ТРАНСПОРТНИЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ АВТОМОБІЛІВ У ОБМЕЖЕНИХ УМОВАХ 57
Сергій Білоконь[1],
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

РУХОМИЙ ОПАЛУБНИЙ МОДУЛЬ СТРІЧКОВОГО ТИПУ ДЛЯ ЗВЕДЕННЯ АРОЧНИХ ТА ВЕРТИКАЛЬНИХ СТІН АНАЛІЗ 60
Юрій Заєць[1], **Ірина Дубовик**[1],
[1]Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНОГО РІШЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МОСТОВОГО КРАНА ВАНТАЖОПІДЙОМНІСТЮ 40 ТОНН ДЛЯ ЗАВОДУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ВИРОБІВ 62
Павло Прищепа[1], **Микола Клименко** [1], **Вадим Степанчук**[1], **Роман Ковбан**[1],
[1]Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

СЕКЦІЯ 2
«ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ В УКРАЇНІ»

RENOVATION OPTIONS COMPARATIVE ANALYSIS OF A SEWER TUNNEL COLLECTOR BY LIMIT STATES 68
Alevtyna Aleynikova[1], **Svitlana Yesakova**[1], **Ihor Voronenko**[1,2], **Borys Sorokin**[2],
[1]O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine
[2]Municipal enterprise «Kharkiv Thermal Networks» in Kharkiv, Ukraine

ФОРМУВАННЯ БАГАТОШАРОВИХ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ВІНІЛЕСТЕРНИХ СМОЛ ДЛЯ ЗАХИСТУ КАНАЛІЗАЦІЙНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ 71
Олексій Кабусь[1], Анна Скрипинець[1], Олександр Гук[1],
[1]Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Чорноглазівська, 17, 61002, м. Харків, Україна

АНАЛІЗ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА МЕТОДІВ ТЕРМІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ ВІДВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ ЗЕМЛЕРИЙНИХ МАШИН 75
Богдан Федишин [1], Русла Дідик [1],
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНАЛІЗ ПОВОЄННОЇ ВІДБУДОВИ З ВПРОВАДЖЕННЯМ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ СТАЛОГО РОЗВИТКУ НА ПРИКЛАДІ СМТ. БОРОДЯНКА 78
Олександр Молодід[1], Володимир Рашківський[1],
[1]Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

ОРГАНІЗАЦІЙНІ ПРИНЦИПИ ВИКОРИСТАННЯ КОМПЛЕКТУ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ ПРИ БУДІВНИЦТВІ БУДИНКІВ ФОРМАТУ BUSINESS HOUSE 82
Іван Перегінець[1], Георгій Хіоні[2],
[1]Науково-технічний центр Академії будівництва України, м. Київ, вул. Освіти, 4, 03037, Україна
[2]Академія будівництва України, м. Київ, вул. Освіти, 4, 03037, Україна

LIFTING AND LOWERING MECHANISM OF A GRAVITY-BASED ENERGY STORAGE SYSTEM 85
Maksym Tomilov[1],
[1]Kyiv National University of Construction and Architecture, Povitryanykh syl ave. 31, 03037, Ukraine

СЕКЦІЯ 3
«МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ, МОНІТОРИНГ І ДІАГНОСТИКА ТЕХНІЧНИХ ОБ`ЄКТІВ»

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ОБОЛОНОК МІНІМАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ В УМОВАХ ТЕРМОСИЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ 88
Олександр Кошевий[1], Олексій Тимченко [1],
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ СТІЙКОСТІ АЛЮМІНІЄВИХ ОБОЛОНОК ПРИ ТЕРМОСИЛОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ 92
Олександр Кошевий[1], Остап Літков[1],
[1]Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ТОНКОСТІННИХ ОБОЛОНОК В УМОВАХ ТЕМПЕРАТУРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ 95
Олександр Кошевий[1], Микола Йовко[1],
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ СТІЙКОСТІ І ВАГИ ОБОЛОНКИ МІНІМАЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ З УРАХУВАННЯМ ГЕОМЕТРИЧНОЇ НЕЛІНІЙНОСТІ ПРИ СИЛОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ 99
Олександр Кошевий[1], Артур Смоленський[1],

[1]Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

ІДЕАЛІЗОВАНА МОДЕЛЬ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗОНИ ФАКТИЧНОГО КОНТАКТА ГЕТЕРАГЕННИХ МАТЕРІАЛІВ НА ПРИКЛАДІ БЕТОНУ 102
Єгор Волков[1], Сергій Ільїн[1],
[1] Запорізький національний університет,96011,Україна

ПІВДЕННОУКРАЇНСЬКА АЕС ЯК ОБ'ЄКТ ПІДВИЩЕННОЇ НЕБЕЗПЕКИ: СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО МОНІТОРИНГУ 105
Вячеслав Курепін[1],
[1]Миколаївський національний аграрний університет, вулиця Георгія Гонгадзе, 9, Миколаїв, Миколаївська область, 54000, Україна

CFD-АНАЛІЗ ПОВІТРОРОЗПОДІЛУ В ПРИМІЩЕННЯХ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ HVAC-СИСТЕМ 110
В'ячеслав Джеджула[1],
[1]Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, 21021,м.Вінниця, Україна

ВПЛИВ СИНХРОНІЗАЦІЇ ІНЕРЦІЙНИХ ВІБРОЗБУДЖУВАЧІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ВІБРАЦІЙНОГО КОНВЕЄРА 114
Юрій Тікан[1], Тетяна Нестеренко[1], Микола Нестеренко[1],
[1]Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка 24, 36011, Україна

ВПЛИВ ФОРМИ КОЛИВАНЬ КОНТЕЙНЕРА НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ВІБРАЦІЙНОЇ ОЧИСТКИ ДЕТАЛЕЙ 118
Микола Нестеренко[1], Тетяна Нестеренко[1], Дмитро Бодак[1],
[1]Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка 24, 36011, Україна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ВІБРАЦІЙНИХ ВНУТРІШНЬОТРУБНИХ РОБОТІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В РЕЖИМАХ КОВЗАННЯ ТА КОЧЕННЯ 122
Віталій Корендій[1], Олександр Качур [1], Максим-Павло Зелінський [1], Анна Похмурська[1],
[1] Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери 12, 79013, Львів, Україна

ANALYTICAL MODEL OF TRANSIENT AERODYNAMIC LOADING FOR ASSESSING THE STABILITY OF TOWER CRANE METAL STRUCTURES 127
Ievgenii Gorbatyuk[1], Oleksandr Terentiev[1], Volodymyr Sliusar[1],
[1] Kyiv National University of Construction and Architecture, 31 Povitroflotskyi Ave., 03037, Kyiv, Ukraine

RESEARCH OF RELIABILITY PARAMETERS OF THE SPACER PLATE OF A JAW CRUSHER 130
Ivan Nazarenko[1], Yevhen Mishchuk[1], Viktor Nechyporuk[1] ,
[1] Kyiv National University of Construction and Architecture, 31 Air Force Avenue, 03037, Ukraine

МОНІТОРИНГ ВИСОТНИХ СПОРУД: ПЕРЕХІД ВІД ЯКІСНОЇ ОЦІНКИ ЗА ШКАЛОЮ MSK-64 ДО ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ PGA 133
Сергій Щербина[1], Василь Мостовий[2], Михайло Довбнич[3], Вячеслав Егупов[4], Анаталій Фещенко[1],
[1]Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, пр Палладіна, 32, м. Київ, Україна.
[2]Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Чоколівський бульвар, 13, м. Київ, Україна.
[3]Національний ТУ «Дніпровська політехніка», пр. Д.Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна.
[4]Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Одеса, Україна.

ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ АЛГОРИТМІВ В СИСТЕМАХ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН 136
Богдан Трощинський[1], Вадим Луценко [1], Ольга Бондарчук[1], Микола Самойленко[1],
[1]Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ШУМОВОГО ВПЛИВУ У ВИМІРЮВАЛЬНОМУ КАНАЛІ НА ЯКІСТЬ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В СУШИЛЬНІЙ ШАФІ 139
Сергій Іносов[1], Вадим Луценко[1], Андрій Запривода[1], Олександр Гаврюков[1],
[1]Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ЛОКАЛІЗАЦІЇ АВАРІЙ У РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ МЕТОДОМ TW/TDOA 142
Антон Васильченко[1], Вячеслав Гетьман [1],
[1]Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

ФОРМАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБКИ ПРИНЦИПОВИХ СХЕМ ТА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ СЛІДКУЮЧОГО ТИПУ 145
Олександр Узунов[1],
[1]НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

INNOVATIVE APPROACHES TO DYNAMIC MONITORING OF BUILDING STRUCTURE USING POST-TENSIONED ROPES 148
Dmytro Savchuk[1], Volodymyr Vynokur[1],
[1] Kyiv National University of Construction and Architecture, Povitryanykh syl avenue 31, 03037, Ukraine

СТРУКТУРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ДЕМПФУВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ ГРАФІВ ЗВ'ЯЗКІВ 153
Валерій Яковенко[1], Сергій Орищенко[1], Євген Міщук[1],
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ЦЕМЕНТОБЕТОННИХ ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ ЗАСОБАМИ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ ТА ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ВІДПОВІДНО ДО МІЖНАРОДНИХ СТАНДАРТІВ 157
Іван Назаренко[1], Микола Кузьмінець[2], Артур Онищенко[2],
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна
[2] Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, 01010, Київ, Україна

BIM-ТЕХНОЛОГІЇ ЯК ІНСТРУМЕНТ ІНТЕГРОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ЕНЕРГООЩАДНИХ МАШИН БУДІВЕЛЬНОЇ ІНДУСТРІЇ: МЕТОДОЛОГІЯ ТА ПРАКТИКА ВПРОВАДЖЕННЯ 159
Микола Кузьмінець[1], Артур Онищенко[1], Сергій Колотинський[1], Роман Якобчук[1],
[1] Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, 01010, Київ, Україна

ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ НА ОСНОВІ ШІ ДЛЯ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ МАШИН ДЛЯ БУДІВНИЦТВА ДОРІГ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ 161
Микола Кузьмінець[1], Артур Онищенко[1], Сергій Колотинський[1],
[1] Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, 01010, Київ, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ НА ОСНОВІ АЛГОРИТМІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ТА МАСИВУ ДАНИХ 162
Микола Кузьмінець[1], Андрій Дудко[1], Юрій Дубовенко[1],
[1] Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, 01010, Київ, Україна

МЕТРОЛОГІЧНЕ ТА НОРМАТИВНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ ТРАНСПОРТУВАННЯ ВОДИ В УМОВАХ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ 164
Олена Фостащенко[1], Оксана Добровольська[1],
[1] Запорізький національний університет, проспект Соборний, 226, Запоріжжя, 69006, Україна

СЕКЦІЯ 4
«ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТА ЕНЕРГООЩАДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ПРОЦЕСАХ ОБРОБКИ ТА СТВОРЕННЯ МАТЕРІАЛІВ»

УДОСКОНАЛЕННЯ ЗБУДНИКІВ ДВОЧАСТОТНИХ ВІБРАЦІЙ З ВЯЗКИМ ТЕРТЯМ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ НА ЕФЕКТІ ЗОМЕРФЕЛЬДА 166
Володимир Яцун[1], Геннадій Філімоніхін[1], Єгор Гозбенко[1],
[1]Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, просп. Університетський 8, 25006, Україна

КУЛЬОВІ І РОЛИКОВІ ДВОЧАСТОТНІ ВІБРОЗБУДНИКИ, У ЯКИХ ТІЛА КОЧЕННЯ РОЗГАНЯЮТЬСЯ СИЛАМИ ОПОРУ КОЧЕННЮ 169
Володимир Пирогов[1], Андрій Гречка[1], Денис Герасимович[1],
[1]Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8, 25006, Україна

БЕТОНИ З ЗНИЖЕНИМИ ЕНЕРГОВИТРАТАМИ ТА ВИКОРИСТАННЯМ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ФОРМУВАЛЬНИХ СУМІШЕЙ 172
Тетяна Дехта[1], Сергій Бондаренко[1], Світлана Василенко[1], Олександр Морозевич[1],
[1]Український державний університет науки і технологій ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», м. Дніпро, вул. Архітектора Олега Петрова, 24а, 49128, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕТИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ВІБРОСТОЛУ З ВАЖІЛЬНИМ ЗАКРІПЛЕННЯМ ВІБРОЗБУДЖУВАЧА ЗА СПРОЩЕНОЮ КІНЕМАТИЧНОЮ МОДЕЛЛЮ 176
Юрій Коротич[1], Сергій Жигилій[1],
[1]Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка 24, 36011, Україна

ANALYSIS OF WAYS TO IMPROVE THE ENERGY EFFICIENCY FOR TRANSLUCENT STRUCTURES 179
Kateryna Pushkarova[1], Maryna Kochevykh[1], Olha Honchar[1], Ivan Semenyuk[1],
[1]*Kyiv National University of Construction and Architecture, Povitrianykh syl Ave 31, 03037, Ukraine*

SOME RESULTS OF SOLVING THE GENERALIZED CROSS-INDUSTRY INVENTIVE PROBLEM OF ENERGY-SAVING PROCESSING OF GRANULAR MATERIALS IN DRUM MACHINES BASED ON THE ESTABLISHED EFFECT OF AUTO-OSCILLATIONS SELF-EXCITATION 182
Kateryna Deineka[1], Yurii Naumenko[2], Serhii Zhabchyk[2],
[1]Rivne Technical Vocational College of the National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Vyshyvanka Street 35, 33027, Ukraine
[2]National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Soborna Street 11, 33028, Ukraine

НАПРЯМИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТА ЗМЕНШЕННЯ ЕНЕРГОЄМНОСТІ РОБІТ ЗЕМЛЕРИЙНОЇ ТЕХНІКИ 189
Богдан Федишин[1],
[1]Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ЕКСТРУЗІЙНОЇ НАСАДКИ НА ФОРМУВАННЯ ШАРУ БУДІВЕЛЬНОЇ СУМІШІ ПРИ 3D-ДРУЦІ 193
Денис Сідан[1], Тетяна Нестеренко[1], Микола Нестеренко[1],
[1]Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка 24, 36011, Україна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ ОГЛЯД ПЕРСПЕКТИВНИХ КОНСТРУКЦІЙ ВІБРОЗБУДНИКІВ ДЛЯ ЕНЕРГООЩАДНОГО ВІБРАЦІЙНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ 196
Віталій Корендій[1], Олег Паращин[1], Олександр Янів[1], Владислав Киричук[1],
[1] Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери 12, 79013, Львів, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОНОПЛЯНОГО УТЕПЛЮВАЧА 201
Юрій Цапко[1], **Олексій Цапко** [1], **Ольга Бондаренко**[1], **Оксана Бердник**[1], **Аліна Ющенко**[1],
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

ФЛЕГМАТИЗУВАННЯ АЗОТОМ СУМІШЕЙ ПОВІТРЯ З ПРОДУКТАМИ ПІРОЛІЗУ ЦЕЛЮЛОЗОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ 204
Юрій Цапко[1], **Олексій Цапко**[1], **Ольга Бондаренко**[1], **Оксана Бердник**[1], **Аліна Ющенко**[1],
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

ДВИГУНИ СТІРЛІНГА ТА РЕКУПЕРАЦІЯ ТЕПЛА В МОБІЛЬНИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОМПЛЕКСАХ 207
Ігор Косминський[1], **Андрій Довгаль**[2],
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна
[2] ТОВ "ІРМА, , вулиця Басейна 5А, 01004, Україна

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ БЕТОНУ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ: LCA-ПІДХІД 210
Марина Суханевич[1], Володимир Чахоян[1],
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВЕРТИКАЛЬНИХ ВАЛКОВИХ МЛИНІВ У СУЧАСНІЙ ЦЕМЕНТНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ 213
Микола Клименко[1], Тетяна Коса[2], Василь Марач[1], Дмитро Олійник[1],
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна
[2]Відокремлений структурний підрозділ «Інститут інноваційної освіти КНУБА», вул. Освіти, 4, 03037, Україна

СЕКЦІЯ 5
«ПРОБЛЕМИ ВИЩОЇ ОСВІТИ У ПІДГОТОВЦІ ФАХІВЦІВ У ВОЄННИЙ ТА ПОВОЄННИЙ ЧАС»

ТРАНСФОРМАЦІЯ МЕТОДИКИ ВИКЛАДАННЯ МАТЕМАТИКИ В УМОВАХ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ ПІД ЧАС ВІЙНИ 219
Іван Буценко[1], Ірина Безклубенко[1], Олена Баліна[1], Юрій Буценко[2],
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна
[2] Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна.

НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПРАКТИЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ ІНЖЕНЕРНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ 222
Олександр Дьяченко[1], **Євген Міщук**[1], **Максим Балака**[1],
[1]Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

СУЧАСНІ ЗДОБУТКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ НАУКОВОЇ ДІЯЛЬНОСТІ НА ФАКУЛЬТЕТІ МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТРАНСПОРТУ ВНТУ 226
Віктор Біліченко[1], **Леонід Поліщук**[1], **Сергій Сухоруков**[1],
[1] Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе 95, 21000, Україна

РОЗРОБКА УНІВЕРСАЛЬНОГО ВИНАХІДНИЦЬКОГО ІНСТРУМЕНТАРІЮ В МЕЖАХ ДИСЦИПЛІНИ ПАТЕНТУВАННЯ ТА ЛІЦЕНЗУВАННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ МАГІСТРІВ ТЕХНІЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ 229
Іван Назаренко[1], **Олег Дєдов**[1], **Ігор Косминський**[1],
[1]Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

СЕКЦІЯ 6
«ТЕОРЕТИКО-ПРАКТИЧНІ ТА КОГНІТИВНІ АСПЕКТИ РОЗВИТКУ ЕКОНОМІКИ І МЕНЕДЖМЕНТУ В БУДІВНИЦТВІ»

ЧЕТВЕРТА ПРОМИСЛОВА РЕВОЛЮЦІЯ В КОНТЕКСТІ РОЗВИТКУ ЕКОНОМІКИ В БУДІВНИЦТВІ 233
Юлія Чернявська[1], **Галина Гаман**[1], **Надія Лисиця**[1],
[1]Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АЛГОРИТМІЗАЦІЯ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БУДІВЕЛЬНОЇ ТЕХНІКИ НА БАЗІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ 236
Ігор Онофрійчук[1], **Андрій Росинський**[1],
[1]Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних Сил, 31, 03037, м. Київ, Україна

СЕКЦІЯ 7
«ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА»

АНАЛІЗ ВПЛИВУ НЕНАЛЕЖНОГО ПОВОДЖЕННЯ З ТВЕРДИМИ ПОБУТОВИМИ ВІДХОДАМИ НА ДОВКІЛЛЯ ТА ЗДОРОВ'Я НАСЕЛЕННЯ 240
Станіслав Душкін[1],
[1]Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків 61002, Україна

ОЦІНКА ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ПОЛІМЕРІВ ВІДХОДІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТА ЕЛЕКТРОННОГО ОБЛАДНАННЯ (ВЕЕО) 244
Євгеній Гречанюк[1], **Віталій Іщенко**[1],
[1]Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21000, Україна

IMPORTANCE OF GRAPHIC COMPONENT OF ENERGY MANAGEMENT PROCESS OPTIMIZATION USING THE EXAMPLE OF KYIV REGION 248
Oleksiy Zabarylo[1], **Yulia Korotkykh**[1], **Pavlo Zabarylo**[1],
[1] Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Air Force avenue 31, 03037, Ukraine

СУЧАСНІ СВІТОВІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ТА ОБРОБКИ ОСАДІВ У КОНТЕКСТІ ПЕРЕХОДУ ДО ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ 251
Сергій Проценко[1], Микола Кізєєв[1], Ольга Новицька[1], Наталія Кравченко[1],
[1]Національний університет водного господарства та природокористування, 11, вул. Соборна, м. Рівне, Україна, 33028

ГЛОБАЛЬНІ ВОДНІ РЕСУРСИ: ОСНОВНІ ПРОБЛЕМИ 254
Ігор Прокопенко[1], Олена Жукова[1], Павло Старжинський[1],
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

IMPACT OF LEAKS FROM EXTERNAL UTILITY NETWORKS ON CHANGES IN THE HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS OF THE TERRITORY OF THE NATIONAL KYIV-PECHERSK HISTORICAL AND CULTURAL RESERVE 258
Arsenii Taranenko [1], Iryna Cherevko[2],
[1]National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" 37 Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03056, Ukraine
[2]National Kyiv-Pechersk Historical and Cultural Reserve, 9 Lavrska St., Kyiv, 01015, Ukraine

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ АРЕАЛІВ ЗАБРУДНЕНЬ У ГІДРОСФЕРІ У ЗОНІ ВПЛИВУ ТЕС В УМОВАХ ВОЄННОГО ВПЛИВУ 262
Наталія Василів[1],
[1]Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ІОННОГО ОБМІНУ ПРИ ДЕМІНЕРАЛІЗАЦІЇ ВОДИ 268
Давід Ковтун[1],
[1] Національний університет цивільного захисту України, вулиця Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, Україна

РОЛЬ ЕКОЛОГІЧНОЇ БІОТЕХНОЛОГІЇ У ПЕРЕХОДІ ДО НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ ЕКОНОМІКИ (НА ПРИКЛАДІ КУЛЬТИВУВАННЯ CHLORELLA VULGARIS) 271
Любов Венгер [1, 2], Каріна Бєлоконь[1], Катерина Розсоха[1], Марія Брик[1],
[1]Запорізький національний університет, вул. Університетська, 66, 69600, Україна
[2]Національний університет «Львівська політехніка», площа Св. Юра 3/4, 79013, Україна

СЕКЦІЯ 1
«ЕНЕРГООЩАДНІ ЗАСОБИ МЕХАНІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ВІДНОВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ І СПОРУД»

FORMATION OF ACTIVE MIXING ZONES IN A GRAVITY CONCRETE MIXER

Rostyslav Rudyk, postgraduate student[1] (ORCID: 0000-0001-8386-977X),
Roman Salnikov, postgraduate student[1] (ORCID: 0009-0001-0408-4358),
Viktor Virchenko, candidate of technical sciences, associate professor[1] (ORCID: 0000-0002-5346-9545)
[1] National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Vitaliia Hrytsaienka, 24, 36011, Ukraine

ABSTRACT. *The study considers active mixing zone formation process in a gravity concrete mixer during cyclic construction mixture movement within drum working volume. Influence of drum angular velocity, particle motion trajectories, and blade geometry parameters on mixture circulation movement intensity was investigated. Conditions for particle transition into the active motion phase were established and the mechanism of intensive mixing zone formation was analyzed. Relationships considering particle movement, velocity field, shear deformations, and rheological properties of concrete mixture as a viscoplastic medium were used for process description. An approach for quantitative evaluation of active mixing zones based on determination of active to passive mixture volume ratio was proposed. It was established that increased active volume fraction promotes higher concrete mixture homogeneity and shorter mixing duration.*

Keywords: *gravity concrete mixer, concrete mixture, active zone, circulation movement, particle trajectory, velocity field, tensor, mixture homogeneity.*

Introduction. Concrete mixture mixing process in gravity concrete mixers is accompanied by nonuniform component movement within drum working volume, leading to formation of active and passive mixing zones. Presence of passive zones reduces particle interaction intensity, increases mixture preparation duration, and decreases homogeneity. Accordingly, investigation of active mixing zone formation patterns and determination of factors influencing component motion intensity within the concrete mixer drum are relevant tasks. Particular attention should be given to influence of blade design parameters and drum motion modes on construction mixture particle movement character and mixing process efficiency.

Concrete mixture homogeneity is one of the main factors determining physical mechanical characteristics of ready concrete, including strength, density, and durability. Insufficient mixing intensity leads to nonuniform distribution of cement paste, water, and aggregates within mixer working volume, negatively affecting ready material quality. In gravity concrete mixers, process efficiency largely depends on mixture motion character within the drum and capability of working bodies to ensure active particle movement throughout the entire mixture volume.

Passive zone formation within concrete mixer working volume is especially characteristic of operating modes with insufficient mixture circulation movement intensity. In such regions, mixture components move slowly or remain practically motionless for a long period, worsening the mutual mixing process. As a result, uniformity of cement paste and fine dispersed component distribution within the total mixture volume decreases, which can negatively influence physical mechanical characteristics of ready concrete.

Analysis of recent research and publications. Analysis of recent studies showed that higher concrete mixture mixing efficiency in gravity concrete mixers is achieved through intensification of component movement within drum working volume and reduction of passive mixing zones [1-2]. Considerable attention in modern studies is devoted to investigation of particle motion trajectories, shear zone formation, influence of blade design parameters, and drum rotation modes on mixture homogeneity. It was established that traditional mixing methods do not always ensure sufficient component movement intensity throughout the entire drum volume, leading to formation of local zones with low motion activity [3].

Research objective. Determination of active mixing zone formation patterns in a gravity concrete

mixer and establishment of influence of drum design and kinematic parameters on construction mixture particle motion intensity, component distribution uniformity, and mixing process efficiency.

Main part. In a gravity concrete mixer, active mixing zone formation occurs due to cyclic movement of construction mixture particles within drum working volume under action of gravitational and inertial forces [4]. During drum rotation, blades capture mixture particles and lift them to a certain height, after which the particles separate from the surface and enter a free fall regime. At this moment, zones of intensive circulation movement arise within the drum, forming active mixing zones. These zones provide the most effective redistribution of concrete mixture components and destruction of local material accumulations [5].

Active zone formation is accompanied by continuous particle movement between different mixture layers, resulting in higher interaction intensity and lower probability of local stagnant region formation. During circulation movement, particles repeatedly change motion direction, promoting uniform redistribution of concrete mixture components within drum working space and improving mixing conditions.

Condition for particle transition into the active motion phase is determined by equality between centrifugal force and gravitational force projection onto the radial direction

$$\omega^2 R = g \cos \varphi_0, \tag{1}$$

where ω – drum angular velocity, rad/s;

R – drum radius, m;

φ_0 – particle separation angle from the drum surface.

After separation, the particle moves along a trajectory whose height is determined by the following relation

$$h = R(1 - \cos \varphi), \tag{2}$$

where h – particle lifting height, m;

φ – particle lifting angle.

Particle lifting height directly influences energy of subsequent motion and mixing intensity within the drum. Increased lifting height leads to higher particle falling velocity and stronger particle interaction intensity, promoting activation of local material accumulation destruction process. At the same time, excessive increase in lifting height can lead to nonuniform mixture movement and higher energy consumption of the mixing process.

Active zone formation intensity is determined by mixture volume participating in circulation movement. A mixing activation coefficient is used for evaluation of this process

$$k_a = \frac{V_a}{V_p}, \tag{3}$$

where V_a – active mixing zone volume, m³;

V_p – passive zone volume, m³.

The mixing activation coefficient enables quantitative evaluation of drum working volume utilization efficiency during the mixing process. Increased coefficient values indicate involvement of a larger mixture portion in active circulation movement and reduction of passive zone volume. Such an approach enables evaluation of influence of blade design parameters and concrete mixer operating modes on active zone formation intensity.

Determination of the mixing activation coefficient also enables evaluation of efficiency for different gravity concrete mixer design schemes. Increased active mixture volume fraction improves material circulation conditions within the drum, promoting more uniform component distribution and higher efficiency of mixer drive energy utilization.

Within the formed active zones, local regions of intensive shear motion arise, characterized by significant velocity gradients and complex concrete mixture flow structures. A velocity gradient is used for description of the particle velocity field

$$\nabla v = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}, \quad (4)$$

where v_x, v_y, v_z – particle motion velocity components in corresponding directions.

Presence of significant velocity gradients within formed active zones indicates intensive momentum exchange between mixture layers. These regions create conditions for the most effective concrete mixture component mixing, since particle motion velocities differ substantially in neighboring flow layers.

Intensive mixing zones are characterized by occurrence of shear deformations described by the shear rate tensor

$$D = \frac{1}{2}\left(\nabla v + (\nabla v)^T\right), \quad (5)$$

where D – shear rate tensor.

Occurrence of shear deformations within concrete mixer working volume ensures destruction of local particle accumulations and intensifies the mixing process. The highest shear rate tensor values are observed in near wall regions close to the blades, where the most active mixture flows are formed.

Since concrete mixture exhibits viscoplastic medium properties during the mixing process, the Bingham model is used for description of its flow

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{dv}{dy}, \quad (6)$$

where τ – shear stress, Pa;

τ_0 – yield shear stress, Pa;

μ – dynamic mixture viscosity, Pa·s.

Application of the Bingham model enables consideration of concrete mixture rheological properties during movement within the mixer drum. This is especially important for investigation of active zone formation processes, since mixture viscoplastic properties substantially influence circulation movement intensity, particle motion character, and shear zone formation conditions.

Thus, active zone formation process in a gravity concrete mixer represents a complex multifactor system determined by interaction between drum kinematic parameters, blade geometry, and concrete mixture rheological properties. Rational combination of these parameters enables intensive component circulation movement, reduction of passive zone volume, and higher mixing process efficiency.

Performed analysis showed that active mixing zone formation depends on drum angular velocity, blade geometry, and mixture circulation movement intensity. Increased active volume fraction promotes improved concrete mixture homogeneity, shorter mixing duration, and higher gravity concrete mixer operating efficiency.

Conclusions. As a result of the performed studies, active mixing zone formation patterns in a gravity concrete mixer during cyclic construction mixture movement within drum working volume were established. It was determined that active zone formation intensity depends on drum angular velocity, particle motion trajectories, and blade geometry parameters. It was shown that particle transition into a free fall regime ensures formation of circulation flows promoting effective mixture component redistribution and reduction of passive zones.

An approach for quantitative evaluation of active mixing zones based on determination of active volume fraction within total mixture volume was proposed. It was established that increased active volume is accompanied by higher shear deformation intensity, improved concrete mixture homogeneity, and shorter mixing process duration. The obtained relationships can be used for justification of rational operating modes for gravity concrete mixers and improvement of working body design parameters.

References

1. Shirzadi Javid, A. A., Ghoddousi, P., Aghajani, S., Naseri, H., & Hossein Pour, S. (2020). Investigating the effects of mixing time and mixing speed on rheological properties, workability, and mechanical properties of self-consolidating concretes. International Journal of Civil Engineering, 19(3), 339–355. https://doi.org/10.1007/s40999-020-00562-z

2. Nazarenko Ivan, Klymenko Mykola (2020). Application of general energy assessment criteria for preparing building mixtures. KHNADU Bulletin, 2 (88), pp 37-42. https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2020.88.2.37
3. Rudyk, R., Salnikov, R. (2024). Analysis of the mixer geometry and rheology impact on concrete mixture mixing efficiency. Construction Engineering, Vol. 41, pp. 77–84. https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0409
4. Rudyk R. Y., Virchenko V. V., Salnikov R. Y., Kuzub Y. O. (2025). Mathematical modeling of the working body's oscillatory motion in a concrete mixer. Journal of Engineering Sciences (Ukraine), Vol. 12(2), pp. D45–D54. https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(2).d4
5. Rudyk, R., & Virchenko, V. (2025). Increasing the efficiency of gravity mixing for concrete mixtures. Construction Engineering, (42), 50–60. https://doi.org/10.32347/tb.2025-42.0506

MODELING OF CONSTRUCTION MIXTURE MIXING PROCESS BASED ON A STOCHASTIC APPROACH

Yurij Kuzub, postgraduate student[1] (ORCID: 0009-0006-8463-3914),
Viktor Virchenko, candidate of technical sciences, associate professor[1] (ORCID: 0000-0002-5346-9545)
[1] National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Vitaliia Hrytsaienka, 24, 36011, Ukraine

ABSTRACT. *The study considers construction mixture mixing process in a forced action mixer using a stochastic approach for description of component movement within working volume. Mixer working space is represented as a system of interconnected cells between which probabilistic mixture particle transitions occur under action of screw blades, shear deformations, and circulation flows. A transition matrix describing component redistribution patterns between separate mixer zones during the mixing process was developed. The mechanism of gradual homogeneous material distribution achievement within working volume is described and influence of transition parameters on mixing intensity is established. Possibility of proposed model application for mixing process evaluation efficiency and justification of rational design and operating parameters for mixing equipment is demonstrated.*

Keywords: *construction mixture, mixing, transition matrix, mortar mixer, cell model, screw blades, mixture homogeneity, stochastic modeling.*

Introduction. Construction mixture mixing process is one of the decisive stages of the technological cycle for concrete and mortar composition preparation, since ready material quality and efficiency of subsequent technological operations depend on component distribution uniformity. Insufficient construction mixture homogeneity can lead to deterioration of ready material physical mechanical characteristics, nonuniform component distribution, and lower construction work quality. Therefore, improvement of mixing process efficiency and determination of component movement patterns within mixer working volume are important tasks of modern construction machinery engineering. In forced action mixers, mixing is accompanied by complex spatial particle movement under influence of screw blades, shear deformations, inertial forces, and gravitational forces [1–2]. Under such conditions, application of stochastic approaches enabling description of mixture component redistribution process within mixer working volume becomes expedient. One such approach involves application of a probabilistic model in which material movement between separate drum zones is considered as a system of probabilistic transitions. This enables evaluation of mixture homogeneity achievement dynamics and establishment of influence of mixer design and operating parameters on mixing process efficiency. Application of mathematical models for investigation of mixing processes is especially relevant, since conducting a large number of experimental studies requires significant time and resource expenditures. Use of stochastic approaches enables evaluation of mixture component movement character and prediction of homogeneous state achievement rate depending on mixer design and operating parameters.

Analysis of recent research and publications. Analysis of modern studies showed that most scientific works devoted to construction mixture mixing processes focus on determination of mixer energy characteristics, influence of working body geometry, and medium rheological properties on mixing intensity [3–5]. Hydrodynamic, kinematic, and discrete element models are mainly used for description of

component movement in mixers [6]. At the same time, application of stochastic and probabilistic models for description of mixture particle movement within mixer working volume remains insufficiently investigated, especially considering local component redistribution between separate working space zones.

Research objective. Investigation of a stochastic model for construction mixture mixing process in a forced action mixer and determination of component redistribution patterns within working volume through description of probabilistic transitions between separate mixing space cells.

Main part. During stochastic model development, mixer internal volume is considered as a discrete system of separate cells between which mixture component movement occurs under action of screw blades. Each cell characterizes a local working volume zone containing a portion of material at a given time moment. Discrete representation of mixer working volume enables consideration of local mixture movement features in different drum zones. Under real conditions, the mixing process occurs nonuniformly, since regions of intensive circulation and shear deformations are formed near screw blades. At the same time, component movement velocity is lower in remote zones, influencing overall mixing intensity.

System state is described by a component distribution vector

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} \tag{1}$$

where $x_i(t)$ – relative mixture fraction in the i-th cell at time moment t.

To ensure preservation of total material mass, the normalization condition is satisfied

$$\sum_{i=1}^{n} x_i(t) = 1 \tag{2}$$

Physically, this means that during the mixing process the material does not disappear from the working volume and does not accumulate outside the system boundaries, but only changes its position between separate cells. Component movement occurs under action of screw blades, gravitational forces, and inertial effects arising during mixing body rotation.

The mixing process is described as a sequence of component transitions between neighboring cells. After each mixing cycle, material redistribution occurs according to transition probability matrix N. Then the system state at the next step is determined by the following relation

$$X(t+1) = N \cdot X(t) \tag{3}$$

The transition process between neighboring cells reflects real physical movement of construction mixture components inside the mixer. During each mixing cycle, particles repeatedly change their spatial position, forming circulation flows within working volume. Such repeated component position variation ensures gradual mixture concentration equalization.

During the mixing process, continuous mass exchange of mixture components occurs between separate working volume zones. Intensity of such mass exchange is determined by circulation flow velocity formed under action of mixer working bodies. The more active the exchange between neighboring cells, the faster the system approaches a homogeneous state.

The transition matrix characterizes probability of mixture component movement between separate mixer zones. The model assumes that a material portion can move to the previous cell, remain in the current cell, or move to the next cell. For this purpose, the following coefficients are introduced as

$$p + q + r = 1 \tag{4}$$

where p – backward transition probability,

q – probability of remaining in the current cell,

r – forward transition probability.

Transition coefficient values depend on mixer operating modes and physical mechanical properties of the construction mixture. Increased mixing body rotation speed raises intensity of component movement between neighboring cells, promoting faster achievement of a homogeneous mixture state. In addition, transition processes are substantially influenced by screw blade geometry parameters.

An important factor is also the number of cells into which mixer working volume is conditionally divided. Increased cell quantity enables more detailed description of local material redistribution processes, but simultaneously complicates the mathematical model and increases calculation volume during mixing process simulation.

Considering the local mixing character, the transition matrix acquires a band structure:

$$N = \begin{bmatrix} q & r & 0 & \cdots & 0 & p \\ p & q & r & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & p & q & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ r & 0 & 0 & \cdots & p & q \end{bmatrix} \quad (5)$$

The proposed band structure of the transition matrix corresponds to the local interaction character between neighboring working volume zones. Such an approach enables adequate description of gradual material movement inside the mixer without necessity for complex continuous flow description throughout the entire drum volume.

Such a structure corresponds to the physical process of mixture movement under action of screw blades, when primary material exchange occurs between neighboring working volume zones. Periodic boundary conditions are used for a closed drum, under which extreme cells interact with each other, ensuring cyclic mixing character.

Periodic boundary conditions correspond to closed mixer geometry in which the material continuously circulates within working volume. Due to this, extreme cells interact with each other, enabling avoidance of isolated stagnant zone formation and ensuring continuous mixture component redistribution.

Initial component distribution in the mixer is nonuniform, since after loading the material is localized within specific drum zones. During multiple transitions between cells, the distribution gradually equalizes. At the initial stage, mixture component concentration is localized within separate drum zones after material loading. During multiple transitions between cells, local concentration differences gradually decrease, leading to formation of a more homogeneous component distribution within mixer working volume.

The criterion for mixture homogeneity achievement is convergence of values in all cells to the same level

$$x_1 = x_2 = \cdots = x_n = \frac{1}{n} \quad (6)$$

The proposed stochastic approach can be used as a basis for computer simulation of construction mixture mixing process. Model implementation within a software environment enables investigation of component redistribution dynamics, analysis of transition matrix parameter influence, and evaluation of efficiency for different mixer operating modes without conducting a large number of experimental studies.

The obtained results can be used for further investigation of construction mixture mixing processes with varying consistency and density. In addition, the proposed approach creates possibilities for evaluation of efficiency of different mixing body designs and determination of rational equipment operating modes depending on technological mixture preparation conditions.

Thus, the stochastic model enables description of construction mixture mixing process as a sequential probabilistic redistribution of components between separate working volume zones, making it possible to evaluate mixing intensity and determine influence of mixer design and operating parameters on the rate of homogeneous mixture state achievement.

Conclusions. As a result of the performed studies, a stochastic model of construction mixture mixing process was developed, in which mixer working volume is represented as a system of interconnected cells with probabilistic component transitions between them. It was established that application of a transition matrix enables description of mixture redistribution process within the mixer and evaluation of homogeneous material state achievement dynamics.

It was shown that component distribution equalization rate depends on transition probability values between cells determined by screw blade design and mixer operating modes. The obtained model can be used for evaluation of mixing process efficiency and further justification of rational operating parameters

for mixing equipment.

References

1. Virchenko, V. (2011). Mixing of construction mortar solutions with the effective mixers. Bulletin of the Mykhailo Ostrohradskyi KNU, 1(66), 71–74.
2. Anishchenko, A., Aleinikova, A., Kovalenko, A., Nesterenko, M., & Nesterenko, T. (2023). Technological package of the small-sized equipment for preparation of products from polystyrene-concrete mixture. AIP Conference Proceedings, 2490(1), 050027. https://doi.org/10.1063/5.0143912
3. Blazhko, V. V., Anishchenko, A. I., Saienko, L. V., & Hryhorkiv, O. B. (2024). Small-sized complexes for the production of building mixtures for various purposes. Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University, 104, 70–74. https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.104.1.70
4. Salnikov, R., & Virchenko, V. (2025). Comparative analysis of mathematical models for the screw unit in small continuous-operation plastering machines. Construction Engineering, (42), 27–35. https://doi.org/10.32347/tb.2025-42.0503
5. Kuzub, Y., & Rudyk, R. (2025). Influence of spiral tape parameters mixer for mortar homogeneity. Scientific Bulletin of Construction, (112), 37–44. https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.112.1.37
6. Rudyk, R., & Salnikov, R. (2024). Analysis of the mixer geometry and rheology impact on concrete mixture mixing efficiency. Construction Engineering, 41, 77–84. https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0409

INCREASING OPERATION EFFICIENCY OF EQUIPMENT FOR CONSTRUCTION MIXTURE PREPARATION

Viachelsav Polezhaiev, postgraduate student[1] (ORCID: 0009-0007-2010-9088),
[1] National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Vitaliia Hrytsaienka, 24, 36011, Ukraine

ABSTRACT. *The study considers features of construction mixture preparation and transport processes in mixing feeding equipment combining a forced action mixer and a screw conveying unit. The influence of physical mechanical and rheological properties of construction mixtures with varying consistency on mixing and subsequent transport conditions is analyzed. It is shown that efficiency of the technological process depends on coordination between working body design parameters, operating modes, and movement conditions of the mixture within the mixer working volume and conveying channel.*

Analytical relationships describing construction mixture particle movement under blade working body action, circulation flow formation within the mixing chamber, and subsequent axial movement of the prepared mixture by the screw conveying unit are presented. The obtained relationships consider the influence of working body kinematic parameters, blade geometry, screw helix parameters, and mixture viscosity on mixing and transport conditions within a unified technological process. The presented results can be used for justification of rational design and operating parameters for construction mixture preparation and transport equipment.

Keywords: *construction mixture, forced action mixer, screw conveying unit, mixing, transport, working body, technological process, construction equipment.*

Introduction. Construction mixture preparation and delivery processes are an important component of modern construction, since they determine material technological property formation conditions and efficiency of construction and finishing operations. Construction and finishing operation quality largely depend on mixture homogeneity, preservation of structural mechanical characteristics, and continuous material delivery to the application location. Accordingly, improvement of mixing equipment capable of ensuring intensive component mixing with minimal energy consumption and coordination between mixture preparation and transport parameters within a unified technological process becomes especially important.

Construction mixtures, depending on liquid phase content and physical mechanical properties, can exhibit different mobility, internal friction, and component cohesion, which directly influence mixing conditions and subsequent movement within technological channels. Under such conditions, equipment operation efficiency is determined not only by mixing body design parameters but also by coordination between conveying device operating modes and medium properties. A promising direction for technological system efficiency improvement involves application of universal mixing feeding units in

which construction mixture preparation and transport processes are integrated within a single design complex.

Analysis of recent research and publications. Sources [1, 2] consider general issues related to influence of rheological and structural mechanical properties of construction mixtures on preparation and subsequent transport processes. It is shown that mixture consistency variation significantly influences motion character within mixer working volume and conveying channels. Studies [3, 4] present approaches to efficiency evaluation for construction mortar and concrete mixture mixing considering working body design parameters and operating modes.

Research objective. Determination of rational design and operating parameters for construction mixture preparation equipment considering intensive component mixing conditions, coordination of mixing and screw transport processes, and efficient equipment operation with mixtures of varying consistency.

Main part. Equipment combining a forced action mixer and a screw conveying unit is considered for investigation of construction mixture preparation and transport processes. Component mixing is performed by blade working bodies within mixer working volume, after which the prepared mixture enters the screw assembly for subsequent transport to the unloading location.

During forced action mixer operation, blade working bodies form complex spatial movement of the construction mixture within the mixing chamber. Material movement is accompanied by circulation flow formation, mutual component displacement, and shear deformation occurrence within mixture working volume. Character of such motion is determined by working body kinematic parameters, blade geometry, and physical mechanical properties of the mixed medium.

Construction mixture particle movement within forced action mixer working volume occurs under action of blade working bodies forming material circulation flows within the mixing chamber. Linear velocity of mixture particle movement is determined by the following relation

$$v_p = \omega \cdot R, \tag{1}$$

where v_p – linear velocity of mixture particle movement, m/s;

ω – working body angular velocity, rad/s;

R – blade rotation radius, m.

Increased working body angular velocity is accompanied by higher mixture component motion intensity and acceleration of mutual displacement process within mixer working volume. At the same time, blade rotation radius determines particle motion trajectory and influences circulation flow formation character within the mixing chamber. Rational combination of these parameters ensures intensive mixture mixing without stagnant zone formation within working volume.

Circulation movement intensity of the mixture within forced action mixer working volume depends on working body angular velocity, blade rotation radius, blade quantity, geometric shape, and mixing chamber fill level. The following relation can be used for generalized evaluation of this process

$$I_c = \omega \cdot R \cdot z_l \cdot k_f \cdot k_z, \tag{2}$$

where I_c – conditional circulation movement intensity indicator for the mixture within mixer working volume;

z_l – working body blade quantity;

k_f – coefficient considering blade shape and inclination angle;

k_z – mixing chamber fill factor.

Increased blade quantity and variation of geometric parameters promote higher mixture circulation movement intensity and improved conditions for mutual component displacement. At the same time, mixing chamber fill level substantially influences medium motion character and efficiency of homogeneous mixture structure formation. For dry mixtures, repeated particle cascading within working volume is decisive, whereas for plastic media formation of shear deformations and forced material movement under action of working bodies become especially important.

For dry construction mixtures, the mixing process is mainly accompanied by repeated component cascading within mixer working volume under action of blade working bodies. Under such conditions,

homogeneous mixture structure formation intensity is determined by particle circulation movement frequency and uniformity of displacement between separate mixing chamber zones. For semi dry mixtures, destruction of local structural contacts between material particles and ensuring uniform moisture distribution within medium volume become especially important. In the case of plastic construction mixtures, the mixing process is characterized by occurrence of significant shear deformations and increased internal resistance to material motion, requiring forced medium displacement throughout the entire mixer working volume.

During mixer operation, separate construction mixture motion zones are formed within working volume, characterized by different material displacement intensities. The most active mixing occurs in the region of direct blade working body action, where maximum particle motion velocities and medium shear deformations arise. At the same time, zones with reduced circulation movement intensity can form in peripheral mixing chamber regions, negatively influencing uniformity of mixture component distribution. Increased working body rotation speed and rational selection of blade geometry parameters promote expansion of active mixing zones and improvement of conditions for mutual displacement of material components.

After completion of the mixing process, the prepared mixture enters the screw conveying unit, where movement occurs along the conveying channel axis through rotational motion of the screw surface. Axial mixture movement velocity is determined by the following relation

$$v = \omega \cdot R \cdot \cos\alpha, \tag{3}$$

where v – mixture movement velocity along the screw axis, m/s;

α – screw helix angle.

Variation of the screw helix angle influences axial mixture movement velocity and conditions of interaction with conveying channel walls. Increased screw rotation speed raises material movement intensity, however excessive increase of kinematic parameters can be accompanied by higher internal friction and nonuniform mixture movement within the conveying channel.

During subsequent construction mixture transport by a screw conveying unit, material motion character is determined not only by screw rotation speed but also by geometric parameters. Important influence on mixture movement conditions is exerted by screw diameter, screw surface pitch, and screw helix angle. Increased screw pitch raises axial material motion velocity, however conditions of mixture retention within interflight space can deteriorate together with higher nonuniformity of movement through the conveying channel.

For plastic and semi dry mixtures, interaction between the material, conveying channel walls, and screw surface becomes especially important. Increased medium internal friction is accompanied by higher resistance to mixture movement and increased shear stresses within the flow. Under such conditions, coordination between mixing and transport parameters becomes important, since insufficient component mixing can lead to mixture structure nonuniformity, local compaction formation within the conveying channel, and deterioration of material movement conditions during delivery to the unloading location.

The following relation is used for evaluation of construction mixture movement conditions within the conveying channel

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{dv}{dr}, \tag{4}$$

where τ – shear stress within the mixture flow, Pa;

τ_0 – yield shear stress, Pa;

μ – dynamic mixture viscosity, Pa·s.

The presented analytical relationships enable evaluation of construction mixture movement features within forced action mixer working volume and during subsequent transport by a screw conveying unit. The obtained relationships consider influence of working body design and kinematic parameters on mixing and mixture movement conditions within a unified technological process.

Conclusions. Results of the performed study established that construction mixture preparation equipment efficiency largely depends on coordination between material mixing and transport process parameters. It was determined that forced action mixer application ensures intensive component movement

within working volume and creates conditions for homogeneous mixture structure formation during operation with materials of varying consistency.

It was established that subsequent transport of the prepared mixture by a screw conveying unit enables continuity of the technological process and coordinated material movement to the unloading location. The presented analytical relationships can be used for justification of rational design and operating parameters for construction mixture preparation and transport equipment.

References

1. Korobko, B.O., Virchenko, V.V., & Shapoval, M.V. (2018). Feed Solution in the Pipeline with the Compensators Mortar Pump of Various Design Solutions Pressure Pulsations Degree Determination. International Journal of Engineering & Technology, 7(3.2), 195–202
2. Salnikov, R., & Virchenko, V. (2025). Comparative analysis of mathematical models for the screw unit in small continuous-operation plastering machines. Construction Engineering, (42), 27–35. https://doi.org/10.32347/tb.2025-42.0503
3. Kuzub, Y., & Rudyk, R. (2025). Influence of spiral tape parameters mixer for mortar homogeneity. Scientific Bulletin of Construction, (112), 37–44. https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.112.1.37
4. Rudyk, R., & Salnikov, R. (2024). Analysis of the mixer geometry and rheology impact on concrete mixture mixing efficiency. Construction Engineering, 41, 77–84. https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0409

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА СИНХРОНІЗАЦІЯ МОБІЛЬНИХ АВТОНОМНИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ З БУДІВЕЛЬНОЮ ТЕХНІКОЮ, ЩО ПРАЦЮЄ НА ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛАХ ЕНЕРГІЇ

Гетьман Вячеслав, аспірант [1] (ORCID: 0009-0004-3592-3689),
Васильченко Антон аспірант [1] (ORCID: 0009-0001-5995-6336),
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. *Розглянуто проблему енергоефективної синхронізації мобільних автономних джерел живлення з будівельною технікою, що працює на відновлюваних джерелах енергії. Показано, що похибки фазового узгодження між інвертором і навантаженням призводять до зростання циркулюючих струмів, додаткових комутаційних втрат та зниження коефіцієнта потужності. Запропоновано кооперативну архітектуру керування з адаптивним регулюванням віртуальної інерції, яка узгоджує роботу джерела та споживача до настання перехідних режимів. На основі математичних співвідношень і порівняльного аналізу робочого циклу встановлено зменшення втрат інвертора, скорочення витрати палива та підвищення загального ККД системи. Отримані результати підтверджують доцільність інтеграції процесів синхронізації та енергоменеджменту для мобільних гібридних енергосистем..*

Ключові слова: *енергоефективність; синхронізація; мобільні джерела живлення; інвертор; віртуальна інерція; мікромережа; відновлювані джерела енергії; будівельна техніка; втрати потужності.*

Вступ. Глобальна будівельна галузь перебуває на переломному етапі: вона відчуває зростальний тиск щодо декарбонізації та відмови від викопного палива [1, 2]. Значну частку викидів на майданчиках створюють дизельні генератори, які живлять баштові крани, інструменти та інше обладнання. Інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є перспективним рішенням, проте мобільність будівельних майданчиків та нестабільність сонячної та вітрової енергії створюють серйозні технічні труднощі. Ключова проблема — ефективна синхронізація мобільних джерел живлення (BESS, паливних генераторів) з обладнанням на ВДЕ. Без точної синхронізації погіршується якість електроенергії, виникають збої техніки та втрати енергії

Аналіз літературних джерел. Область синхронізації різнорідних джерел енергії добре досліджена для стаціонарних мікромереж. Ключовим досягненням є концепція віртуального синхронного генератора (VSG), яка дозволяє інверторним джерелам (зокрема GFM-інверторам) емулювати інерцію традиційних синхронних генераторів. Це критично важливо для стабільного

регулювання частоти та напруги в автономних мережах з високою часткою відновлюваної енергії [4]. Децентралізовані VSG-контролери з покращеною фільтрацією забезпечують розподіл навантаження без централізованого зв'язку в «plug-and-play» архітектурі [5]. Питання синхронізації мобільних дизель-генераторів із PV-системами вивчалося в реальних лабораторних умовах. Lechner et al. показали, що модифіковані генератори з навантажувальними блоками можуть формувати острівні мережі з децентралізованими PV, хоча й спостерігалися коливання, які потребували усунення [6]. У технологіях синхронізації відбувається перехід від PLL, нестабільних у слабких мережах, до GPS-синхронізації для GFM-інверторів [7, 8]. Паралельно активно розвивається управління енергією гібридної та електричної будівельної техніки. Гібридизація екскаваторів (Cui et al.) дала економію енергії понад 64 % [9]. Розроблено інтелектуальні системи, які переводять гібридні двигуни в режим холостого ходу при відсутності навантаження [10], а також гібридні накопичувачі (батареї + ультраконденсатори), що зменшують споживання енергії на 5,8 % і суттєво подовжують термін служби акумуляторів [11].

Мета роботи. розроблення та валідація концептуальної моделі енергоефективної синхронізації мобільних автономних гібридних джерел живлення з парком будівельної техніки на основі відновлюваних джерел. Передбачається формування оптимальної моделі, що забезпечує стабільність напруги та частоти в мобільній острівній мережі з мінімізацією перехідних процесів, а також оцінювання енергетичних втрат у разі неузгодженої синхронізації шляхом математичного аналізу. Додатково пропонується кооперативна архітектура керування, яка інтегрує процес синхронізації джерел із системою енергоменеджменту навантаження для підвищення загальної ефективності енергопостачання.

Виклад основного матеріалу. ККД мобільного джерела живлення на основі інвертора не є постійним; він значною мірою залежить від коефіцієнта потужності та гармонічного складу сигналу напруги, які погіршуються під час перехідних процесів синхронізації. Сумарні миттєві втрати потужності в трифазному інверторі з джерелом напруги (VSI) можна моделювати як суму втрат на провідності та втрат на перемиканні, які залежать від розбіжності фазових кутів та гармонік струму в лінії [12].

Загальні втрати потужності інвертора P_{loss} обчислюються за формулою:

$$P_{loss}(t) = 3 \cdot \left[V_{ce} \cdot I_{avg}(t) + R_{on} \cdot I_{rms}^2(t)\right] + f_{sw} \cdot E_{sw} \cdot \frac{V_{dc}}{V_{ref}} \cdot \frac{I_{rms}(t)}{I_{ref}}, \quad (1)$$

де: V_{CE} – напруга насичення колектор-емітер; R_{on} – опір у відкритому стані; I_{avg}, I_{rms} – середнє та діюче значення струму; f_{sw} – частота комутації; E_{sw} – енергія комутаційних втрат; V_{dc},V_{ref} – напруги постійного кола; I_{ref} – опорний струм.

Під час події синхронізації миттєва похибка фазового кута $\delta(t)$ спричиняє появу перехідного циркулюючого струму I_{circ} між інвертором та шиною постійного струму обладнання. Це збільшує ефективний діючий струм I_{rms} і різко підвищує підвищує як втрати на провідність, так і втрати на перемиканні.

Величина цього перехідного циркулюючого струму визначається різницею напруг між вихідною напругою інвертора (V_{inv}) та напругою внутрішнього конденсатора ланцюга постійного струму обладнання (V_{load}):

$$I_{circ}(t) = \frac{V_{inv}(t) - V_{load}(t)}{Z_{line}}, \quad (2)$$

де: Z_{line} - індуктивний опір лінії. Крім того, похибка фазової синхронізації безпосередньо зменшує реальну потужність, що передається на навантаження. Для заданої видимої потужності S, ефективне використання потужності джерела енергії η_{sync} визначається коефіцієнтом потужності:

$$\eta_{sync} = \cos(\varphi_v - \varphi_i), \quad (3)$$

де: φ_v – фазовий кут напруги, а φ_i – фазовий кут струму. Помилка синхронізації, що спричиняє розбіжність фаз усього на 15 градусів, зменшує корисну потужність приблизно на 3,4 %.

З метою зменшення цих втрат пропонується архітектура **кооперативного керування**, в якій система управління енергоспоживанням (EMS) обладнання передає оцінений профіль навантаження на інвертор мобільного джерела живлення за мить до значної зміни режиму роботи (наприклад, підйому крана або повороту екскаватора). Інвертор заздалегідь коригує свою віртуальну константу інерції НН у контурі регулювання активної потужності та частоти:

$$P_{ref} - P_{out} = \frac{2H}{\omega_s} \cdot \frac{d\omega}{dt} + k_d(\omega_{ref} - \omega), \quad (4)$$

де: P_{ref} – еталонна активна потужність; P_{out} – виміряна вихідна потужність; ω_S – синхронна кутова частота; ω_{ref}, ω – еталонна та виміряна кутові частоти; k_d - коефіцієнт демпфування. Тимчасово збільшуючи віртуальну інерцію H в очікуванні перехідного процесу великої потужності, система «посилює жорсткість» частотної характеристики, мінімізуючи початкове відхилення частоти Δω і, відповідно, похибку фазового кута δ(t), яка зумовлює механізми втрат у першому рівнянні.

Було проведено порівняльне моделювання типового 4-годинного робочого циклу за участю електричного екскаватора потужністю 20 кВт, що живиться від мобільної акумуляторної системи (BESS) потужністю 30 кВт / 45 кВт·год з вбудованим дизельним модулем продовження автономної роботи. У таблиці 1 наведено результати порівняння традиційної автономної схеми синхронізації з регулюванням за кривою нахилу з запропонованою схемою кооперативного попереднього регулювання.

Таблиця 1

Порівняння методів синхронізації (4-годинний цикл роботи)

Параметр	**Звичайне дроп-контролювання**	**Кооперативне керування**
Сумарні втрати інвертора, *кВт·год*	3.85	2.35
Середня фазова похибка, *град*	8.2	2.1
Витрата дизельного палива, *л*	22.1	18.9
Середній ККД системи, *%*	82.4	87.7
Глибина розряду АКБ, *%*	72	68

Дані в таблиці 1 підтверджують, що завдяки зменшенню похибки синхронізації на понад 6 градусів сумарні втрати в інверторі вдалося скоротити на 39 %. Це не тільки забезпечує економію електроенергії, але й знижує навантаження на дизельний генератор-продовжувач автономності, що призводить до зменшення витрати палива на 3,2 літра за одну зміну. Важливо, що нижчі пікові струми під час синхронізованих перехідних процесів також призвели до меншого глибини розряду акумулятора (DoD), що є ключовим фактором у продовженні терміну експлуатації системи BESS та зниженні загальних витрат на життєвий цикл системи.

Висновки. Енергоефективна синхронізація для будівельних майданчиків з живленням від відновлюваних джерел енергії є багатофізичною проблемою, яка виходить далеко за межі базової стабільності мережі. Представлені математичні моделі та симуляції підтверджують, що помилки фази синхронізації є прямим і значним джерелом втрат енергії, переважно через збільшені втрати в інверторах та зниження ефективної передачі потужності. Запропонована стратегія кооперативного керування, яка пов’язує систему енергоменеджменту обладнання з контролером інвертора джерела шляхом адаптивного регулювання віртуальної інерції, пропонує життєздатний шлях до досягнення середньої системної ефективності 87,7 %, що становить покращення на 5,3 відсоткових пункти.

Список використаних джерел

1. Holcim deploys hybrid renewable mobile concrete plants. (2026). Industry Australia. Retrieved May 11, 2026, from. https://www.holcim.com.au/news/2026/hybrid-power-mobile-concrete
2. ROYPOW. (2025). Cutting diesel dependence on remote construction sites with mobile hybrid ESS. *ROYPOW Solutions*. Retrieved May 11, 2026, from https://roypowcell.com/blogs/batteries/cutting-diesel-dependence-on-remote-construction-sites-with-mobile-hybrid-ess

3. Sati, S. E., Al-Durra, A., Zeineldin, H. H., El-Fouly, T. H. M., & El-Saadany, E. F. (2025). Two-stage filtration for decentralized frequency regulation and stability improvement in economically dispatched virtual synchronous generators within islanded microgrid. Energy, 331, 136878. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136878
4. Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., de Vicuña, L. G., & Castilla, M. (2011). Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids: A general approach toward standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 58*(1), 158–172. https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2066534
5. Lechner, T., Seifried, S., Timmermann, J., Bernecker-Castro, C., Schaarschmidt, K., Herrmann, S., Finkel, M., & Witzmann, R. (2022). Island grid operation of a modified mobile generator: Test and optimization in a living lab with high PV penetration. In Proceedings of the 21st Wind and Solar Integration Workshop (WIW 2022) (pp. 559–564).
6. Ferrari, M., Starke, M., Smith, J., & Rodriguez, O. (2024). Microgrid-to-microgrid synchronization with grid-forming inverters: Challenges and solution. In Proceedings of the 2024 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (pp. 779–783). https://doi.org/10.1109/ECCE55643.2024.10861523
7. GPS-based autonomous synchronized microgrid using digital grid routers. (2024). Energy Reports, 12, 3995–4003. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.09.060
8. Cui, J., Quan, L., Liu, Z., Hao, Y., Ge, L., & Huang, W. (2025). Design and control of a novel hybrid drive swing system for excavators integrating electrical and hydraulic energy recovery systems. Energy, 336, 135446. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135446
9. WMG software powers next generation intelligent JCBs. (2017). University of Warwick News. Retrieved May 11, 2026, from https://warwick.ac.uk/news/pressreleases/wmg_software_powers/?external=true
10. Research on energy management of hybrid energy storage closed-circuit pump-controlled electro-hydraulic system. (2025). Energy, 338, 138775. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.138775
11. Blaabjerg, F., Iov, F., Teodorescu, R., & Chen, Z. (2006). Power electronics in renewable energy systems. In Proceedings of the 12th International Power Electronics and Motion Control Conference (pp. 1–17). Portoroz, Slovenia. https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2006.4778392

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ТА БУДІВЕЛЬНІ МАШИНИ У ВИРОБНИЧО-ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМАХ

Микола Ручинський, професор, к.т.н., професор [1] (ORCID: 0000-0002-9362-292X),
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. *Протікання технологічних процесів в виробничих системах будівельної індустрії вимагає витрат енергетичних, фінансових і часових ресурсів. Зменшення часу на виконання тих чи інших операцій в межах процесу призводить до підвищення ефективності функціонування виробничо-логістичних систем загалом. Це в свою чергу призводить до збільшення прибутку і можливостей по збільшенню об'ємів виробництва. У роботі розглянуто особливості технологічних процесів та функціонування будівельних машин у виробничо-логістичних системах будівництва. Проведено аналіз взаємодії машин у процесах переміщення, обробки та складування матеріалів. Визначено основні параметри ефективності функціонування машинних комплексів, зокрема продуктивність, коефіцієнт використання часу та енергоємність процесів. Розроблено математичні залежності для оцінки узгодженості роботи машин та оптимізації логістичних потоків. Встановлено вплив організації будівельного майданчика на ефективність використання техніки.*

Ключові слова: *технологічний процес, будівельні машини, логістична система, продуктивність, оптимізація, транспортні процеси.*

Вступ. Сучасне будівництво характеризується високим рівнем складності технологічних процесів, що обумовлено збільшенням обсягів будівництва, ускладненням конструкцій та підвищенням вимог до якості і термінів виконання робіт. У цих умовах особливого значення набуває ефективна організація виробничо-логістичних систем, у яких будівельні машини виступають основними елементами, що забезпечують виконання технологічних операцій [1], [2].

Таким чином, підвищення ефективності технологічних процесів будівництва можливе лише за умови комплексного підходу, який передбачає одночасний аналіз:

- технічних характеристик машин;
- параметрів логістичних потоків;
- умов експлуатації.

Це обумовлює актуальність дослідження технологічних процесів та будівельних машин у виробничо-логістичних системах.

Аналіз літературних джерел. Проведений аналіз літературних джерел показує, що:

- більшість досліджень присвячена окремим машинам або технологічним процесам;
- недостатньо уваги приділяється комплексному аналізу виробничо-логістичних систем;
- відсутні універсальні методи оптимізації взаємодії будівельних машин у межах єдиної системи;
- необхідне поєднання технічного та логістичного підходів до дослідження.

Це свідчить про актуальність подальших досліджень, спрямованих на розробку методів підвищення ефективності технологічних процесів шляхом оптимізації роботи будівельних машин у виробничо-логістичних системах.

Мета роботи. Підвищення ефективності технологічних процесів будівництва шляхом дослідження закономірностей функціонування будівельних машин у виробничо-логістичних системах, оптимізації їх взаємодії та обґрунтування раціональних параметрів організації матеріальних потоків і режимів роботи машинних комплексів.

Матеріали і методи. Основними матеріалами для дослідження є науково-технічна та довідкова література, що стосується технологічних процесів у будівництві, будівельних машин і виробничо-логістичних систем, а також нормативні документи з організації будівельного виробництва. Для аналізу використовувались дані про технічні характеристики сучасних будівельних машин (екскаваторів, самоскидів, кранів, навантажувачів) та параметри їх роботи у складі технологічних комплексів.

Виклад основного матеріалу. Сучасні технологічні процеси у будівництві реалізуються у вигляді складних виробничо-логістичних систем, що включають сукупність взаємопов'язаних операцій із видобування, транспортування, обробки та укладання матеріалів. Основну роль у цих процесах відіграють будівельні машини, які забезпечують безперервність і ритмічність виконання робіт.

1. ***Структура технологічного процесу.***

Технологічний процес будівництва можна представити у вигляді послідовності операцій:

- підготовка будівельного майданчика;
- розробка та переміщення ґрунту;
- транспортування матеріалів;
- їх обробка та складування;
- монтаж будівельних конструкцій.

Кожна з наведених операцій виконується відповідними типами машин, що формують єдиний технологічний ланцюг.

2. ***Взаємодія будівельних машин.***

Ефективність функціонування виробничо-логістичної системи визначається узгодженістю роботи машин. Типовий технологічний ланцюг має вигляд:

екскаватор → самоскид → склад → кран → об'єкт будівництва.

У цьому випадку продуктивність системи визначається найменш продуктивним елементом. Для забезпечення безперервності процесу необхідно виконання умови:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = \cdots = Q_n, \quad (1)$$

де Q_n – продуктивність і-ї машини.

3. ***Продуктивність машинного комплексу.***

Продуктивність окремої машини визначається залежністю:

$$Q = \frac{V}{t}, \quad (2)$$

де V – обсяг виконаних робіт,

t – час їх виконання.

Для машинного комплексу загальна продуктивність визначається як:

$$Q_{\text{сист}} = min(Q_1, Q_2, \dots, Q_n), \quad (3)$$

що відповідає принципу «вузького місця» у логістичних системах.

4. ***Оцінка використання машин.***

Ефективність використання машин оцінюється коефіцієнтом використання часу:

$$K = \frac{t_{\text{роб}}}{t_{\text{заг}}}, \quad (4)$$

де $t_{\text{роб}}$– час безпосередньої роботи машини,

$t_{\text{заг}}$ – загальний час її перебування на об'єкті.

Зменшення простоїв дозволяє значно підвищити ефективність функціонування системи.

5. ***Енергоємність технологічних процесів.***

Енергоємність процесу визначається як:

$$E = \frac{N}{Q}, \quad (5)$$

де N – потужність машини,

Q – її продуктивність.

Зниження енергоємності досягається шляхом оптимізації режимів роботи машин та скорочення зайвих переміщень.

6. ***Логістична модель системи.***

Рух матеріальних потоків у виробничо-логістичній системі можна описати залежністю:

$$M(t) = f(Q, L, T), \quad (6)$$

де L – довжина транспортного маршруту,

T – час циклу.

Збільшення довжини маршруту або часу циклу призводить до зниження ефективності системи.

7. ***Оптимізація роботи машин.***

Для підвищення ефективності системи використовується критерій оптимізації:

$$Z = C + \alpha E + \beta T \rightarrow min, \quad (7)$$

де C – експлуатаційні витрати,

E – енерговитрати,

T – тривалість процесу,

α і β – емпіричні коефіцієнти.

Основними напрямками оптимізації є:

- балансування продуктивності машин;
- скорочення простоїв;
- раціоналізація транспортних маршрутів;
- оптимізація кількості техніки.

8***. Вплив організації будівельного майданчика.***

Організація будівельного майданчика суттєво впливає на ефективність роботи машин. Основними факторами є:

- взаємне розташування техніки;
- довжина транспортних шляхів;
- наявність проміжних складів;
- інтенсивність потоків матеріалів.

Раціональне планування дозволяє зменшити витрати часу та енергії на виконання робіт.

9. ***Узагальнення результатів.***

Проведений аналіз показує, що ефективність технологічних процесів у будівництві визначається:

- узгодженістю роботи машин;
- раціональною організацією логістичних потоків;
- оптимальним вибором параметрів техніки.

Комплексний підхід до організації виробничо-логістичних систем дозволяє суттєво підвищити продуктивність і знизити витрати ресурсів.

Обговорення. Отримані результати дослідження підтверджують, що ефективність технологічних процесів у будівництві значною мірою залежить від рівня організації виробничо-логістичних систем та узгодженості роботи будівельних машин. Як показано в роботах [1], [3], традиційний підхід до підвищення ефективності передбачає вдосконалення конструкцій машин та підвищення їх технічних характеристик. Однак результати проведеного дослідження свідчать про те, що цього недостатньо без урахування логістичних аспектів.

Встановлено, що одним із ключових факторів є синхронізація продуктивності машин у технологічному ланцюзі. Порушення балансу продуктивності, навіть на одному етапі, призводить до виникнення «вузьких місць», що знижує ефективність всієї системи [5], [10]. Це узгоджується з положеннями логістичних теорій, згідно з якими пропускна здатність системи визначається найслабшою її ланкою.

Таким чином, результати дослідження підтверджують необхідність комплексного підходу до організації технологічних процесів у будівництві, який поєднує технічні, логістичні та організаційні аспекти.

Висновки. У результаті виконаного дослідження технологічних процесів та функціонування будівельних машин у виробничо-логістичних системах отримано такі основні результати:

1. Встановлено, що ефективність технологічних процесів у будівництві визначається не лише технічними характеристиками окремих машин, а насамперед рівнем узгодженості їх роботи у складі виробничо-логістичних систем.
2. Проаналізовано структуру технологічних процесів будівництва та визначено основні етапи, на яких формуються матеріальні потоки, що забезпечуються відповідними типами будівельних машин.
3. Доведено, що продуктивність машинного комплексу визначається найменш продуктивною ланкою технологічного ланцюга, що підтверджує необхідність балансування продуктивності машин.
4. Визначено основні показники ефективності функціонування машин, зокрема продуктивність, коефіцієнт використання часу та енергоємність процесів, і встановлено їх взаємозв’язок.
5. Встановлено, що значні втрати ефективності виникають унаслідок простоїв техніки, спричинених неузгодженістю роботи машин та нераціональною організацією логістичних потоків.
6. Обґрунтовано, що оптимізація виробничо-логістичних систем повинна здійснюватися шляхом:
    - балансування продуктивності машин;
    - скорочення транспортних маршрутів;
    - раціонального розміщення техніки на будівельному майданчику;
    - оптимізації кількості машин у комплексі.
7. Показано, що раціональна організація будівельного майданчика дозволяє зменшити тривалість виробничих циклів та енерговитрати.
8. Визначено, що перспективним напрямком підвищення ефективності є впровадження сучасних цифрових технологій, зокрема BIM-моделювання, цифрових двійників та систем автоматизованого управління.

Таким чином, отримані результати підтверджують, що комплексний підхід до організації технологічних процесів та використання будівельних машин у виробничо-логістичних системах дозволяє суттєво підвищити ефективність будівельного виробництва та знизити витрати ресурсів.

Список використаних джерел

1. Nazarenko, I. I. (1999). Mashini dlia vyrobnytstva budivel′nykh materialiv: Pidruchnyk [Machines for the production of building materials: Textbook]. Kyiv: KNUCA. [in Ukrainian].
2. Gladwell, G. M. L. (2005). Inverse problems in vibration. Kluwer Academic Publishers.
3. Gupta A., Yan D. (2016). Mineral Processing Design and Operation. 2nd ed. Oxford : Elsevier, 882 p.
4. Haldar, S. K. (2018). Mineral exploration: Principles and applications (2nd ed.). Elsevier.

5. Taggart, A. F. (1998). Handbook of ore dressing. John Wiley & Sons..
6. ANSYS Inc. (2025). ANSYS Mechanical APDL material reference: Release 2025. ANSYS Inc.
7. Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy. (2016). DBN A.3.1-5:2016. Orhanizatsiia budivelnoho vyrobnytstva [Organization of construction production]. [in Ukrainian].
8. Couper, J. R., Penney, W. R., Fair, J. R., & Walas, S. M. (2005). Chemical process equipment: Selection and design (2nd ed.). Elsevier.
9. Ciężkowski, P., Maciejewski, J., & Bąk, S. (2020). Application of the new shape crushing plate in machine crushing processes. Studia Geotechnica et Mechanica, 42(1), 83–96.
10. Fladvad, M., & Onnela, T. (2020). Influence of jaw crusher parameters on the quality of primary crushed aggregates. Minerals Engineering, 151, Article 106338.
11. Cleary, P. W., & Sinnott, M. D. (2015). Simulation of particle flows and breakage in crushers using DEM. Minerals Engineering, 74, 178–197.
12. Nazarenko, I. I., et al. (2019). Applied problems of motion of mechanical systems under action of power loads. https://doi.org/10.21303/978-9949-7316-9-5

RESEARCH OF NOZZLE GEOMETRIC PARAMETER INFLUENCE ON BUILDING MORTAR FLOW PROCESS

Roman Salnikov, postgraduate student[1] (ORCID: 0009-0001-0408-4358),
Rostyslav Rudyk, postgraduate student[1] (ORCID: 0000-0001-8386-977X),
Viktor Virchenko, candidate of technical sciences, associate professor[1] (ORCID: 0000-0002-5346-9545)
[1] National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Vitaliia Hrytsaienka, 24, 36011, Ukraine

ABSTRACT. *The paper considers features of building mortar flow through nozzles with different geometric shapes. The study was performed using computer simulation of increased-density fluid flow through nozzles with different outlet diameters and geometric configurations under conditions close to operation of construction mixture supply systems. Analysis of flow velocity distribution and medium motion behavior within nozzle flow section has been performed considering influence of outlet opening dimensions and working medium density. Influence of outlet geometric parameters on flow intensity, formation of local flow acceleration zones, and uniformity of building mortar supply has been determined. Special attention has been devoted to evaluation of hydrodynamic resistance growth and redistribution of velocity fields during medium passage through narrowed outlet sections. It has been established that nozzle geometry variation and physical-mechanical properties of the medium significantly affect flow structure and material movement conditions through the outlet channel, which should be considered during development and improvement of equipment intended for transportation and application of building mixtures.*

Keywords: *construction mortar, nozzle, fluid outflow, geometric parameters, flow simulation, hydrodynamic processes, viscoplastic medium, flow velocity, construction mixture supply, technological process, construction equipment*

Introduction. Processes of building mortar supply and application are an important component of modern mechanized construction and finishing technological systems. Operating efficiency of equipment for transportation and application of building mixtures largely depends on material motion behavior within flow channels and outlet nozzles. Nozzle geometric parameters directly affect flow structure, outflow velocity, material supply uniformity, and working jet formation conditions during technological operations.

Investigation of building mortar outflow processes with increased density and complex structural-mechanical properties becomes especially important, since such media are characterized by significant internal friction, nonuniform flow velocity distribution, and high sensitivity to flow section geometry variation. Under such conditions, application of computer simulation methods makes it possible to determine medium flow features within nozzles of different shapes and evaluate influence of structural parameters on material movement conditions.

One of promising directions for improvement of equipment intended for building mixture supply is substantiation of rational nozzle geometry considering working medium rheological properties and technological systems operating modes. Application of computer simulation methods makes it possible to

analyze flow velocity distribution, determine local acceleration zones, and evaluate motion liquids behavior with different density during outflow through outlet openings of different geometric shapes.

Analysis of recent research and publications. Sources [1, 2] consider features of building mortar motion within pipeline systems and present mathematical models of viscoplastic medium supply processes in pumping equipment. It is shown that building mixture flow behavior significantly depends on geometric parameters of flow channels, medium motion regimes, and rheological properties of material.

Sources [3, 4] investigate processes of concrete mixture and building mortar movement within extrusion supply systems and nozzles of different geometric shapes. It has been established that outlet channel configuration directly affects flow velocity distribution, jet formation conditions, and material supply uniformity.

Source [5] presents results of investigations devoted to material layer formation processes during extrusion supply of building mixtures. It is shown that supply process consistency and material motion behavior are largely determined by coordination between nozzle geometric parameters and physical-mechanical properties of working medium.

Research objective. Investigation of nozzle geometric parameter influence on outflow behavior of building mortars with different density, determination of flow velocity distribution features within nozzle flow section, and evaluation of outlet opening shape and size influence on material movement conditions during supply.

Main part. For investigation of building mortar outflow process, a nozzle with inlet flow section and outlet opening of a certain geometric shape is considered. Working medium is supplied to the nozzle under pressure difference action, after which it passes through narrowed section and exits in the form of a formed jet. Outflow behavior is determined not only by outlet opening area, but also by cross-section shape, medium density, effective viscosity, and energy losses within nozzle flow section.

For generalized evaluation of nozzle geometry influence on outflow conditions, coefficient of outlet opening geometric influence has been introduced

$$K_g = \frac{A_o}{P_o d_e}, \tag{1}$$

where K_g – coefficient of outlet opening geometric influence;

A_o – outlet opening area of nozzle, m²;

P_o – outlet opening perimeter, m;

d_e – equivalent diameter of outlet opening, m.

Equivalent diameter of outlet opening is determined by the following relation

$$d_e = \frac{4A_o}{P_o}, \tag{2}$$

Considering pressure difference, medium density, and losses within nozzle flow section, building mortar outflow velocity can be determined by the following relation

$$v_o = K_v K_g \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \tag{3}$$

where v_o – average medium outflow velocity from nozzle, m/s;

K_v – velocity loss coefficient in nozzle;

K_g – coefficient of outlet opening geometric influence;

Δp – pressure difference before nozzle, Pa;

ρ – working medium density, kg/m³.

Building mortar flow rate through nozzle considering outlet opening geometry and rheological properties of medium is determined as follows

$$Q = K_r A_o v_o, \tag{4}$$

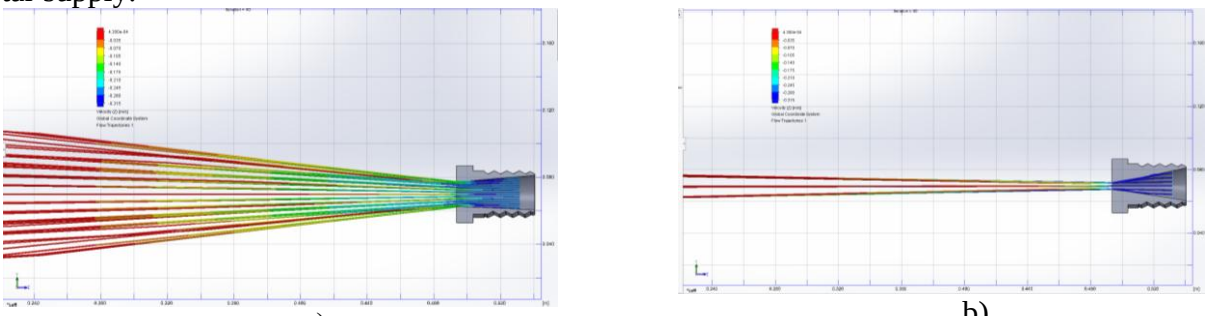
where Q – volumetric flow rate of building mortar through nozzle, m³/s;

K_r – rheological coefficient considering influence of viscosity, density, and internal resistance of medium;

A_o – nozzle outlet opening area, m²;

v_o – average medium outflow velocity, m/s.

Proposed model makes it possible to consider influence of outlet opening shape, outlet size, working medium density, and velocity losses in nozzle on building mortar outflow process. Reduction of opening area leads to increase in local flow velocity, but simultaneously causes growth of hydraulic resistance. For media with higher density and viscosity, influence of nozzle geometry (Fig. 1) becomes more significant, which should be considered during selection of structural parameters of nozzles intended for building mortar supply.



a) b)

Figure 1 – Simulation of increased-density fluid outflow through nozzle:
a) with large outlet opening; b) with small outlet opening

For nozzles with large outlet opening, more uniform velocity distribution across flow cross-section and reduction of local acceleration zones are observed. In this case, medium outflow is characterized by lower hydrodynamic loss intensity and more consistent jet formation. For liquids with lower density, flow velocity within outlet channel is higher, while flow structure is characterized by smoother velocity redistribution.

In the case of nozzles with small outlet opening, significant increase in flow velocity within material outlet zone is observed, which is accompanied by formation of local regions of intensive medium acceleration. For more dense liquids, increase in velocity distribution nonuniformity and growth of internal hydrodynamic resistance zones within nozzle flow section are characteristic.

Conclusions. As a result of conducted investigations, it has been established that nozzle geometric parameters significantly affect building mortar outflow behavior, flow velocity distribution, and outlet jet formation conditions. It has been determined that reduction of outlet opening dimensions is accompanied by increase in local flow velocity and growth of hydrodynamic resistance within nozzle flow section.

It has been established that liquids with higher density are characterized by increased velocity distribution nonuniformity and growth of internal medium motion resistance during passage through outlet channel. Obtained analytical relations can be used for substantiation of rational geometric parameters of nozzles intended for supply and application of building mixtures considering physical-mechanical properties of working medium.

References

1. Korobko, B. O., Zadvorkin, D. M., & Vasyliev, I. A. (2017). Study of the operating element motion law for a hydraulic-driven diaphragm mortar pump. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(7–88), 4–11. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.106873
2. Chayka, D., Emeljanova, I., & Andrenko, P. (2016). A mathematical model of the hydraulic system of the universal hosed concrete pump. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(7–80), 32–42. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.63808
3. Feys, D., De Schutter, G., Fataei, S., Martys, N. S., & Mechtcherine, V. (2022). Pumping of concrete: Understanding a common placement method with lots of challenges. Cement and Concrete Research, 154, 106720. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106720

4. Niu, H., Yu, B., & Hao, J. (2025). CFD-based flow field analysis of spiral nozzles in 3D concrete printing. Discover Applied Sciences, 7(11), 1–18. https://doi.org/10.1007/s42452-025-07823-3
5. Wolfs, R. J. M., Bos, F. P., & Salet, T. A. M. (2021). Stability and deformations of deposited layers in material extrusion additive manufacturing. Additive Manufacturing, 46, 102193. https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102193

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ МІНІ-НАВАНТАЖУВАЧІВ ДЛЯ РОБОТИ В СКЛАДНИХ УМОВАХ

Богдан Федишин, асистент, PhD[1] (ORCID: 0000-0003-2420-7332),
Дмитро Кривошия студент[1],
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. *У роботі проведено теоретичне обґрунтування та розроблено практичні рекомендації щодо модернізації робочих органів малогабаритної техніки з метою підвищення ефективності розробки міцних та мерзлих ґрунтів. Основну увагу приділено експлуатації машин в умовах обмеженого робочого простору, зокрема в межах об'єктів ландшафтної архітектури, паркових зон та щільної міської забудови, де використання важкої спецтехніки є неможливим. Запропоновано конструкцію комбінованого робочого органу, що поєднує стандартний ківш із інтегрованим ротаційним розпушувачем. Таке рішення дозволяє реалізувати принцип активного робочого органа, забезпечуючи попереднє руйнування ґрунтового масиву. Це є критично важливим для міні-навантажувачів з обмеженою зчіпною масою, оскільки запобігає буксуванню коліс та підвищує загальну продуктивність технологічного циклу. Описано оновлену схему робочого циклу, яка складається з етапів попереднього розпушення, повернення у вихідну позицію та набору матеріалу.*

Ключові слова: *міні-навантажувач; робочий орган; ротаційний розпушувач; енергоємність; тягове зусилля..*

Вступ. Сучасні тенденції в галузі дорожнього будівництва та комунальної інфраструктури вказують на зростаючу роль малогабаритної техніки. Міні-навантажувачі, завдяки своїй маневреності, стали незамінними в умовах щільної забудови, проте їхня ефективність стрімко падає при зустрічі з міцними або мерзлими ґрунтами. Основною перешкодою є обмежена зчіпна маса машини, яка не дозволяє розвинути необхідне зусилля впровадження для подолання опору різанню.

Традиційні підходи до вирішення цієї проблеми передбачають використання змінного обладнання, такого як гідромолоти або фрези, проте це потребує частої заміни робочих органів та переривання технологічного циклу. Альтернативним і перспективним шляхом є створення комбінованих робочих органів, які поєднують пасивне різання ковшем із активним механічним впливом ротаційного типу. Це дозволяє здійснювати попереднє руйнування масиву, що значно розширює функціональний діапазон техніки.

Аналіз літературних джерел. Механіка взаємодії робочих органів із ґрунтовим середовищем є предметом глибоких досліджень багатьох наукових шкіл. Фундаментальні розрахунки зусиль копання та формування призми волочіння.[1, 2]. Особливе значення мають методи інтенсифікації розробки ґрунтів через вібраційні та ударні впливи. [2].

Сучасні підходи до автоматизації та підвищення ККД гідроприводів будівельних машин досліджували, наголошуючи на важливості адаптивного керування потоками енергії [3]. У контексті малогабаритної техніки важливо враховувати динаміку стійкості, яку детально аналізує Wong J. Y. [7], та принципи менеджменту технічного парку, викладені Harris F. [6]. Окрім того, питання теорії різання ґрунтів і зносостійкості різальних елементів піднімаються в наукових роботах, де було доведено перевагу динамічного сколювання над статичним зсувом при розробці міцних середовищ [5].

Мета роботи. Підвищення ефективності роботи міні-навантажувачів у складних ґрунтових умовах шляхом модернізації конструкції ковша та впровадження ротаційного розпушувача для зниження енергоємності виконання будівельних робіт.

Матеріали і методи. Дослідження базується на комплексному теоретичному аналізі робочих процесів малогабаритної техніки та глибокому вивченні існуючих наукових напрацювань у галузі механіки руйнування ґрунтів. Методологія роботи включає аналіз літературних джерел, присвячених інтенсифікації розробки міцних середовищ та підвищенню ефективності роботи будівельних машин у складних умовах. У ході дослідження проведено теоретичне обґрунтування взаємодії активних робочих органів із ґрунтовим масивом категорії, що враховує специфіку експлуатації техніки в обмежених умовах, таких як паркові зони та об'єкти щільної міської забудови.

Виклад основного матеріалу. Процес розробки ґрунту міні-навантажувачем починається з фази впровадження різальної частини в забій, що часто відбувається в умовах, де маневреність машини обмежена об’єктами інфраструктури. На рисунку 1 наведено приклади середовищ застосування міні-техніки, як-от паркові доріжки та зони щільної забудови. У таких специфічних умовах при статичному натисканні попереду ковша формується ущільнення, яке чинить значний опір руху. Через обмежену зчіпну масу навантажувача це призводить до буксування, зниження продуктивності та передчасного зносу вузлів машини.

Рис. 1. Приклади середовищ застосування міні-техніки
1 – паркові доріжки; 2 – щільна забудова

Для подолання цих негативних чинників запропоновано конструкцію модернізованого робочого органу з інтегрованим ротаційним розпушувачем. На рисунку 2 зображено загальну компоновку обладнання, де на базі серійного міні-навантажувача CASE встановлено ківш із роторним розпушником. Привод барабана здійснюється від штатної гідросистеми машини, що дозволяє реалізувати роботу активного робочого органу. У цьому випадку основна енергія руйнування ґрунту надходить не від тягового зусилля навантажувача, а від обертального моменту гідромотора розпушувача [3, 4].

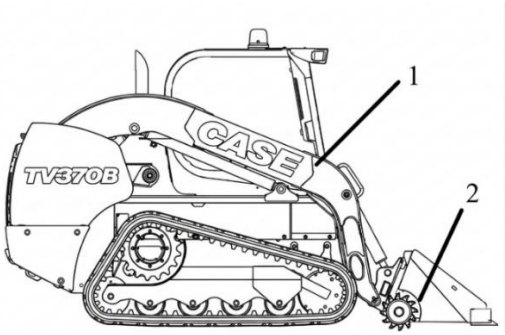


Рис. 2. Конструктивна схема модернізованого міні-навантажувача
1 – міні-навантажувач; 2 – ківш з роторним розпушником

Особливістю експлуатації такого обладнання є зміна технологічного циклу роботи. На рисунку 3 представлена схема робочого циклу модернізованого міні-навантажувача, яка складається з трьох основних етапів: перший прохід передбачає активне розпушення ґрунту барабаном, другий — повернення машини у вихідну позицію, і третій — безпосередній набір уже підготовленої масиву в ківш. Таке рішення дозволяє ефективно працювати на ґрунтах вищої категорії міцності, оскільки різці барабана заздалегідь створюють розпушення ґрунту, послаблюючи цілісність масиву та суттєво знижуючи пікові тягові навантаження на техніку.

Рис. 3. Схема робочого циклу міні-навантажувача з роторним розпушувачем.

Обговорення. Перехід до активних комбінованих робочих органів є ключовим етапом еволюції малогабаритної техніки. Використання ротаційного розпушувача нівелює обмеження, накладені низькою зчіпною масою, і дозволяє ефективно працювати в умовах, які раніше потребували залучення важкої спецтехніки.

Висновки. Аналіз проведених досліджень дозволяє стверджувати, що перехід до активних комбінованих робочих органів є ключовим етапом еволюції малогабаритної будівельної техніки. Використання ротаційного розпушувача нівелює обмеження, накладені низькою зчіпною масою міні-навантажувачів, і дозволяє ефективно працювати в умовах, які раніше потребували залучення важкої спецтехніки, зокрема в зонах щільної забудови та об'єктах благоустрою.

Висновки проведеного етапу досліджень підтверджують високу ефективність модернізації робочих органів малогабаритної техніки. Встановлено, що застосування принципу активного розпушування дозволяє суттєво знизити необхідне тягове зусилля залежно від фізико-механічних характеристик середовища, таких як вологість та щільність ґрунту. Для досягнення максимальної експлуатаційної ефективності та мінімізації зношення різальних елементів необхідно забезпечити оптимальний режим роботи, що полягає у синхронізації швидкості обертання розпушувача зі швидкістю подачі навантажувача. Окрім того, безпосередня конструктивна інтеграція гідроприводу в структуру ковша не лише гарантує високу надійність обладнання, а й забезпечує можливість швидкої адаптації стандартної техніки для виконання спеціальних завдань у складних умовах.

Подальші дослідження будуть спрямовані на визначення оптимальних геометричних параметрів барабана та розробку алгоритмів автоматичного керування гідроприводом для мінімізації пікових навантажень у процесі руйнування міцних ґрунтів.

Список використаних джерел

1. Baladinskyi, V. L. (2001). *Budivelna tekhnika: navchalnyi posibnyk* [Construction equipment: A textbook]. Lybid.
2. Khmara, L. A., & Kravets, S. V. (2014). *Mashyny dlia zemlianykh robit: Navchalnyi posibnyk* [Earth-moving machines: A textbook]. NUVGP.
3. Khmara, L. A. (2001). Teoretychni ta eksperymentalni doslidzhennia shnekovoho intensyfikatora na robochomu obladnanni buldozera [Theoretical and experimental studies of a screw intensifier on bulldozer working equipment]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, (12), 51–57.
4. Fassbender, D., Zakharov, V., & Minav, T. (2021). Utilization of electric prime movers in hydraulic heavy-duty-mobile-machine implement systems. *Automation in Construction, 132*, Article 103964. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103964
5. Pelevin, L., Fomin, A., Horbatiuk, Ye., & Shalenko, V. (2019). Provedennia efektyvnoho prohnozuvannia roboty mashyn dlia zemlianykh robit [Conducting effective forecasting of the operation of earth-moving machines]. *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny*, (93), 12–18.
6. Harris, F., McCaffer, R., & Edum-Fotwe, F. (2021). *Modern Construction Management* (8th ed.). Wiley-Blackwell.
7. Wong, J. Y. (2022). *Theory of Ground Vehicles* (5th ed.). John Wiley & Sons.

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТРАДИЦІЙНИХ І СУЧАСНИХ МАШИН ДЛЯ НОВОГО БУДІВНИЦТВА ТА РЕКОНСТРУКЦІЇ

Катерина Мішук, доцент, к.т.н., доцент [1] (ORCID: 0000-0001-5480-6032),
Сусанна Пастухова, старший викладач [1] (ORCID: 0000-0002-0853-5611),
Владислав Кузнєцов, бакалавр IV курсу [1] (ORCID: 0009-0002-6152-4409),
[1] Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні Запорізький національний університет, проспект Соборний, 226, 69000, Україна

АНОТАЦІЯ. *У роботі розглядається проблема підвищення енергоефективності будівельних машин, що застосовуються у процесах нового будівництва та реконструкції, актуальність якої зумовлена високою енергоємністю будівельного виробництва, зростанням вартості енергоресурсів та потребою в зниженні негативного впливу на довкілля. У ході дослідження було проведено порівняльний аналіз традиційних машин із дизельними двигунами та сучасних енергоощадних технічних рішень (гібридних і електричних будівельних машин). Загалом, було встановлено, що традиційні машини характеризуються значними енергетичними втратами, що зумовлені низьким коефіцієнтом корисної дії (ККД) двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) та неефективністю передачі енергії в робочі органи. Тоді як впровадження гібридних силових установок, електрифікація будівельної техніки, використання систем рекуперації енергії дозволяє суттєво знизити витрати енергії, скоротити викиди шкідливих речовин і підвищити ефективність будівельних процесів. З урахуванням специфіки нового будівництва та процесу реконструкції об'єктів, за результатами дослідження було обґрунтовано доцільність переходу до використання сучасних енергоощадних машин у будівництві та визначено перспективні напрями їх подальшого розвитку.*

Ключові слова: *енергоспоживання, реконструкція, дизельні двигуни, гібридні будівельні машини, енергоощадна техніка, електрифікація, коефіцієнт корисної дії (ККД), нове будівництво.*

Вступ. Під час нового будівництва та в процесах реконструкції будівельних об'єктів значна частина енергетичних витрат припадає на роботу будівельних машин: екскаваторів, навантажувачів, підйомних механізмів, компресорів та демонтажного обладнання. Традиційні машини з дизельними двигунами характеризуються високим споживанням пального, значними втратами енергії та підвищеним рівнем шкідливих викидів. Сучасні тенденції розвитку будівельної техніки спрямовані на впровадження електричних, гібридних та дизель-електричних приводів, що забезпечують підвищення енергоефективності та зменшення експлуатаційних витрат [1, с. 251].

Аналіз літературних джерел. Аспекти підвищення енергоефективності будівельної техніки, а також порівняння традиційних й сучасних енергоощадних технічних рішень були предметом дослідження як вітчизняних, так і зарубіжних науковців. Зокрема, до українських досліджень можна віднести такі: джерело [1], де порівнювалися дизельні, гібридні та електричні будівельні машини за споживанням пального, екологічність та коефіцієнтом корисної дії (ККД); джерело [2], де проводився аналітичний огляд сучасних підходів для підвищення енергоефективності електрогідравлічних систем для різних машин; джерело [3], де було досліджено можливості вдосконалення будівельно-дорожніх машин із використанням гібридних приводів робочих органів та рушіїв та інші. Серед зарубіжних праць можна виділити наступні: [4], де оглядово досліджуються технології зниження енергоспоживання в гібридних гідравлічних будівельних машинах; [5], де вивчалися аспекти інновацій для трансформування гідравлічних технологій з метою підвищення їх енергоефективності; [6], де детально проводиться огляд гібридних електричних систем для будівельної техніки; [7], де були представлені результати числового та експериментального аналізу, проведеного на гідравлічному гібридному екскаваторі (ГГЕ), що був модифікований шляхом впровадження системи рекуперації енергії та інші.

Мета роботи. Виконати порівняльний аналіз енергоспоживання традиційних і сучасних будівельних машин, що застосовуються при новому будівництві та реконструкції будівельних об'єктів, та обґрунтувати ефективність використання енергоощадних технічних рішень для зниження енерговитрат і підвищення ефективності будівельних процесів.

Матеріали і методи. Основним матеріалом для аналізу енергоспоживання традиційних і

сучасних будівельних машин є науково-довідкова література вітчизняного та зарубіжного походження. Основними методами, що використовуються в роботі є описовий метод, метод порівняння, метод аналізу та синтезу й метод узагальнення.

Виклад основного матеріалу. Якщо нове будівництво – це зведення нових будівельних об'єктів (будівель та споруд) «з нуля», то реконструкція – це процес перебудови будівельного об'єкта, з метою поліпшення умов проживання, експлуатації, зміни кількості приміщень, загальної та житлової площі тощо, у зв'язку зі зміною геометричних розмірів, функціонального призначення, заміною окремих конструкцій, їх елементів, основних техніко-економічних показників (ТЕП) тощо [8, с. 36-37]. Значна частка будівельних робіт виконується з використанням спеціалізованої будівельної техніки (традиційних машин і механізмів), до якої можна віднести: будівельну техніку для демонтажних робіт (екскаватори, що обладнані гідромолотами, гідроножицями для руйнування конструкцій); підйомно-транспортні машини (баштові та автомобільні крани, які забезпечують монтаж нових конструкцій); техніка для влаштування фундаментів (бурові установки для посилення фундаментів, палебійні машини); машини безрейкового транспорту (самоскиди, трактори, колісні тягачі, причіпні й напівпричіпні засоби, що забезпечують доставку матеріалів безпосередньо до місця робіт); техніка для підготовки поверхонь (шліфувальні та фрезерувальні машини для обробки стін та підлоги) та інші [9]. Використання цієї техніки перевірено часом та урегульовано нормами й технічними документами, але водночас воно є причиною значної кількості викидів парникових газів (CO_2 NO_x) й твердих частинок та значного рівня енергоспоживання, а сама техніка характеризується відносно низьким коефіцієнтом корисної дії (ККД) (30-35%) [1, с. 251]. За Рисунком 1, на прикладі підвищення ефективності будівельно-дорожніх машин [3, с. 76], ключовими аспектами для покращення ефективності роботи будівельної техніки для нового будівництва та реконструкції є: для структури машин (діагностування, технічне обстеження та ремонт складових, вдосконалення конструкції та схем компонування елементів, заміна двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) на сучасні рішення); для технологічних процесів (оптимізація режимів навантаження та проведення робіт, детальне планування та вдосконалення технологічних процесів, застосування технологій акумулювання та рекуперації енергії); для системи «оператор-машина-довкілля» (навчання операторів для більш ефективного використання машини, впровадження систем автоматичного контролю та управління) тощо.

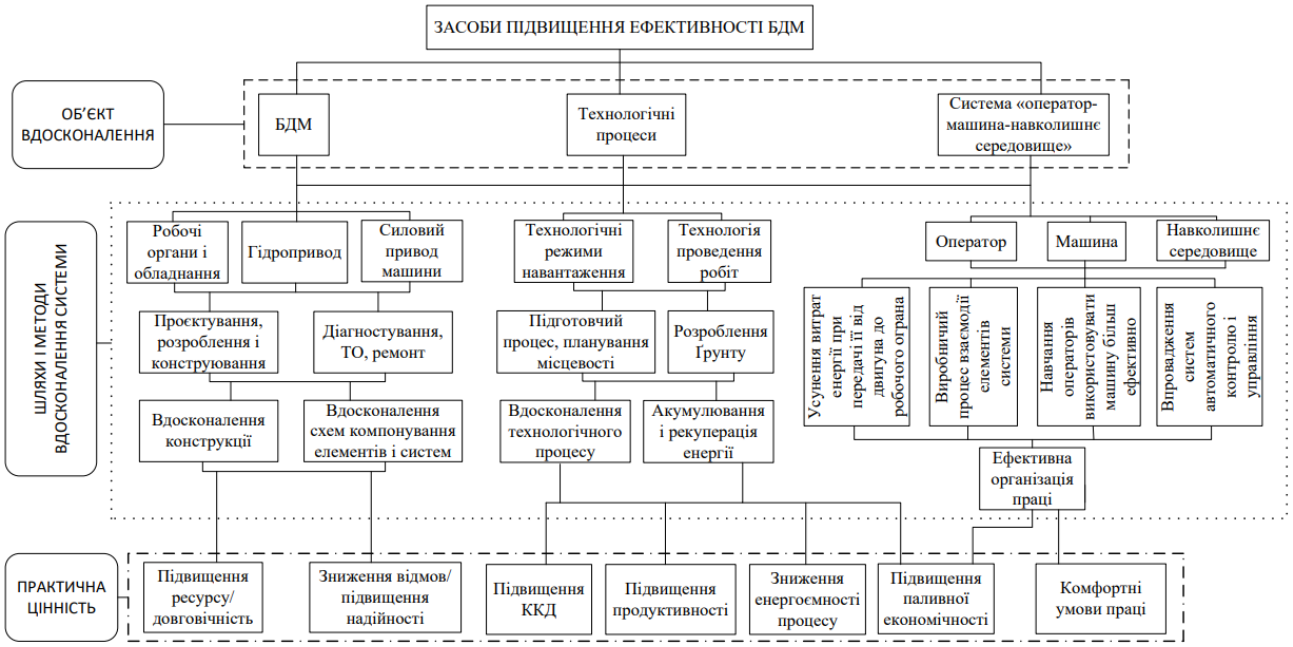


Рис.1. Шляхи підвищення ефективності будівельної техніки (на прикладі будівельно-дорожніх машин)

У зв'язку з цим, відповідно до особливостей ключових принципів екологізації та декарбонізації будівельної індустрії, з метою зменшення негативного впливу дизельних двигунів, більш поширеним шляхом підвищення енергоефективності є 1-ша складова зазначена на Рисунку 1, а саме

трансформація структури будівельних машин, відповідно до чого впроваджують наступні сучасні інженерні технічні рішення:

– гібридні машини, які поєднують у собі роботу двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) та акумуляторні або гідравлічні накопичувачі енергії, що дає змогу рекуперувати частину енергії при гальмуванні, зменшувати навантаження на двигун та економити до 15-25% пального, що особливо помітно під час циклічних операцій, зокрема, копання, підйому та опускання. Непоганим прикладом є гібридний екскаватор Komatsu HB365LC-3 (рис. 2, а), що демонструє значну економію пального (до 20%) у типовому робочому циклі [1, с. 252] та повний спектр нових енергетичних акумуляторів для будівельних машин компанії Shandong Heavy Industry, що має відмінні показники безпеки, пристосованості до довкілля та тривалий термін експлуатації [10];

– дизель-електричні трансмісії сприяють підвищенню коефіцієнта корисної дії (ККД) силової установки до 40-45%, що дає змогу більш плавно розподіляти потужність, зменшувати механічні навантаження на вузли та агрегати й скорочувати витрати на обслуговування, що досить важливо для важких бульдозерів, кар’єрних самоскидів і навантажувачів. Наприклад, бульдозер Caterpillar D7E (рис. 2, б) з споживає на 20% менше палива, порівняно з машинами класичної конструкції та потребує рідших сервісних втручань [1, с. 252];

– електричні машини (акумуляторні й ті, що працюють від стаціонарних джерел живлення) – найбільш екологічне рішення, яке повністю усуває локальні викиди шкідливих речовин, значно знижує шумове навантаження (на 6-10 дБ), забезпечує стабільну роботу та передбачувані енерговитрати завдяки високому (до 90%) коефіцієнту корисної дії (ККД) електроприводу. Доречними прикладами є електричний екскаватор Volvo EC230 Electric, який при річному напрацюванні 1800 мотогодин забезпечив зниження операційних витрат приблизно на 30%, що підтверджує економічну доцільність його використання на великих об’єктах з тривалими циклами роботи [1, с. 252-253], електричні екскаватори Shanhe Intelligent, потужність яких близька до традиційних, що працюють на паливі, при цьому виконання операцій є більш точним та досить гнучким процесом [10] та електричний міні-екскаватор Bobcat E10e (рис. 2, в) компанії Bobcat, який завдяки електроприводу, низькому рівню шуму та невеликим габаритам може працювати на об’єктах з обмеженим простором та в закритих приміщеннях [11, с. 31];

а **б** **в**

Рис.2. Приклади енергоощадної будівельної техніки для нового будівництва та реконструкції:
а – гібридний екскаватор Komatsu HB365LC-3; б – бульдозер Caterpillar D7E; в – електричний міні-екскаватор Bobcat E10e

У Таблиці 1, наведено оглядову характеристику основних типів енергоощадних технологій в сфері будівельної техніки [1, с. 251].

Таблиця 1

Оглядова характеристика основних типів енергоощадних технологій в сфері будівельної техніки

№ п/п	Тип будівельних машин	Джерело енергії	Рівень викидів парникових газів	Рівень енергоефективності
1	2	3	4	5
1	Дизельні	Дизельне паливо	Високий (до 88% загального споживання енергії)	Середня (залежить від конструкції й стану двигуна)
2	Гібридні	Дизельне паливо та електромотор в якості рекуперації	На 10-20% нижчий, порівняно з дизельними машинами	Економія пального до 15-25% завдяки рекуперації та оптимізації роботи двигуна
3	Дизель-електричні	Дизель-генератор та тягові електродвигуни	Нижчий на 15-20%, порівняно з класичними дизельними машинами	Висока (оптимальне використання потужності, зменшення втрат на трансмісії)
4	Електричні	Акумулятори та підключення до мережі (так звані інтелектуальні системи керування)	Нульовий рівень локальних викидів	Дуже висока (ККД в 2-3 рази вищий, ніж у двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ))

Загалом, при порівнянні традиційних та енергоефективних будівельних машин, ключовими відмінностями, завдяки яким сучасні машини є провідними, є: споживання енергії (традиційна будівельна техніка зазвичай використовує значно більше енергії при роботі, тоді як енергоефективні машини розроблені з метою мінімізації споживання енергії); фінансові витрати (традиційні машини для будівельних робіт, порівняно з енергоефективними, можуть мати нижчі початкові витрати, проте енергоефективні машини, з часом, можуть сприяти значній економії, завдяки зниженню рахунків за електроенергію та за обслуговування, й при цьому в більшості випадків мати набагато більший термін служби); технології та характеристики (енергоефективні будівельні машини оснащені сучасними функціями: інтелектуальними технологіями та системами автоматизації, порівняно з традиційними аналогами, які цього позбавлені); вплив на навколишнє середовище (енергоефективні машини сприяють зменшенню вуглецевого сліду, що відповідає принципам сталого розвитку та декарбонізації) [12].

Обговорення. Відповідно до даних, наведених у Таблиці 1, можна зазначити, що використання енергоощадної будівельної техніки під час нового будівництва та реконструкції є доцільним і досить перспективним, особливо, з огляду тенденцій «зелених» технологій та дотримання принципів сталого розвитку в будівельній індустрії.

Висновки. Підсумовуючи, варто зазначити, що рівень та спосіб енергоспоживання будівельних машин є одним із ключових факторів ефективності нового будівництва та процесів реконструкції. Як було зазначено, традиційні машини з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) характеризуються значними втратами енергії, низьким коефіцієнтом корисної дії (ККД) та високими експлуатаційними витратами, що зумовлює їх обмежену ефективність в умовах сучасних вимог до енергоощадності та екологічності.

Порівняльний аналіз показав, що сучасні гібридні та електричні будівельні машини забезпечують суттєве зниження енергоспоживання завдяки переходу на електрифіковані компоненти, використанню рекуперації енергії, оптимізації режимів роботи та впровадженню інтелектуальних систем керування тощо, що сприяє зменшенню витрат енергії, скороченню шкідливих викидів та підвищенню ефективності виконання будівельних робіт.

Таким чином, поступовий перехід до використання енергоощадних будівельних машин, що

сприятиме підвищенню ефективності будівельного виробництва, зниженню енергетичних витрат та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище є досить важливим. Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням систем енергоменеджменту, розвитком електрифікації техніки та впровадженням інноваційних технологій у процеси механізації (використання водневих паливних елементів, впровадження систем штучного інтелекту (ШІ), застосування автономної роботизованої техніки).

Список використаних джерел

1. Fedyshyn, B. M., Balaka, M. M., & Lysak, S. I. (2025). Vid dyzelnykh do elektrychnykh pryvodiv budivelnykh mashyn: enerhoefektyvnist ta ekolohichnist. U «Suchasne avtomobilebuduvannia, transport i dorozhnia infrastruktura '2025 (MAITRI 2025)» *[From diesel to electric drives for construction machinery: energy efficiency and environmental friendliness. In «Modern Automotive, Transport and Road Infrastructure '2025 (MAITRI 2025)»]*. Kharkiv : KhNADU. 250-254. [in Ukrainian]. https://repositary.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/4e5281d1-573b-4c11-a8b3-6cd8040ecb90/content
2. Lozinskyi, D. O., Piontkevych, O. V., & Syrotin, O. A. (2025). Innovatsiini pidkhody do pidvyshchennia enerhoefektyvnosti elektrohidravlichnykh system [Innovative approaches to energy efficiency enhancement of electrohydraulic systems]. *Naukovi pratsi Vinnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu, 2*, 1-8. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.31649/2307-5376-2025-2-214-221
3. Khmara, L., & Kholodov, A. (2023). Naukovi osnovy stvorennia hibrydnykh pryvodiv dlia pidvyshchennia enerhoefektyvnosti budivelno-dorozhnikh mashyn [Scientific basis of creating hybrid drives to increase the energy efficiency of road construction machines]. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University, 2*(101), 74-79. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.30977/bul.2219-5548.2023.101.2.74-79
4. Nguyen, T. H., Do, T. C., Nguyen, M. H., Ahn, J.-H., & Ahn, K. K. (2026). Energy consumption reduction technologies in hybrid hydraulic construction machine: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 225*, 116150. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116150
5. Bhola, M., & Wrat, G. (2025). Energy-Efficient Hydraulics in Heavy Machinery: Technologies, Challenges, and Future Directions. *Sustainability, 18*(1), 302. https://doi.org/10.3390/su18010302
6. He, X., & Jiang, Y. (2018). Review of hybrid electric systems for construction machinery. *Automation in Construction, 92*, 286-296. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.04.005
7. Casoli, P., Riccò, L., Campanini, F., & Bedotti, A. (2016). Hydraulic Hybrid Excavator – Mathematical Model Validation and Energy Analysis. *Energies, 9*(12), 1002. https://doi.org/10.3390/en9121002
8. Babaiev, V. M. ta inshi. (2021). *Rekonstruktsiia tsyvilnykh ta promyslovykh budivel i sporud : pidruchnyk [Reconstruction of civil and industrial buildings and structures : textbook]*. Kharkiv : KhNUMH im. O. M. Beketova. [in Ukrainian]. https://eprints.kname.edu.ua/60932/1/24%20%D1%8D%D0%BA%D0%B7%20%D0%A0%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F%202020%202%D0%9F%20%D1%81%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%BA%D0%B0.pdf
9. Shapoval, S. V., & Bolotskykh, O. M. (2020). *Budivelna tekhnika ta vyrobnycha baza budivnytstva : konspekt lektsii dlia studentiv usikh form navchannia osvitno-kvalifikatsiinoho rivnia «bakalavr» spetsialnosti 192 – Budivnytstvo ta tsyvilna inzheneriia [Construction equipment and production base of construction : lecture notes for students of all forms of education of the educational and qualification level «bachelor» of specialty 192 - Construction and civil engineering]*. Kharkiv : KhNUMH im. O. M. Beketova. [in Ukrainian]. https://eprints.kname.edu.ua/55792/1/2020_%D0%9F%D0%95%D0%A7_3%D0%9B_%D0%A8%D0%B0%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BB%20%D0%91%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D1%82%D1%81%D0%BA%D0%B8%D1%85.pdf
10. *Top-10 tendentsii intelektualizatsii budivelnoi mashyny v 2025 r. (Parti) [Top 10 trends in construction machinery intellectualization in 2025 (Parti)]* (2025, 14 lypnia). Chuntsyn Kyson mashyny obladnannia Ltd. [in Ukrainian]. https://ua.kysoncn.com/info/top-10-trends-in-the-intelligentization-of-con-17449138712273920.html
11. Teteriatnyk, O., & Balaka, M. (2021). Analiz shliakhiv zabezpechennia enerhonezalezhnosti budivelnoi tekhniky z vykorystanniam vidnovliuvalnykh dzherel enerhii [Analysis of ways to ensure the energy independence of construction techniques using renewable energy sources]. *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny*, (97), 24-35. https://doi.org/10.32347/gbdmm2021.97.0301
12. *Comparing Traditional vs. Energy-Efficient Machines: Which is Right for Your Business?* Conserv Machinery- Buy, Rent, and Sell Quality Heavy Equipment. https://www.conservmachinery.com/blog/comparing-traditional-vs-energy-efficient-machines-which-is-right-for-your-business

ЗАСТОСУВАННЯ БАШТОВИХ КРАНІВ В УМОВАХ ВИСОКОЇ УРБАНІЗАЦІЇ МІСТ

Денис Науменко, здобувач освіти рівня бакалавр[1],
Дмитро Міщук, доцент, к.т.н., доцент[1],
Максим Балака, доцент, к.т.н., доцент[1],
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил, 31, 03037, Україна

***АНОТАЦІЯ**. В роботі досліджено науково-прикладну задачу оптимізації функціонування баштових кранів у межах обмеженого простору сучасних мегаполісів. Висока урбанізація міст потребує зведення об'єктів в умовах щільної забудови, що підвищує ризики просторових колізій та знижує ефективність логістики будівельного майданчика. В роботі запропоновано математичну модель мультикритеріальної цільової функції, яка мінімізує транспортну роботу крана за рахунок оптимізації координат розташування крана. Особливу увагу приділено формалізації системи просторових обмежень, включаючи ділянки безпеки навколо існуючої забудови, лінії електропередач та сектори із забороною переміщення вантажів. На основі чисельного моделювання було встановлено, що врахування щільності матеріальних потоків та геометрії майданчика на етапі проектування виконання робіт дозволяє зменшити загальний цикл роботи техніки на 12%. Результати дослідження мають практичне значення для автоматизації процесів генерального планування будівництва в історичних та щільно забудованих центрах міст.*

***Ключові слова:** баштові крани; урбанізація; оптимізація; урбанізація; будівництво.*

Вступ. Сучасні тенденції містобудування характеризуються стрімким зростанням щільності міського середовища. Дефіцит вільних площ у мегаполісах та історичних центрах міст зумовлює необхідність зведення житлових і комерційних об'єктів в умовах надзвичайно стесненої забудови. Особливе місце в системі механізації таких будівельних майданчиків посідають баштові крани, які є головним інструментом для переміщення конструкцій та матеріалів.

Ефективність зведення будівель безпосередньо залежить від просторового розташування вантажопідйомного крана. У звичайних умовах проектування генерального плану будівництва, місце розташування базується переважно на забезпеченні геометричної досяжності точок монтажу та точок розвантаження. Проте в умовах високої урбанізації задача радикально ускладнюється. Виникає потреба врахування специфічних просторових та технологічних обмежень: близькості існуючих споруд, ліній електропередач, приватних територій, а також заборонених секторів повороту стріли, над якими пронесення вантажів суворо заборонено з міркувань безпеки. Нераціональний вибір геометричних координат стоянки крана призводить збільшення тривалості робочого циклу, перевитрат електроенергії та підвищення ризику виникнення аварійних ситуацій. Через це автоматизація розрахунку та пошук математично обґрунтованого, оптимального розташування баштового крана в умовах високої щільності міського середовища є актуальною науково-практичною задачею, що має прямий вплив на техніко-економічні показники будівництва.

Огляд існуючих досліджень. Аналіз сучасної літератури дозволяє виділити кілька ключових напрямів розвитку ідеї оптимального розташування баштового крана на будівельному майданчику.

Класичні підходи вирішення задачі оптимального розташування крана на будівельному майданчику полягають у мінімізація транспортних витрат логістики будівельного майданчика. Автори роботи [1] розглядають задачу мінімізацію транспортної роботи методом геометричного моделювання, де визначається локації крана, як класична транспортна проблема розміщення об'єктів. У роботі [2] фокус дослідження змістився на автоматизацію розрахунку часу двовимірного (2D) та тривимірного (3D) переміщення гака. Запропоновані математичні моделі дозволили розраховувати час циклу крана з урахуванням одночасної роботи механізмів повороту стріли та радіального руху каретки. Проте ці моделі розглядалися для «ідеального» відкритого простору і не враховували перешкоди на майданчику. В роботі [3] показано високу ефективність генетичних алгоритмів при вирішенні задач розташування як одного, так і групи взаємодіючих баштових кранів. Оптимізація проводилася за критерієм сумарної вартості або часу оренди техніки. В дослідженні [4]

продемонстровано, що алгоритми рою частинок забезпечують вищу швидкість збіжності при пошуку координат крана у багатовимірному просторі обмежень, ніж традиційні градієнтні методи. В подальшому напрям досліджень змістився на фактор безпеки та роботу в стеснених умовах. В роботі [5] надано аналіз колізій (зіткнень) елементів крана з існуючими будівлями навколо майданчика та показано ефективність інтеграції у цільові функції штрафних коефіцієнтів за наближення до небезпечних границь. Також активно розробляють алгоритми підбору кранів за їхніми вантажно-висотними характеристиками під конкретні геометричні обмеження будівельних майданчиків, що є критичним для точкової забудови [6].

Сучасний етап розвитку галузі характеризується синергією методів оптимізації з інформаційним моделюванням будівель (BIM). В роботі [7] описано алгоритми, які автоматично імпортують координати об'єктів монтажу та масу елементів безпосередньо з 3D-моделей (наприклад, Autodesk Revit), що мінімізує людський фактор при формуванні матриці вантажопотоків. Також розвивається напрям динамічного перепланування ділянок роботи крана за допомогою LiDAR-сканування території під час моніторингу будівництва.

Попри значну кількість публікацій, більшість існуючих моделей розглядають обмеження щільної забудови лише, як статичні геометричні бар'єри. Недостатньо вивченими залишаються питання інтеграції динамічних ділянок ризику (наприклад, зміна повітряних потоків між висотними будівлями) та оптимізації режимів роботи крана з урахуванням нерівномірності постачання матеріалів в умовах заторів у мегаполісах.

Виклад основного матеріалу. Для оптимізації розташування баштового крана використаємо мультикритеріальну цільову функцію, яка враховуватиме мінімізація транспортного часу, мінімізацію енергетичних витрат, мінімізація ризику колізій у щільній забудові. Потрібно знайти такі координати крана (Xс, Yс), які мінімізують загальний час/вартість переміщення вантажів, але при цьому задовольняють низку жорстких обмежень.

Критерій мінімізація транспортного часу відповідає за продуктивність:

$$f_1(X_c, Y_c) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} Q_{ij} T_{ij}(X_c, Y_c), \quad (1)$$

де n – кількість точок постачання; m – кількість точок монтажу (координати елементів будівлі, що зводиться); Q_{ij} – об'єм (або кількість рейсів) вантажу, який потрібно перемістити з точки постачання i в точку монтажу j; $T_{ij}(X_c, Y_c)$ – час повного циклу роботи крана між точками i та j при координатах крана (X_c, Y_c).

Мінімізація енергетичних витрат дозволяє визначити оптимальний виліт стріли крана, що зменшує споживання енергії двигунами каретки та повороту:

$$f_2(X_c, Y_c) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} Q_{ij} E_{ij}(X_c, Y_c), \quad (2)$$

де E_{ij} – енергія, що витрачається на переміщення вантажу між точками i та j.

Мінімізація ризику колізій у щільній забудові дозволяє уникнути аварійних ситуацій при роботі крана:

$$f_3(X_c, Y_c) = \sum_{b=1}^{K} \frac{1}{D_b(X_c, Y_c) - L_{безп}}, \quad (3)$$

де D_b – відстань від крана до b-ї існуючої перешкод; $L_{безп}$ – мінімально допустима безпечна відстань (буферна відстань) і якщо кран підходить впритул до буфера, значення f_3 прямує до нескінченності.

Оскільки критерії мають різні одиниці виміру, їх необхідно нормалізувати (привести до діапазону від 0 до 1) та об’єднати за допомогою вагових коефіцієнтів α_1, α_2, α_3:

$$F(X_c, Y_c) = \alpha_1 \frac{f_1}{f_{1\max}} + \alpha_2 \frac{f_2}{f_{2\max}} + \alpha_3 \frac{f_3}{f_{3\max}} \to \min. \quad (4)$$

Важлива умова для вагових коефіцієнтів:

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1. \quad (5)$$

В умовах щільної забудови безпека є пріоритетом, тому коефіцієнту α_3 (ризик колізій) зазвичай присвоюють найвище значення.

Системи обмежень для стеснених умов:

- вага найважчого елемента в точці *j* (Pj) не повинна перевищувати вантажопідйомність крана на відповідному вильоті стріли:

$$P_j < G(R_j); \quad (6)$$

- всі точки монтажу та складання мають знаходитися в межах радіусу дії стріли:

$$(R_{min} \leq R_{i,j} \leq R_{max}). \quad (7)$$

- колізії з існуючими будівлями – кран не може бути розташований ближче ніж на безпечну відстань $L_{безп}$ до існуючих споруд або ЛЕП. Якщо (X_b, Y_b) – координати кутів існуючих будівель, тоді:

$$\sqrt{(X_c - X_b)^2 + (Y_c - Y_b)^2} \geq L_{безп}. \quad (8)$$

- обмеження повороту стріли в щільній забудові задається обмеженням на кут повороту стріли:

$$\Theta_{min} \leq \Theta \leq \Theta_{max}. \quad (9)$$

Час циклу крана:

$$T_{i,j} = \max\left(\frac{|R_i - R_j|}{\upsilon_в}, \frac{|Q_i - Q_j|}{\omega_п}\right) + \frac{H}{\upsilon_п}, \quad (10)$$

де $\upsilon_в$ $\upsilon_п$ – відповідно швидкості механізму зміни вильоту стріли та підіймання вантажу, $\omega_п$ – кутова швидкість повороту стріли; H – висота підіймання вантажу.

Список використаних джерел

1. Warszawski, A. (1973). Analysis of Transportation Methods in Construction. *Journal of the Construction Division*, *99*(1), 191–202. https://doi.org/10.1061/jcceaz.0000373
2. Choi, C.W., Harris, F.C. (1991). Technical note. A model for determining optimum crane position. Proceedings of the Institution of Civil Engineers (1991) 90 (3): 627–634. https://doi.org/10.1680/iicep.1991.14735
3. Bresnen, M. J. (1991). Construction contracting in theory and practice: A case study. Construction Management and Economics, 9(3), 247–262. https://doi.org/10.1080/01446199100000021.
4. Huang, C., Wong, C. K., Tam, C. M. (2011). Optimization of tower crane placement and material delivery scheduling using multi-population genetic algorithms. Journal of Construction Engineering and Management, 137(12), 1150–1162.
5. Oral M., Bazaati S., Aydinli S., Oral E. (2018). Construction Site Layout Planning: Application of Multi-Objective Particle Swarm Optimization. Teknik Dergi. https://doi.org/10.18400/tekderg.389638
6. Lampert, D. J., & Wu, M. (2018). Automated Approach for Construction of Long-Term, Data-Intensive Watershed Models. Journal of Computing in Civil Engineering, 32(4), 06018001. https://doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000762.
7. Wang, J., Zhang, X., Shou, W., Wang, X., Xu, B., Kim, M. J., & Wu, P. (2015). A BIM-based approach for automated tower crane layout planning. Automation in Construction, 59, 168–178. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.05.006

ОПИС ДИНАМІКИ ГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДУ МЕХАНІЗМУ ПІДІЙМАННЯ СТРІЛИ КРАНА-МАНІПУЛЯТОРА

Дмитро Міщук, доцент, к.т.н., доцент[1],
Євгеній Горбатюк, доцент, к.т.н., доцент[1],
Максим Балака, доцент, к.т.н., доцент[1],
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил, 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. *У роботі розглянуто задачу математичного опису динаміки гідравлічного приводу механізму підіймання стріли крана-маніпулятора з урахуванням взаємодії механічної та гідравлічної підсистем. Розроблено математичну модель, яка враховує масово-інерційні параметри стріли, характеристики гідроциліндра, зміну тиску робочої рідини в порожнинах приводу, сили зовнішнього навантаження та вплив гідравлічних втрат. Модель описано системою диференціальних рівнянь, що дозволяє досліджувати перехідні процеси під час переміщення штока гідроциліндра та визначати динамічні характеристики механізму. Для чисельного інтегрування рівнянь використано метод Рунге–Кутта четвертого порядку. Проведено чисельне моделювання руху механізму підіймання стріли за різних режимів навантаження та параметрів гідросистеми. Отримані результати дали змогу оцінити вплив тиску, маси вантажу, жорсткості системи та параметрів робочої рідини на швидкість переміщення, стійкість руху та коливальні процеси приводу. Результати дослідження можуть бути використані під час проектування та оптимізації гідравлічних приводів кранів-маніпуляторів з метою підвищення їхньої надійності, плавності роботи та енергоефективності.*

Ключові слова: *динаміка руху; кран-маніпулятор; гідропривід; хвильові процеси; механізм.*

Вступ. Сучасні крани-маніпулятори широко застосовуються в будівельній, комунальній та логістичній галузях завдяки своїй універсальності та високій продуктивності. Одним з ключових вузлів таких машин є механізм підіймання стріли, який забезпечує точність позиціонування вантажу та стійкість роботи в умовах динамічних навантажень. Як правило, для реалізації механізму підіймання стріли використовуються гідравлічні приводи на основі гідроциліндрів. Це дозволяє отримати високу питомою потужністю, надійність та зручністю управління. Через складність динамічних процесів, що виникають під час роботи гідравлічного приводу, актуальним залишається питання моделювання та оптимізації параметрів приводу. Динамічні характеристики приводу значно впливають на точність позиціонування, енергоспоживання та надійність обладнання.

Однією із важливих задач є оптимальне енергозабезпечення, зокрема це задачі, де необхідно створювати системи із електроживленням від акумуляторної батареї, яка повинна працювати довгий проміжок часу на одному заряді батареї. Дослідження динаміки гідравлічного приводу механізму підіймання стріли кранів-маніпуляторів дозволить знайти оптимальну конструкцію приводу та реалізувати задачу ефективного енергоживлення подібних систем.

У даній роботі запропоновано дослідити динамічну модель гідравлічного приводу механізму підіймання стріли крана-маніпулятора, яка враховує інерційні, гравітаційні та демпфуючі навантаження, а також кінематику механізму.

Огляд існуючих робіт. Питанням моделювання та оптимізації гідравлічних приводів присвячено значну кількість наукових праць. У роботах [1-3] розглянуто математичні моделі гідравлічних систем з урахуванням стисливості рідини, тертя та динаміки клапанів. Автори наукових робіт [4, 5] досліджують вплив параметрів гідроциліндрів на динаміку маніпуляторів, зокрема на точність позиціонування та стійкість їхньої роботи, а у працях [6, 7] запропоновано методи оптимізації гідравлічних приводів за критеріями енергоефективності та надійності.

Більшість існуючих моделей не враховують специфіку роботи кранів-маніпуляторів, зокрема динаміку стріли під час підіймання вантажу в умовах змінних зовнішніх навантажень. Таким чином, актуальним залишається розробка узагальненої динамічної моделі, яка б враховувала всі основні фактори, що впливають на роботу гідравлічного приводу механізму підіймання стріли.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом дослідження в даній роботі є гідравлічний привід механізму підіймання стріли крана-маніпулятора (Рис. 1). Основними елементами системи є: привідний гідроциліндр подвійної дії, стрілова система з розподіленими масою та інерційними характеристиками, механізм кріплення гідроциліндра до стріли, система управління тиском у гідросистемі. В подальшому буде проведено дослідження навантажень, що виникають на штоку гідроциліндра механізму підіймання стріли.

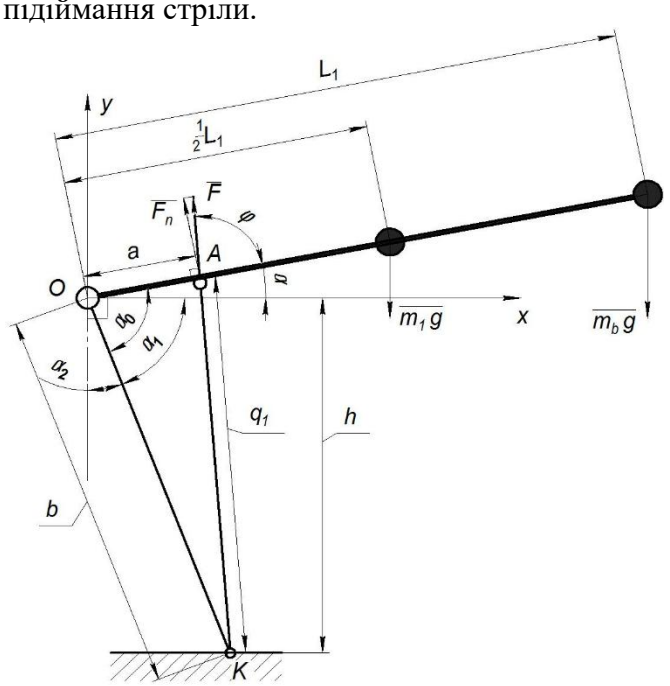


Рис. 1. **Динамічна модель стрілової системи, що досліджується**

Для побудови математичної модулі механічної системи стріли, яке б описувало динаміку роботи, скористаємося рівняннями Лагранжа 2-го роду для такої систем:

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_1} - \frac{\partial T}{\partial q_1} = F - \frac{\partial П}{\partial q_1}. \tag{1}$$

Кінетична енергія механічної системи стріли має вид:

$$T = \frac{1}{2} J_{c1} \dot{\alpha}^2, \tag{2}$$

де $J_{c1} = J_{01} + m_b L_1^2$ - зведений момент інерції стріли та вантажу; $J_{01} = \frac{1}{3} m_1 L_1^2$ - момент інерції стріли; m_1 — маса стріли

Потенціальна енергія механічної системи стріли:

$$П = -m_1 g \frac{L_1}{2} \sin\alpha - m_b g L_1 \sin\alpha. \tag{3}$$

Визначено математичну модель, яка описує динаміку зміни навантаження на привідному гідроциліндрі стрілової системи:

$$F = \frac{J_{c1}}{a^2 b^2 (1-\xi^2)} \times (\ddot{q}_1 q_1^2 + \dot{q}_1^2 q_1 - \frac{\xi}{ab(1-\xi^{2^2})} \dot{q}_1^2 q_1^3) + \frac{g L_1 m_b q_1 \xi}{ab\sqrt{1-\xi^2}} + \frac{g L_1 m_1 q_1 \xi}{2ab\sqrt{1-\xi^2}}, \tag{4}$$

де $\xi = \frac{a^2 + b^2 - q_1^2}{2ab}$; a, b, L_1 - розміри згідно рис. 1; m_1 m_b - маси стріли та вантажу відповідно;

q_1 - узагальнена координата.

В подальшому для дослідження динаміки гідроприводу розглянемо спрощену схему, яка складається із нерегульованого гідронасоса, золотникового розподільника, гідроциліндра із

безштоковою та штоковою порожнинами. Гідросистема має розімкнену циркуляцію робочої рідини через гідробак.

Згідно принципу Д'Аламбера диференціальне рівняння руху штоку гідроциліндра:

$$m_{np}\ddot{q}_1 + b\dot{q}_1 + cq_1 = p_1S_1 - p_2S_2 - F_{mp} - F, \quad (5)$$

де $m_{np} = J_{c1}\frac{\dot{\alpha}^2}{\dot{q}_1^2} = J_{c1}\frac{q_1^2}{a^2b^2(1-\xi^2)}$ – зведена маса рухомих частин стрілової системи; q_1 – переміщення штоку гідроциліндра; p_1 та p_2 – тиск в поршневій та штоковій порожнинах гідроциліндра відповідно; S_1 та S_2 – ефективна площа поршня зі сторони безштокової та штокової порожнин відповідно; c – коефіцієнт жорсткості; b – коефіцієнт в'язкого тертя; F_{mp} – сила напівсухого тертя поршня та штока гідроциліндра; g – прискорення вільного падіння. Зміна тиску в порожнинах гідроциліндра визначатимемо з урахуванням рівнянь нерозривності потоку та стискання робочої рідини:

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{E_{np1}}{V_1}(Q_1 - S_1\frac{dq_1}{dt}); \quad \frac{dp_2}{dt} = \frac{E_{np2}}{V_2}(-Q_2 + S_2\frac{dq_1}{dt}), \quad (6)$$

де Q_1 та Q_2 – подача рідини в безштоковій та штоковій порожнинах відповідно; E_{np1} та E_{np2} – зведені модулі об'ємної пружності робочої рідини в безштоковій та штоковій порожнинах відповідно; V_1 та V_2 – об'єми робочої рідини в безштоковій та штоковій порожнинах гідроциліндра з врахуванням об'ємів рідини в прилеглих до них трубопроводах відповідно.

Золотниковий розподільник через свої прохідні канали може пропускати визначену кількість рідини, зокрема:

$$Q_1 = \mu \cdot f_{др1}\sqrt{\frac{2}{\rho}|p_n - p_1|}\times sign(p_n - p_1); \quad Q_2 = \mu \cdot f_{др2}\sqrt{\frac{2}{\rho}|p_2 - p_{зл}|}\times sign(p_2 - p_{зл}), \quad (7)$$

де μ - коефіцієнт витрат робочої рідини через дросельні канали розподільника; ρ - щільність робочої рідини; p_n - робочий тиск гідронасоса; $p_{зл}$ - тиск в зливній магістралі.

Список використаних джерел

1. Mischuk D. (2016). Hydraulic cylinder of the volumetric hydraulic drive research of the dynamic model. *Girnichi, budivelni, Dorozhni Ta meliorativni Mashini*, Nr 87, 74–81.
2. Mishchuk D. (2018). Development of the mathematical model a single stage pulse hydraulic drive. *Transfer of Innovative Technologies*, 1(2), 51–57. https://doi.org/10.31493/ tit1812.0202.
3. Ming Xu., Jing Ni, Guojin Ch. (2014). Dynamic Simulation of Variable-Speed ValveControlled-Motor Drive System with a PowerAssisted Device. Journal of Mechanical Engineering, 60(9), 581-591. https://doi.org/10.5545/ svjme.2013.1532
4. Mishchuk D. O. (2017). Study of the dynamics of the boom manipulator mounted on an elastic sup-port. *Girnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny*, Nr 90, 11-18.
5. Voliyanuk V., Mishchuk D., Parkhomenko M. (2022). Modeling dynamic control model of a two-link crane-manipulator. *Girnichi, budivelni, Dorozhni Ta meliorativni Mashini*, (99), 15–19. https://doi.org/10.32347/gbdmm.2022.99.0201.
6. Qiu, Hanyu and Qi Su, (2021). Simulation Research of Hydraulic Stepper Drive Technology Based on High Speed On/Off Valves and Miniature Plunger Cylinders. *Micromachines*. https://doi.org/10.3390/mi12040438.
7. Tkachenko Yu. A., Orlov S. V. (2021). Automatic stabilisation system for the transport module of multiple launch rocket systems. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy*, 1(42), 137–143. https://doi.org/10.30748/nitps.2021.42.18.

ВПЛИВ ФОРМИ НАКОНЕЧНИКА ГЛИБИННОГО ВІБРАТОРА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ УЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННОЇ СУМІШІ

Микола Нестеренко, доцент, к.т.н., доцент[1] (ORCID: 0000-0002-4073-1233),
Володимир Гавріков, аспірант[1] (ORCID: 0009-0007-6893-7739)
[1]Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка 24, 36011, Україна

АНОТАЦІЯ. *У роботі розглянуто вплив форми наконечника глибинного вібратора на ефективність ущільнення бетонної суміші. Обґрунтовано, що робочий орган глибинного вібратора взаємодіє безпосередньо з внутрішнім об'ємом суміші, тому його геометрія істотно впливає на характер передавання вібраційної енергії, формування зони ущільнення, переміщення частинок заповнювача та видалення повітряних включень. Проаналізовано доцільність застосування наконечників різної форми: циліндричної, конічної, заокругленої, ребристої та спеціальної форми з каналами для локального введення рідких компонентів. Показано, що раціональна форма наконечника повинна забезпечувати достатню інтенсивність вібраційного впливу, рівномірне поширення коливань у бетонній суміші, зменшення застійних зон і мінімізацію ризику розшарування. Встановлено, що вдосконалення геометрії наконечника є одним із перспективних напрямів підвищення якості ущільнення бетонних сумішей, особливо у густоармованих конструкціях, виробах складної форми та при роботі з жорсткими або малорухомими сумішами. Матеріал узгоджується з попередніми дослідженнями динаміки глибинного вібратора та систем локальної подачі компонентів у зону вібраційного ущільнення.*

Ключові слова: *глибинний вібратор; наконечник; бетонна суміш; ущільнення; вібраційний вплив; робочий орган; форма наконечника; зона ущільнення; дебалансний віброзбуджувач; однорідність бетону; розшарування.*

Вступ. Глибинні вібратори широко застосовуються для ущільнення бетонних сумішей під час виготовлення монолітних і збірних залізобетонних конструкцій. На відміну від поверхневого вібраційного обладнання, глибинний вібратор занурюється безпосередньо в об'єм суміші та створює локальну зону інтенсивної дії, у якій зменшується внутрішнє тертя між частинками, руйнуються слабкі структурні зв'язки, видаляються повітряні включення та формується щільніша структура бетону .

Ефективність роботи глибинного вібратора визначається не лише частотою обертання дебалансного вала та амплітудою коливань, а й характером просторового руху корпуса, співвідношенням поступальних і кутових коливань, умовами взаємодії робочого органа з бетонною сумішшю та формою наконечника . Саме наконечник безпосередньо контактує з матеріалом і визначає характер передавання вібраційної енергії в навколишній об'єм суміші.

Форма наконечника впливає на розміри активної зони ущільнення, інтенсивність переміщення частинок заповнювача, швидкість видалення повітряних включень і ймовірність утворення локальних зон недостатнього ущільнення. Циліндричні, конічні, заокруглені, ребристі або спеціальні наконечники з каналами для подачі рідких компонентів можуть по-різному впливати на характер руху бетонної суміші та рівномірність її ущільнення. Зокрема, використання насадок для локального введення цементного молочка або модифікуючих компонентів дає можливість подавати активну рідку фазу безпосередньо в зону найбільш інтенсивного вібраційного впливу

Аналіз літературних джерел. У сучасних дослідженнях глибинного вібраційного ущільнення бетонних сумішей значна увага приділяється не лише амплітудно-частотним параметрам вібратора, а й характеру взаємодії робочого органа з бетонною сумішшю. У роботі [1] розглянуто систему локальної подачі модифікуючих компонентів у зону вібраційного ущільнення, що є важливим для теми різних типів наконечників, оскільки спеціальна насадка може не тільки передавати коливання, а й забезпечувати введення рідкої фази безпосередньо в активну зону дії глибинного вібратора.

У праці [2] досліджено динаміку глибинного вібратора з урахуванням поступального та кутового руху робочого органа. Це джерело є базовим для обґрунтування того, що форма

наконечника повинна розглядатися не ізольовано, а разом із просторовою траєкторією руху корпуса, дією дебалансного віброзбуджувача та передаванням вібраційної енергії в бетонну суміш.

Важливе значення для вибору форми наконечника має поняття радіуса дії глибинного вібратора. У роботі [3] запропоновано підхід до прогнозування радіуса дії покерного вібратора на основі поширення хвиль у свіжому бетоні. Це дозволяє оцінювати, як конструктивні особливості робочого органа можуть впливати на ефективну зону ущільнення.

У дослідженні [4] проаналізовано вплив покерного вібрування на осідання заповнювача у свіжому бетоні з різними реологічними властивостями.

Мета роботи. Метою роботи є обґрунтування впливу форми наконечника глибинного вібратора на ефективність ущільнення бетонної суміші. Передбачається проаналізувати особливості взаємодії різних типів наконечників із бетонною сумішшю, визначити їх вплив на передавання вібраційної енергії, формування активної зони ущільнення, переміщення частинок заповнювача та видалення повітряних включень. Особливу увагу приділено вибору такої геометрії наконечника, яка забезпечує рівномірне поширення коливань у суміші, зменшення застійних зон, мінімізацію ризику розшарування та підвищення якості сформованої структури бетону.

Виклад основного матеріалу. Глибинний вібратор під час ущільнення занурюється безпосередньо в об’єм бетонної суміші та передає їй коливальну енергію через поверхню робочого органа. Найбільш інтенсивна взаємодія відбувається в зоні наконечника, оскільки саме ця частина першою контактує із сумішшю під час занурення, формує напрям локального переміщення частинок і впливає на характер поширення вібраційної дії. Тому форма наконечника є важливим конструктивним параметром, який визначає не лише зручність занурення вібратора, а й якість ущільнення бетонної суміші.

У загальному випадку робочий орган глибинного вібратора можна розглядати як коливальну систему, що взаємодіє з в’язкопластичним середовищем. Під дією дебалансного віброзбуджувача корпус здійснює складний просторовий рух, який поєднує поступальні та кутові коливання. У результаті бетонна суміш навколо вібратора переходить у більш рухомий стан, зменшується внутрішнє тертя між частинками, полегшується переміщення цементного тіста та заповнювача, а повітряні включення витісняються до поверхні. Водночас ефективність цього процесу залежить від того, наскільки рівномірно вібраційна енергія передається в навколишній об’єм суміші [2].

Найпоширенішим є циліндричний наконечник, який має просту форму, є технологічним у виготовленні та забезпечує рівномірний контакт із бетонною сумішшю по боковій поверхні. Така форма є універсальною і може застосовуватися для більшості бетонних сумішей середньої рухливості.

Конічний наконечник має перевагу під час занурення в бетонну суміш, оскільки зменшує початковий опір входження робочого органа в матеріал. Така форма сприяє розсуванню частинок суміші та може бути доцільною для ущільнення густоармованих конструкцій або виробів складної форми. Водночас надмірно гостра конічна частина може створювати локально спрямований вплив, що потребує обґрунтування кута конусності для запобігання нерівномірному ущільненню.

Заокруглений або сферичний наконечник забезпечує більш плавну взаємодію з бетонною сумішшю. Він зменшує локальні концентрації напружень у зоні контакту, сприяє рівномірнішому обтіканню робочого органа сумішшю та знижує ймовірність утворення застійних зон біля нижньої частини вібратора. Така форма може бути ефективною у випадках, коли необхідно забезпечити м’яке, але рівномірне передавання коливань у навколишній об’єм матеріалу.

Ребристий або профільований наконечник дозволяє підвищити інтенсивність взаємодії з бетонною сумішшю за рахунок збільшення площі контакту та створення додаткових локальних зсувних деформацій. Під час коливань ребра сприяють активнішому переміщенню частинок заповнювача й цементного тіста, що може підвищувати ефективність ущільнення. Проте така форма має застосовуватися обережно, оскільки надмірна інтенсивність дії може спричинити розшарування суміші або осідання крупного заповнювача, особливо за тривалого вібрування [4].

Окремий інтерес становлять спеціальні наконечники з каналами або жиклерами для локального введення цементного молочка чи рідких модифікуючих компонентів у зону ущільнення. У цьому випадку наконечник виконує подвійну функцію: передає вібраційну енергію та забезпечує

дозовану подачу активної рідкої фази безпосередньо в зону інтенсивного переміщення частинок. Такий підхід може бути корисним для жорстких, малорухомих або неоднорідних сумішей, де звичайне вібрування не завжди забезпечує достатнє змочування заповнювача та рівномірний розподіл цементного тіста [1].

Порівняння різних типів наконечників показує, що їх ефективність залежить від умов роботи. Для універсального застосування доцільним є циліндричний або заокруглений наконечник. Для полегшення занурення у щільну або жорстку суміш перевагу може мати конічна форма. Для інтенсифікації локального переміщення суміші можуть застосовуватися ребристі або профільовані наконечники. Для спеціальних технологічних задач, пов'язаних із покращенням структури бетону в локальних зонах, перспективними є наконечники з каналами для подачі рідких компонентів.

Висновки. У роботі розглянуто вплив форми наконечника глибинного вібратора на ефективність ущільнення бетонної суміші. Встановлено, що наконечник є одним із важливих конструктивних елементів робочого органа, оскільки саме через нього відбувається початкова взаємодія вібратора з бетонною сумішшю, передавання коливальної енергії та формування локальної зони ущільнення.

Показано, що різні форми наконечників по-різному впливають на процес ущільнення. Циліндричний наконечник є найбільш універсальним і забезпечує стабільне передавання вібраційної дії. Конічна форма полегшує занурення робочого органа в жорсткі та малорухомі суміші. Заокруглений наконечник сприяє більш плавній взаємодії з матеріалом і зменшує ймовірність утворення застійних зон. Ребристі або профільовані наконечники можуть інтенсифікувати локальне переміщення суміші, однак потребують обґрунтованого вибору режимів роботи для запобігання розшаруванню.

Список використаних джерел

1. Havrikov, V. V., & Buhrova, T. M. (2026). Lokalna podacha modyfikuiuchykh komponentiv u zonu vibratsiinoho ushchilnennia betonnoi sumishi [Local supply of modifying components into the vibration compaction zone of a concrete mixture]. System Technologies, 4(165), 175–183 https://doi.org/10.34185/1562-9945-4-165-2026-16 [in Ukrainian].
2. Havrikov, V., & Buhrova, T. (2026). Dynamics of an internal vibrator considering the translational and angular motion of the working body. Modern Problems of Metallurgy, (29), 337–351. https://doi.org/10.34185/1991-7848.2026.01.22
3. Banfill, P. F. G., Teixeira, M. A. O. M., & Craik, R. J. M. (2011). Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation. Cement and Concrete Research, 41(9), 932–941. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.04.011
4. Zhang, J., Gao, X., & Su, Y. (2019). Influence of poker vibration on aggregate settlement in fresh concrete with variable rheological properties. Journal of Materials in Civil Engineering, 31(7), Article 04019128. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002782

НАУКОВІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ ВІБРАЦІЙНИХ МАШИН ІЗ КЕРОВАНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ВІБРОЗБУДЖЕННЯ

Микола Нестеренко, доцент, к.т.н., доцент[1] (ORCID: 0000-0002-4073-1233),
[1]Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка 24, 36011, Україна

АНОТАЦІЯ. *У роботі розглянуто наукові передумови створення високоефективних вібраційних машин із застосуванням віброзбуджувачів коливань зі змінними параметрами. Показано, що традиційні вібраційні машини з постійними режимами роботи не завжди забезпечують раціональну взаємодію робочого органу з оброблюваним середовищем, особливо за змінних технологічних умов, фізико-механічних властивостей матеріалу та навантаження. Обґрунтовано доцільність використання віброзбуджувачів, які дають змогу змінювати частоту, амплітуду, напрям дії збурювальної сили або фазові співвідношення між окремими складовими коливань. Такий підхід дозволяє формувати складні траєкторії руху робочого органу, підвищувати інтенсивність технологічного процесу, зменшувати енерговитрати та розширювати функціональні можливості вібраційного обладнання. Встановлено, що застосування змінних параметрів збурення є перспективним напрямом удосконалення вібраційних машин для ущільнення, транспортування, сепарації, очищення та обробки матеріалів.*

Ключові слова: *вібраційна машина; віброзбуджувач; змінні параметри; амплітуда коливань; частота коливань; збурювальна сила; робочий орган; енергоефективність; технологічний процес; складні коливання.*

Вступ. Вібраційні машини широко застосовуються у будівельному, гірничому, переробному, машинобудівному та інших виробництвах для виконання процесів ущільнення, транспортування, сортування, сепарації, очищення й обробки матеріалів. Їх ефективність значною мірою визначається параметрами коливального руху робочого органу, зокрема амплітудою, частотою, напрямом дії збурювальної сили та характером траєкторії переміщення. У традиційних конструкціях ці параметри здебільшого залишаються сталими або змінюються в обмежених межах, що не завжди забезпечує раціональний режим роботи машини за різних технологічних умов.

Під час виконання технологічного процесу властивості оброблюваного середовища можуть істотно змінюватися. Наприклад, змінюються маса завантаження, вологість, гранулометричний склад, жорсткість, сипкість або опір переміщенню матеріалу. За таких умов використання незмінного режиму вібраційного впливу може призводити до зниження продуктивності, збільшення енерговитрат, нерівномірності обробки та підвищення динамічних навантажень на елементи конструкції.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності вібраційних машин є застосування віброзбуджувачів коливань зі змінними параметрами. Такі пристрої дають змогу регулювати інтенсивність збурення, змінювати частоту або амплітуду коливань, керувати напрямом дії збурювальної сили та формувати складні режими руху робочого органу. Це дозволяє адаптувати роботу машини до конкретних умов технологічного процесу й забезпечити більш раціональну взаємодію робочого органу з матеріалом.

Аналіз літературних джерел. Аналіз сучасних досліджень показує, що підвищення ефективності вібраційних машин значною мірою пов’язане з удосконаленням систем віброзбудження та можливістю формування складних режимів коливального руху. У роботі [1] розглянуто багаточастотний інерційний віброзбуджувач для промислових вібраційних машин, який дає змогу розширити діапазон робочих частот і амплітуд. Такий підхід є важливим для створення машин, здатних адаптуватися до змінних технологічних умов і забезпечувати більш інтенсивну взаємодію робочого органу з оброблюваним середовищем.

Подальший розвиток інерційних систем віброзбудження наведено у праці [2], де досліджено динаміку коаксіального інерційного віброзбуджувача. Особливістю такого пристрою є можливість отримання різних режимів збурення за рахунок зміни співвідношень кутових швидкостей неврівноважених мас. Це дозволяє формувати складні траєкторії руху робочого органу та підвищувати технологічні можливості вібраційного обладнання.

У роботі [3] обґрунтовано доцільність використання вібраційних машин із багаторежимним спектром коливань. Автори показали, що застосування складних просторових коливань сприяє підвищенню ефективності технологічного процесу та зменшенню енергоємності обладнання. Це підтверджує перспективність створення машин, у яких параметри коливального руху можуть змінюватися залежно від властивостей матеріалу та необхідного технологічного результату.

Вплив основних параметрів вібраційної машини на якість ущільнення розглянуто у праці [4]. Зокрема, показано значення амплітуди коливань, параметрів дебалансу та режимів вимушених коливань для забезпечення необхідної якості технологічного процесу. Близьким за змістом є дослідження [5], у якому експериментально проаналізовано робочий процес вібраційної установки для ущільнення бетонних сумішей зі змінним режимом роботи. Отримані результати підтверджують, що зміна частоти та режимів коливань може суттєво впливати на інтенсивність взаємодії робочого органу з матеріалом.

Окремий напрям досліджень пов’язаний із побудовою багатомасових динамічних систем і використанням незалежних джерел коливань. У роботі [6] розглянуто двомасовий вібраційний транспортер великої вантажності з незалежними електромагнітними віброзбуджувачами горизонтальних і вертикальних коливань. Така схема дає змогу керувати напрямом руху робочого органу та створювати більш гнучкі режими транспортування матеріалу.

Важливе значення для стабільної роботи вібраційних машин має врахування пружних властивостей приводу та умов виникнення резонансних режимів. У праці [7] досліджено вплив пружності дебалансного приводу на коливання машини, що є важливим для вибору раціональних параметрів віброзбуджувача та запобігання небажаним динамічним навантаженням. У роботі [8] запропоновано рівняння руху одно-, дво- і тримасових вібраційних машин із віброзбуджувачем у вигляді пасивного автобалансира, що розширює можливості математичного опису складних коливальних систем.

Керовані електрогідравлічні віброзбуджувачі розглянуто у працях [9], [10]. У цих дослідженнях показано можливість формування змінних характеристик збурення за допомогою гідравлічних систем керування. Такі віброзбуджувачі є перспективними для машин, у яких необхідно оперативно змінювати частоту, амплітуду або закон дії збурювальної сили.

Мета роботи. Метою роботи є обґрунтування наукових підходів до створення високоефективних вібраційних машин із застосуванням віброзбуджувачів коливань зі змінними параметрами. Особливу увагу приділено аналізу впливу частоти, амплітуди, напряму дії збурювальної сили та фазових співвідношень на характер руху робочого органу машини. Передбачається визначити переваги використання керованих режимів віброзбудження для підвищення продуктивності технологічного процесу, зменшення енерговитрат і забезпечення адаптації машини до змінних властивостей оброблюваного середовища.

Виклад основного матеріалу. Вібраційні машини належать до обладнання, робочий процес якого безпосередньо залежить від параметрів коливального руху. У традиційних конструкціях віброзбуджувачі переважно працюють із постійними характеристиками, що обмежує можливість адаптації машини до змінних технологічних умов. При зміні маси завантаження, фізико-механічних властивостей матеріалу або опору робочого середовища сталий режим вібраційного впливу може ставати нераціональним. Це призводить до зниження продуктивності, збільшення енерговитрат і підвищення динамічних навантажень на елементи конструкції.

Перспективним напрямом удосконалення таких машин є застосування віброзбуджувачів коливань зі змінними параметрами. До основних параметрів, які можуть змінюватися під час роботи, належать частота коливань, амплітуда, напрям дії збурювальної сили, фазові співвідношення між окремими складовими руху, а також величина неврівноваженої маси або ексцентриситету. Завдяки цьому можна формувати різні режими роботи машини залежно від вимог конкретного технологічного процесу.

Зміна частоти коливань дозволяє керувати інтенсивністю взаємодії робочого органу з матеріалом. На початкових етапах процесу доцільним може бути застосування нижчих частот, що забезпечує плавне залучення матеріалу в рух і зменшує ударні навантаження. На основній стадії обробки частота може бути збільшена для підвищення інтенсивності процесу. На завершальному

етапі режим знову може змінюватися для стабілізації руху матеріалу або зменшення залишкових коливань конструкції.

Регулювання амплітуди коливань є важливим для забезпечення необхідного рівня енергетичного впливу на оброблюване середовище. Надмірна амплітуда може спричинити інтенсивний знос елементів машини, пошкодження матеріалу або підвищення шуму й вібрацій, що передаються на основу. Недостатня амплітуда, навпаки, не забезпечує потрібної інтенсивності технологічного процесу. Тому віброзбуджувач зі змінними параметрами повинен забезпечувати можливість вибору такого режиму, за якого досягається необхідна продуктивність за мінімальних енерговитрат.

Важливе значення має також керування напрямом дії збурювальної сили. У разі використання декількох віброзбуджувачів або систем із регульованими фазовими співвідношеннями можна отримати прямолінійні, еліптичні, кругові або складні просторові траєкторії руху робочого органу. Це особливо важливо для процесів транспортування, ущільнення, сепарації, очищення та змішування, де ефективність залежить не лише від інтенсивності коливань, а й від характеру переміщення матеріалу відносно робочої поверхні.

Віброзбуджувачі зі змінними параметрами можуть бути реалізовані на основі інерційних, електромагнітних, гідравлічних або комбінованих приводів. Інерційні віброзбуджувачі дозволяють змінювати збурювальну силу за рахунок регулювання частоти обертання дебалансів, їх взаємного положення або ексцентриситету. Електромагнітні системи забезпечують швидке керування амплітудою і частотою коливань, що є доцільним для машин із високими вимогами до точності режиму. Гідравлічні віброзбуджувачі можуть застосовуватися у потужних машинах, де необхідно створювати значні збурювальні зусилля та змінювати їх у широких межах.

Науковою основою створення високоефективних вібраційних машин є узгодження параметрів віброзбуджувача з динамічними властивостями самої машини та характеристиками оброблюваного середовища. При цьому необхідно враховувати масу робочого органу, жорсткість пружної системи, демпфування, частоти власних коливань, зміну навантаження під час роботи та можливість виникнення резонансних режимів. Раціональний режим роботи повинен забезпечувати достатню інтенсивність технологічного впливу без надмірного збільшення динамічних навантажень.

Особливої уваги потребує питання енергоефективності. Застосування змінних параметрів віброзбудження дозволяє не підтримувати постійно максимальний рівень вібраційного впливу, а змінювати його відповідно до поточного стану процесу. Це дає змогу зменшити непродуктивні витрати енергії, підвищити ресурс елементів конструкції та покращити стабільність роботи обладнання. Такий підхід є більш раціональним порівняно з використанням машин, які працюють в одному незмінному режимі незалежно від умов навантаження.

Висновки. У роботі розглянуто наукові підходи до створення високоефективних вібраційних машин із застосуванням віброзбуджувачів коливань зі змінними параметрами. Встановлено, що використання традиційних машин із постійними режимами роботи не завжди забезпечує необхідну ефективність технологічного процесу, оскільки властивості оброблюваного середовища, маса завантаження та опір руху можуть змінюватися під час експлуатації.

Обґрунтовано, що застосування віброзбуджувачів зі змінними параметрами дозволяє керувати частотою, амплітудою, напрямом дії збурювальної сили та фазовими співвідношеннями між окремими складовими коливань. Це створює можливість формування прямолінійних, еліптичних, кругових або складних просторових траєкторій руху робочого органу залежно від вимог конкретного технологічного процесу.

Показано, що керування параметрами віброзбудження сприяє підвищенню продуктивності, зменшенню енерговитрат, зниженню небажаних динамічних навантажень і покращенню стабільності роботи обладнання. Найбільш перспективними є конструкції вібраційних машин, у яких параметри коливального руху можуть адаптуватися до поточного стану оброблюваного середовища та умов навантаження.

Список використаних джерел

1. Gurskyi, V., Krot, P., Korendiy, V., & Zimroz, R. (2022). Dynamic analysis of an enhanced multi-frequency inertial exciter for industrial vibrating machines. Machines, 10(2), Article 130. https://doi.org/10.3390/machines10020130
2. Gurskyi, V., Korendiy, V., Krot, P., Zimroz, R., Kachur, O., & Maherus, N. (2023). On the dynamics of an enhanced coaxial inertial exciter for vibratory machines. Machines, 11(1), Article 97. https://doi.org/10.3390/machines11010097
3. Nazarenko, I., Svidersky, A., Ruchynskyi, M., Dedov, O., Slipetskyi, V., Novikova, I., & Bondarenko, A. (2017). Investigation of vibration machine movement with a multimode oscillation spectrum. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(1[90]), 28–36. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118731
4. Vasiliev, O., & Yakovenko, A. (2023). Analysis of vibration machine parameters affecting compaction quality. Academic Journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering, 1(60), 19–24. https://doi.org/10.26906/znp.2023.60.3182
5. Nazarenko, I., et al. (2018). Experimental studies of the working process of a vibration installation for compacting concrete mixtures with a variable operating mode. Mining, Constructional, Road and Melioration Machines, (92), 24–31. DOI: https://doi.org/10.31493/gbdmm1892.0301
6. Vrublevskyi, I. Yu. (2019). Vyznachennia parametriv dvomasovoho vibratsiinoho transportera velykoi vantazhnosti [Determination of parameters of a two-mass high-capacity vibrating conveyor]. Viiskovo-tekhnichnyi zbirnyk, (21), 3–8. https://doi.org/10.33577/2312-4458.21.2019.3-8
7. Artyunin, A. I., & Alhunsaev, G. G. (2018). Influence of elasticity of unbalance drive in vibration machines on its oscillations. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.133922
8. Filimonikhin, G., Yatsun, V., Dumenko, K., & Nevdakha, A. (2017). Equations of motion of vibration machines with a translational motion of platforms and a vibration exciter in the form of a passive auto-balancer. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.111216
9. Wang, H., Gong, G., Zhou, H., Wang, W., & Liu, Y. (2016). A rotary valve controlled electro-hydraulic vibration exciter. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. https://doi.org/10.1177/0954406215615156
10. Ruan, J., & Burton, R. T. (2009). An electrohydraulic vibration exciter using a two-dimensional valve. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering. https://doi.org/10.1243/09596518JSCE634

АКТУАЛЬНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ НАЗЕМНИХ РОБОТИЗОВАНИХ ТРАНСПОРТНИХ ПЛАТФОРМ В ПРОЦЕСАХ ОБСТЕЖЕННЯ ТЕРИТОРІЙ І СПОРУД У ПОТЕНЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕГІОНАХ

Олександр Дьяченко, доцент, к.т.н., доцент [1] (ORCID: 0000-0001-8199-2504),
Євген Міщук, доцент, к.т.н., доцент [1] (ORCID: 0000-0002-7850-0975),
Павло Кривченков, студент [1],
[1]Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. *У даній роботі розглянуто актуальність використання безпілотних наземних транспортних засобів та роботизованих наземних комплексів у діяльності людини, зокрема у будівництві, промисловості, логістиці та сільському господарстві. Виконано огляд історії розвитку систем дистанційного керування транспортними засобами і автоматизації виконання ними процесів від перших розробок до сучасних автономних технологій. Встановлено, що впровадження таких систем в різних галузях економіки дозволяє знизити вплив людського фактора на виконання цілих процесів, підвищити продуктивність і безпеку праці. Проаналізовано основні сфери і напрямки застосування безпілотних засобів та їх переваги, зокрема використання у рятувальних роботах, військовій сфері та локальних виробничих процесах. На основі цих даних визначено актуальність розробки і подальшого застосування спеціалізованої транспортної платформи НРК для роботи в небезпечних умовах при виконанні процесів обстеження споруд і територій в потенційно небезпечних регіонах.*

Ключові слова: *безпілотні засоби; роботизовані комплекси; дистанційне керування; автоматизація процесів; будівництво; актуальність.*

Вступ. Під час бурхливого розвитку промисловості, сільського господарства та інших галузей виникає стійка потреба у полегшенні людської праці, скороченні трудових витрат, а також зниженні

впливу небезпечних і шкідливих факторів на персонал. Для цього використовуються різні за призначенням технічні засоби, у тому числі транспортні засоби. Транспорт є важливим для функціонування цілих галузей. До прикладу в будівельній галузі транспортні процеси відбувається як ззовні (транспортування будівельних матеріалів і виробів між заводами і будмайданчиками) так і в середині виробництв і будівництв (внутрішнє транспортування в межах підприємств, будмайданчиків). Окремі транспортні засоби використовуються як мобільні платформи для переміщення вантажів, обладнання або окремих виконавчих модулів для виконання спеціалізованих завдань. Наразі існує потреба у спеціалізованих транспортних засобах з дистанційним і автоматичним керуванням, що дозволять знизити впливу шкідливих і небезпечних факторів на персонал, збільшить продуктивність виконання цілих процесів і знизить вплив людського фактора на виконання окремих операцій.

Аналіз літературних джерел. Використання транспортних засобів і платформ для встановлення різноманітного обладнання дозволяє значно полегшити людську працю і підвищити ефективність виконання процесів. Можливості дистанційного керування подібними засобами з'явилися ще у 20 сторіччі [1] і достатньо швидко знайшли широкий вжиток завдяки можливостям застосування в місцях, де людський організм є вразливим до умов роботи. У військовій сфері засоби з дистанційним керуванням застосовують для віддаленого керування танками, самохідними мінами [2], тощо. Завдяки зростанню обчислювальної потужності комп'ютерних технологій та їх доступності, інтелектуальні роботизовані системи набули все більшого поширення [3]. Їх застосування дозволяє автоматизувати виконання окремих операцій, що виконуються технічним засобом або повністю виключити участь людини в управлінні (повністю автоматичне управління). Такі наземні транспортні засоби та машини називаються безпілотними наземними транспортними засобами (далі – БНТЗ) та наземними роботизованими комплексами (далі – НРК) [4]. Безпілотні транспортні засоби мають велике значення для дослідження космосу, оскільки перед відправкою людей на невідому планету необхідно детально вивчити умови та наявні ресурси [5,6]. Поширення безпілотні засоби знайшли і в рятувальних операціях для пошуку людей при руйнуванні будівель [7]. А окрім наведених прикладів добре зарекомендували себе у сферах, де необхідно виконувати одноманітні і зрозумілі операції, а саме логістиці(для переміщення вантажів в середині складів) і веденні сільського господарства(обприскування полів, видалення шкідливих рослин, тощо).

Мета роботи. Визначити потребу у подальшій розробці транспортної платформи наземного роботизованого комплексу для виконання різноманітних будівельних і інженерних завдань в шкідливих і небезпечних для персоналу умовах.

Для досягнення мети роботи сформульовані та вирішені наступні задачі:

- огляд історії появи наземних засобів, що керуються дистанційно і розвитку до автоматичних систем;

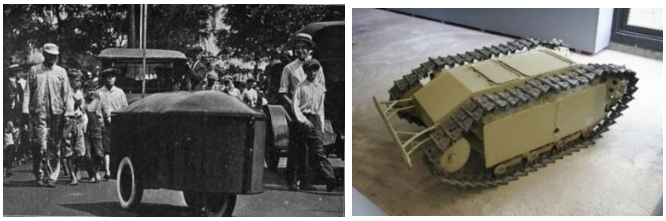
- встановлення ключових напрямків, де безпілотні наземні транспортні засоби з дистанційним, автоматизованим і автоматичним керуванням знайшли вжиток;

- визначення основних переваг, що дозволяють таким системам знаходити широке впровадження і розвиток в різних напрямках і діяльностях у державі(сільське господарство, виробництво, логістика, військова справа, тощо) і необхідності розробки і впровадження подібних рішень в будівництві.

Виклад основного матеріалу. В 20 сторіччі настав період, що характеризувався впровадженням дистанційно керованих систем. Перша згадка принципу дистанційного керування з'явилася у 1898 році Ніколою Тесла, а у 1908 році одне із найсенсаційніших винаходів Торреса Кеведо був перший пульт дистанційного керування, який випробували на невеликому човні - El Telekino (Телекіно). У 1921 році представили радіокерований трицикл, який став одним із перших відомих прикладів практичного застосування дистанційного керування на наземному транспорті(див.рис.1, а). Технологія дистанційного керування і автоматизація виконання окремих операцій або повна автоматизація дозволила виконувати завдання без прямого залучення персоналу.

Окремо така технологія знайшла широкий вжиток і у військовій сфері. У 1930 році у СРСР було розроблено танк, що керувався з допомогою радіозв'язку. У 1942 році німецькими інженерами було розроблено самохідні гусеничні міни «Голіят»(рис.1, б), які являли з

себе невеликий транспортний засіб, що містив 60 кг вибухівки. Керування ним відбувалося через кабельну лінію зв'язку [4].



а) **б)**

Рис.1. Дистанційно керовані транспортні засоби

У 1970 році у СРСР створено транспортний засіб для руху по поверхні місяця – Луноход 1(див.рис.2, а), який був безпілотним електромобілем на сонячних батареях з дистанційним керуванням з пунктів управління на Землі. Для того аби не наражати життя працівників гірничих підприємств небезпеці при виконанні робіт в небезпечних умовах, розроблялися системи керування машинами для виконання операцій розробки гірської породи в тунелях, а саме системи радіокерування важким бульдозером ДЕТ-250(рис.2, б), який пізніше використовувався при ліквідації результатів аварії на Чорнобильський атомній електростанції у 1986 р. разом з іншими видами керованої техніки, такої як самоскиди (рис.2, в), роботи-маніпулятори, тощо.

а **б** **в**

Рис.2. БНТЗ Лунохід-1 (а) та дистанційно керовані бульдозер ДЕТ-250(б) та вантажний автомобіль для перевезення радіаційно активних відходів(в)

Впродовж останніх двох століть відбувається розвиток як можливостей дистанційного керування різними технічними засобами, так і способів автоматизації процесів, що виконуються цими засобами. Сучасний розвиток технологій у сфері автоматизації та робототехніки створює передумови для широкого впровадження і використання різноманітних систем, таких як БНТЗ і НРК різних конструкцій, що здатні ефективно застосовуватися в сільському господарстві, будівництві, оборонній сфері, промисловості та логістиці.

Велику кількість БНТЗ використовують у сільському господарстві. Такі засоби поєднують автономну навігацію, сенсорні системи, штучний інтелект і роботизовані механізми для виконання важких, точних та рутинних робіт, які раніше вимагали значних людських зусиль. Прикладом є XAG R150(рис.3, а), що призначений для обробки невеликих ділянок для збору врожаю, виконання транспортування дрібних вантажів у межах поля протягом доби. Автономні тракторні платформи, такі як AgXeed AgBot 2.055(рис.3, б), створені для виконання широкого спектра механізованих операцій, включаючи підготовку ґрунту, посів, міжрядний обробіток та транспортування вантажів.

а) **б)**

Рис. 3. Безпілотні наземні транспортні засоби для ведення сільськогосподарських робіт на полях

Широкого вжитку БНТЗ знайшли у логістиці. До прикладу між Роттердамом і Капелле-ан-ден-Ейссел курсує безпілотний електробус ParkShuttle (рис.4, а). В військовій сфері використання НРК

стає все ширшим і наразі НРК використовуються для різних логістичних завдань (рис.4, б).

а) **б)**

Рис.4. Транспортні засоби для автоматичного виконання логістичних завдань

Окрім зовнішньої логістики(транспортування між окремими містами або підприємствами), безпілотні засоби знаходять широке застосування у внутрішній логістиці підприємств. Такі комплекси виконують доставку матеріальних ресурсів у якості внутрішнього транспорту, а саме переміщують палети та контейнери у складських приміщеннях, здійснюють інвентаризацію та моніторинг товарних запасів і їх сортування. Так компанія Amazon дуже інтенсивно автоматизує свої сортувальні та розподільчі центри (fullfillment centers), використовуючи сотні мобільних роботів і автономних систем(рис.5).

Рис.5 – Роботи Kiva компанії Amazon Robotics

Велике значення наземні роботизовані комплекси (НРК) мають для дослідження космічного простору. До прикладу проєкт Mars Exploration Rover в NASA включає в себе два всюдиходи, «Оппортьюніті» і «Спіріт» – шестиколісні апарати, що працюють на сонячній енергії. Їх призначення - детальне вивчення умов та наявних ресурсів.

БНТЗ також набули широкого застосування в будівництві та інженерних роботах. Їх використовують для огляду та ремонту інженерних мереж будинків, доставки будівельних матеріалів, транспортування обладнання, евакуації людей і забезпечення логістики у важкодоступних або небезпечних зонах. Підтверджене застосування для рятувальних робіт після терористичного акту 11 вересня 2001 року на Ground Zero, де дистанційно керовані платформи використовувалися для пошуку постраждалих та обстеження завалів.

Висновки. На основі виконаного огляду напрямків використання БНТЗ та НРК можна зробити висновок, що актуальність використання подібних засобів визначена насамперед наступним:

- автоматизацією виконання операцій і процесів, що знижує або виключає вплив людського фактора і підвищує точність їх виконання;
- зниженням або виключенням впливу небезпечних і шкідливих факторів на персонал;
- оптимізацією виконання окремих операцій, що призводить до підвищення ефективності цілих процесів;
- можливостями застосування при виконанні робіт в місцях, де людина нездатна працювати через розміри, масу або віддаленість місця проведення робіт.

Особливої актуальності розробка і подальше використання подібних засобів приймає в нинішній час, коли необхідно виконувати будівельні, інженерні або рятувальні роботи в потенційно небезпечних районах, де відбуваються бойові дії, наявні заміновані території, нерозірвані боєприпаси , а також при роботі в безпосередній близькості з будівлями і спорудами, що являють небезпеку часткового або повного їх руйнування.

Список використаних джерел

1. Telecontrol. (2019). «El Telekino o Telekine» https://www.torresquevedo.org/LTQ10/index.php?title=Telecontrol

2. Dachkovskyi, V., & Kalamurza, O. (2025). Analiz rozvytku nazemnykh robotyzovanykh kompleksiv. [Analysis of the development of ground robotic complexes]. Social Development and Security, 15(3), P. 223-236.
3. Hu, X., & Assaad, R. H. (2023). The use of unmanned ground vehicles (mobile robots) and unmanned aerial vehicles (drones) in the civil infrastructure asset management sector: Applications, robotic platforms, sensors, and algorithms. Expert Systems with Applications, 232, 120897.
4. Zalypka V.D. (2022). Osoblyvosti stvorennia ta zastosuvannia nazemnykh robotyzovanykh kompleksiv u providnykh krainakh svitu ta Ukraini. [Features of the creation and application of ground robotic complexes in leading countries of the world and Ukraine]. Scientific Bulletin of UNFU, 32(4), P.60-65.
5. Science NASA. (2017). Mars Exploration Rover – Spirit https://science.nasa.gov/mission/mer-spirit/
6. NASA. (2019). NASA's Record-Setting Opportunity Rover Mission on Mars Comes to End https://www.nasa.gov/news-release/nasas-record-setting-opportunity-rover-mission-on-mars-comes-to-end/
7. Stormont, D. P., & Allan, V. H. (2009). Managing risk in disaster scenarios with autonomous robots. Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics, 7(08), P. 66-71.

МОБІЛЬНИЙ ПІДЙОМНО-ТРАНСПОРТНИЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ АВТОМОБІЛІВ У ОБМЕЖЕНИХ УМОВАХ

Сергій Білоконь[1], аспірант,
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. *У роботі розглядається концепція мобільного підйомно-транспортного модуля для переміщення легкових автомобілів у межах обмежених просторів паркінгів, виробничих майданчиків та логістичних зон. Запропонована конструкція базується на використанні низькопрофільної самохідної платформи з чотирма локальними короткоходовими підйомними вузлами, які забезпечують мінімальний технологічний підйом автомобіля для вивільнення коліс від контакту з поверхнею. На відміну від класичних автомобільних підйомників, модуль не призначений для технічного обслуговування транспортного засобу, а виконує функцію роботизованого транспортування автомобіля. Проведено аналіз існуючих систем автоматизованого паркування та роботизованих платформ. Обґрунтовано вибір конструктивної схеми, виконано попередні розрахунки навантажень та визначено основні параметри підйомних вузлів. Запропоноване рішення може бути використане як основа для створення роботизованих транспортних систем у сфері автоматизованого паркування та логістики будівельних об'єктів.*

Ключові слова: *мобільна платформа; роботизований паркінг; ножичний механізм; транспортний модуль; автоматизоване переміщення автомобілів; AGV.*

Вступ. Сучасний розвиток міської інфраструктури супроводжується постійним зростанням кількості транспортних засобів та дефіцитом паркувальних площ. Особливо гостро ця проблема проявляється у щільній міській забудові, підземних паркінгах, логістичних центрах і тимчасових будівельних майданчиках. Традиційні способи розміщення та переміщення автомобілів мають обмеження, пов'язані з необхідністю участі водія, значними маневровими зонами та низькою ефективністю використання простору.

Одним із перспективних напрямків розвитку є застосування роботизованих систем автоматизованого паркування та мобільних транспортних платформ. Такі системи дозволяють підвищити щільність розміщення автомобілів, зменшити вплив людського фактору та забезпечити автоматизацію транспортних операцій. (esmt.knuba.edu.ua)

Разом із тим більшість існуючих рішень характеризуються високою складністю конструкції, значною вартістю та орієнтацією на стаціонарні інфраструктурні об'єкти. Це обумовлює актуальність створення спрощених мобільних платформ, придатних для використання в умовах навчально-дослідних лабораторій, тимчасових логістичних зон та будівельних майданчиків.

Аналіз літературних джерел. Серед сучасних роботизованих систем автоматизованого паркування можна виділити рішення компаній Stanley Robotics, WÖHR Autoparksysteme GmbH та Robotic Parking Systems (рис. 1).

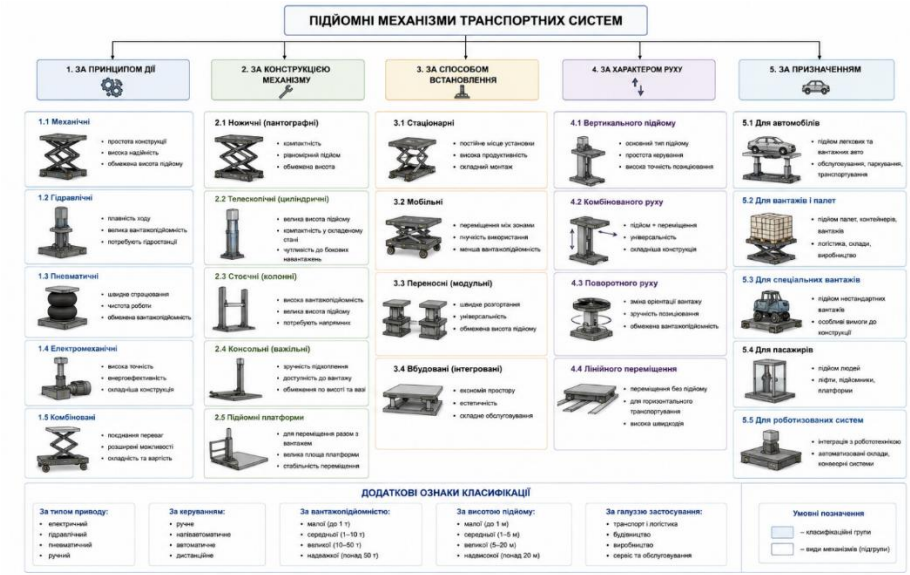


Рис.1. Класифікація підйомних систем для автомобілів

Система Stanley Robotics використовує автономного транспортного робота, який під'їжджає під автомобіль, піднімає його та транспортує до місця зберігання. Основними перевагами такого підходу є висока автоматизація та ефективне використання простору. Недоліками є складність системи керування та висока вартість реалізації.

Системи WÖHR базуються переважно на стаціонарних платформних і ножичних підйомниках, інтегрованих у багаторівневі автоматизовані паркінги. Подібні рішення характеризуються високою вантажопідйомністю та надійністю, однак мають значні габарити та обмежену мобільність.

Окремий напрямок становлять AGV-платформи (Automated Guided Vehicle), що широко використовуються у логістиці для автоматизованого транспортування вантажів. Їх перевагами є маневреність, модульність та можливість інтеграції систем навігації.

На основі проведеного аналізу встановлено, що найбільш перспективним є поєднання мобільної AGV-платформи з компактною системою короткоходового підйому автомобіля.

Мета роботи. Метою роботи є розробка конструкції мобільного підйомно-транспортного модуля для переміщення автомобілів класу Golf у межах обмежених просторів.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- проаналізувати існуючі системи автоматизованого переміщення автомобілів;
- розробити конструктивну схему мобільної платформи;
- обґрунтувати параметри короткоходових підйомних вузлів;
- визначити основні навантаження та параметри приводів;
- оцінити перспективи практичної реалізації конструкції.

Виклад основного матеріалу. Запропонований модуль являє собою низькопрофільну самохідну платформу, оснащену чотирма локальними короткоходовими підйомними вузлами. Платформа під'їжджає під автомобіль та позиціонується відносно штатних зон піддомкрачування кузова. Після цього активуються підйомні вузли, які забезпечують мінімальний підйом автомобіля на висоту 50–80 мм. Такий підйом є достатнім для вивільнення коліс від контакту з опорною поверхнею.

Після передачі ваги автомобіля на платформу виконується його транспортування у задану точку. На відміну від класичних автомобільних підйомників, запропонована система не призначена для ремонтних операцій, а виконує виключно транспортну функцію.

Як підйомний механізм запропоновано використання компактного ножичного вузла з електромеханічним гвинтовим приводом. Така схема забезпечує: компактність; самогальмування; простоту виготовлення; достатню жорсткість конструкції (рис. 2).

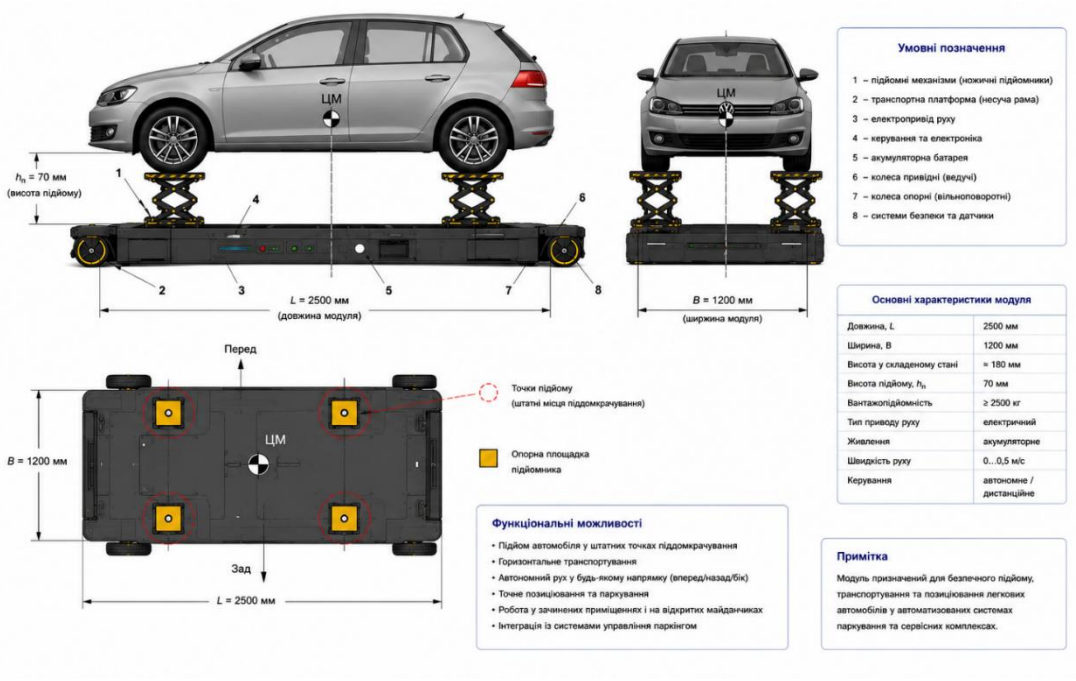


Рис. 2. Схема підйомно-транспортного модуля

Робочий цикл транспортного модуля включає декілька послідовних операцій.

Рис.3. Послідовність роботи мобільного транспортного модуля

Перший етап передбачає підведення платформи під автомобіль.

Завдяки низькопрофільній конструкції рами модуль може переміщуватися під автомобілем без попереднього підйому транспортного засобу.

Після позиціонування активуються підйомні вузли.

Чотири ножичні механізми здійснюють одночасний підйом автомобіля через штатні точки піддомкрачування. Після відриву коліс від поверхні здійснюється транспортування автомобіля до визначеної точки. Після завершення переміщення автомобіль опускається на поверхню та платформа залишає робочу зону.

Висновки. У роботі запропоновано конструкцію мобільного підйомно-транспортного модуля для переміщення автомобілів у обмежених умовах. На відміну від класичних автомобільних підйомників, система виконує лише короткоходовий технологічний підйом, необхідний для вивільнення коліс від контакту з поверхнею. Запропонована схема поєднує: мобільну AGV-платформу; чотири локальні короткоходові підйомні вузли; електромеханічний привід.

Основними перевагами конструкції є: низький профіль; конструктивна простота; адаптивність до різних автомобілів. Отримані результати можуть бути використані при створенні роботизованих транспортних систем для автоматизованих паркінгів, логістичних комплексів та будівельних майданчиків.

Список використаних джерел:

1. Stanley Robotics. Stanley Robotics. https://www.stanley-robotics.com/
2. WÖHR Autoparksysteme GmbH. WÖHR Autoparksysteme GmbH. https://woehr.de/en
3. Robotic Parking Systems. Robotic Parking Systems.: https://roboticparking.com/

РУХОМИЙ ОПАЛУБНИЙ МОДУЛЬ СТРІЧКОВОГО ТИПУ ДЛЯ ЗВЕДЕННЯ АРОЧНИХ ТА ВЕРТИКАЛЬНИХ СТІН АНАЛІЗ

Юрій Заєць[1], провідний інженер (ORCID: 0000-0002-9711-042X)
Ірина Дубовик[1], провідний інженер (ORCID: 0000-0001-7444-9159)
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. *У роботі розглянуто концепцію рухомого опалубного модуля стрічкового типу для формування вертикальних та арочних бетонних конструкцій. Запропоноване рішення базується на використанні безперервної формоутворюючої поверхні у вигляді стрічки, що переміщується відносно зони бетонування. Використання такої системи дозволяє зменшити трудомісткість бетонних робіт, підвищити швидкість формування конструкцій та створити передумови для автоматизації процесів бетонування. Особливу увагу приділено перспективам використання рухомих стрічкових систем у сучасному будівництві, зокрема при спорудженні криволінійних та просторово складних конструкцій.*

Ключові слова*: опалубка; стрічкова опалубка; бетонування; будівельна механізація; автоматизація будівництва; арочні конструкції; рухомий модуль.*

Вступ. Сучасне будівництво характеризується постійним зростанням вимог до швидкості виконання робіт, енергоефективності технологічних процесів та зменшення трудомісткості будівельного виробництва. Особливо актуальним є питання вдосконалення технологій монолітного бетонування, оскільки саме вони забезпечують можливість створення конструкцій складної геометрії, висотних споруд та інфраструктурних об’єктів.

Традиційні опалубні системи, що використовуються при зведенні вертикальних або криволінійних конструкцій, мають ряд суттєвих недоліків. До них належать значні витрати часу на монтаж та демонтаж, необхідність використання кранового обладнання, велика кількість ручних операцій, а також складність адаптації до арочних та просторово складних поверхонь. Крім того, більшість сучасних систем працюють за дискретним принципом, коли процес бетонування виконується окремими етапами з перестановкою щитових елементів.

У зв’язку з цим перспективним напрямом розвитку будівельної механізації є створення безперервних або квазібезперервних систем формоутворення. Одним із можливих рішень є використання рухомої стрічкової опалубки, яка забезпечує формування конструкції за рахунок безперервного переміщення формоутворюючої поверхні

Мета роботи. Аналіз існуючих організаційно-технологічних рішень реалізації підходів сталого розвитку громад.

Матеріали і методи. Основними матеріалами для аналізу є експертне наукове дослідження процесів, аналіз закордонного досвіду.

Виклад основного матеріалу. Запропонований рухомий опалубний модуль являє собою механізовану систему, у якій опалубна поверхня виконана у вигляді замкненої стрічки. Стрічка натягується на систему роликів та напрямних і переміщується відносно зони бетонування з регульованою швидкістю.

Конструктивно модуль може складатися з таких основних елементів (рис.1): несучої рами; роликових модулів; стрічкової формоутворюючої поверхні; приводу переміщення; системи натягу; електронної системи керування; датчиків положення та контролю технологічних параметрів.

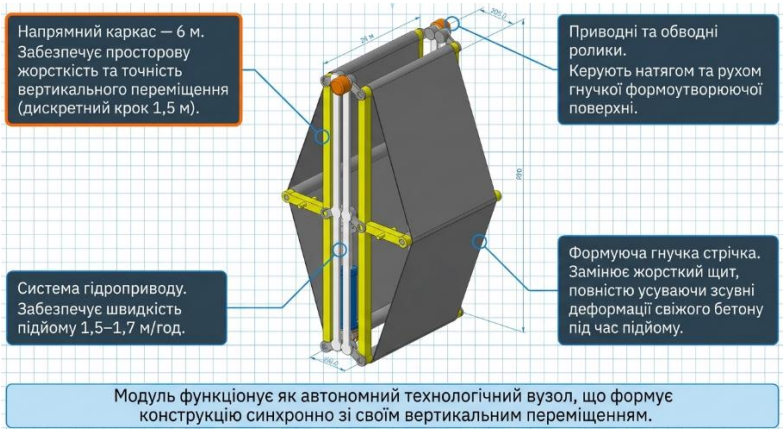


Рис.1. Загальний вид опалубного модуля

Принцип роботи модуля полягає у наступному. Бетонна суміш подається у зону формування конструкції, після чого стрічка забезпечує утримання та формування поверхні до моменту досягнення бетоном необхідної початкової міцності. Потім стрічка відділяється від сформованої поверхні (рис. 2).

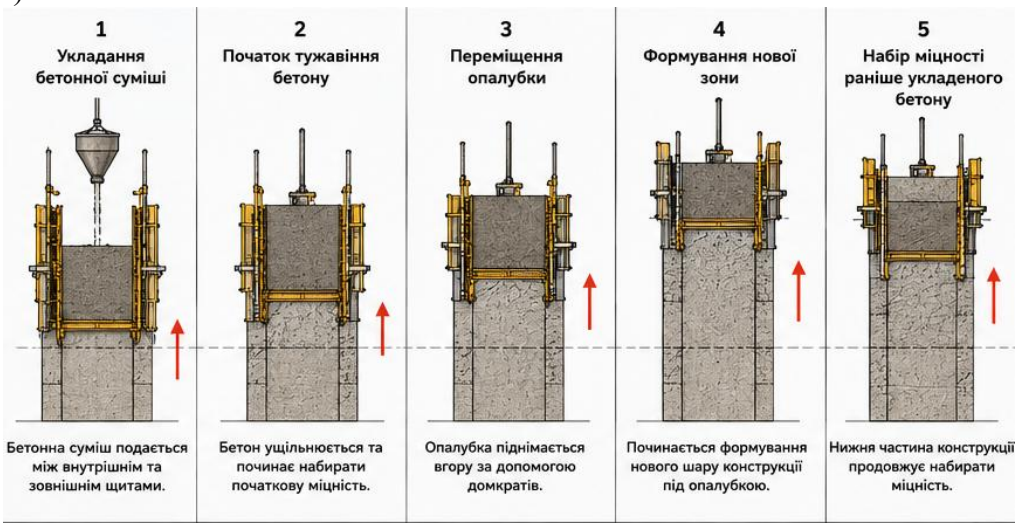


Рис.2. Етапи бетонування

На відміну від традиційних щитових систем, запропоноване рішення забезпечує безперервність процесу формування поверхні. Це дозволяє: скоротити кількість ручних операцій; зменшити час перестановки опалубки; забезпечити рівномірність поверхні; підвищити швидкість бетонування; створити передумови для автоматизації технологічного процесу.

Однією з ключових переваг системи є можливість адаптації до різних геометричних форм. Для вертикальних конструкцій система може працювати за принципом ковзної опалубки, а для арочних конструкцій — за рахунок зміни траєкторії руху стрічки та використання регульованих напрямних.

Перспективним напрямом розвитку проєкту є інтеграція цифрових технологій керування. Зокрема, використання датчиків температури та вологості дозволить синхронізувати швидкість руху стрічки із процесом набору міцності бетону. Також можлива інтеграція систем комп’ютерного моделювання та елементів IoT для моніторингу технологічних параметрів у режимі реального часу.

Використання стрічкової опалубки може бути особливо ефективним при: зведенні тунелів; будівництві резервуарів; формуванні арочних перекриттів; створенні просторових оболонок; бетонуванні висотних вертикальних конструкцій. Слід також відмітити ефектичність використання опалубних модулів у груповій системі при одночасному зведенні конструкцій однієї захватки (рис. 3).

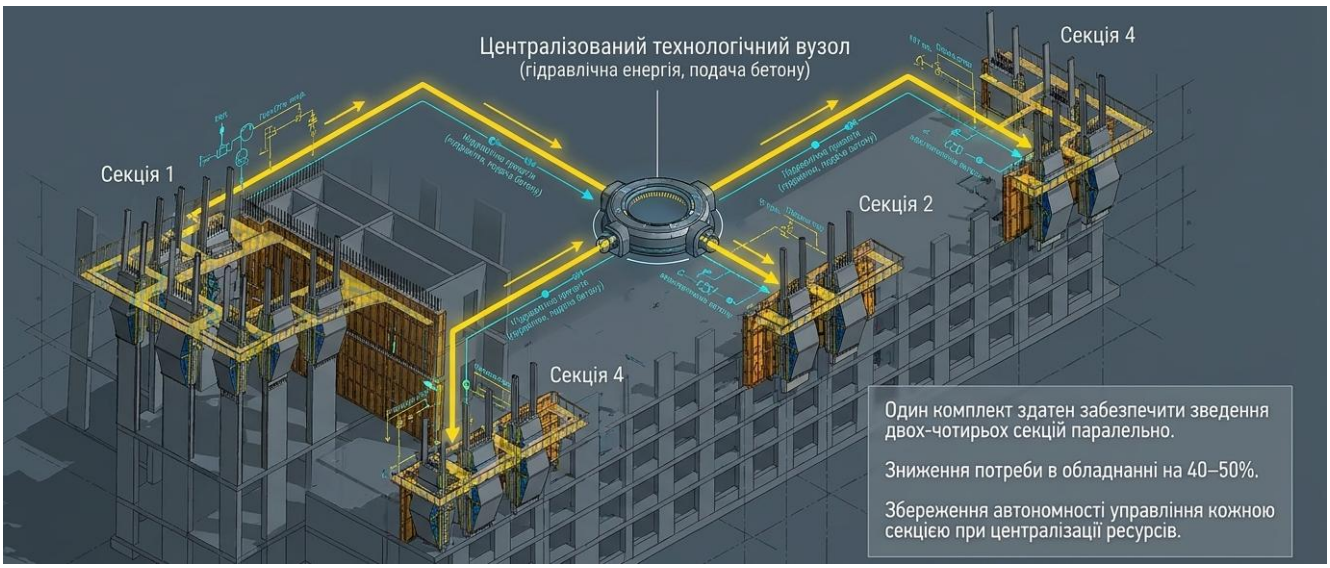


Рис.3. Радіально-блочна система групових модулів

Крім технологічних переваг, запропоноване рішення має потенціал для зниження енерговитрат будівельного процесу. Зменшення кількості монтажно-демонтажних операцій, скорочення часу використання важкої техніки та підвищення безперервності процесу дозволяють зменшити загальні витрати енергії на виконання бетонних робіт.

Важливим етапом дослідження є створення експериментального прототипу. У межах роботи передбачається розробка зменшеної моделі стрічкового модуля, що дозволить: перевірити стабільність руху стрічки; оцінити роботу системи натягу; визначити вплив швидкості руху на процес формування поверхні; дослідити можливість адаптації системи до криволінійної геометрії.

Висновки. Запропонована концепція рухомого опалубного модуля стрічкового типу є перспективним напрямом розвитку механізованих систем бетонування. Використання безперервної формоутворюючої поверхні дозволяє підвищити ефективність технологічного процесу, зменшити трудомісткість робіт та створити умови для подальшої автоматизації будівельного виробництва.

Основними перевагами системи є: безперервність процесу формування конструкції; зменшення кількості ручних операцій; можливість адаптації до складних геометричних форм; перспективи інтеграції цифрових систем керування; потенційне зниження енерговитрат будівництва.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на: розробку математичної моделі руху стрічки; дослідження взаємодії стрічкової поверхні з бетонною сумішшю; оптимізацію конструкції роликової системи; створення експериментального зразка; інтеграцію автоматизованого керування.

Список використаних джерел:

1. Tonkacheiev, H. M. (2018). Tekhnolohiia zvedennia monolitnykh budivel i sporud [Technology of erection of monolithic buildings and structures]. KNUCA. [in Ukrainian].
2. Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy. (2009). DBN V.2.6-98:2009. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia [Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions]. [in Ukrainian].
3. Peri Formwork Systems. URL: https://www.peri.com
4. Doka Formwork Solutions. URL: https://www.doka.com
5. Autodesk Construction Solutions. URL: https://construction.autodesk.com
6. IMER Group Construction Equipment. URL: https://www.imergroup.com
7. Fédération internationale du béton. (2013). fib Model Code for Concrete Structures 2010 (fib Bulletin No. 65). International Federation for Structural Concrete.
8. Neville, A. M. (2011). Properties of concrete. Pearson Education Limited.
9. Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2002). Design and control of concrete mixtures. Portland Cement Association.
10. Rashedi, M., et al. (2021). Automation in concrete construction: Technologies and future trends. Automation in Construction, 125.

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНОГО РІШЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МОСТОВОГО КРАНА ВАНТАЖОПІДЙОМНІСТЮ 40 ТОНН ДЛЯ ЗАВОДУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ВИРОБІВ

Павло Прищепа, здобувач [1],
Микола Клименко, к.т.н., доцент [1] (ORCID: 0000-0002-6166-8966),
Вадим Степанчук, студент [1],
Роман Ковбан, студент [1],
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. *Здійснено техніко-аналітичне дослідження конструктивних рішень сучасного мостового кранового обладнання, що експлуатується на підприємствах з виробництва залізобетонних виробів (ЗБВ). Розглянуто функціональну класифікацію підйомно-транспортних машин за способом спирання та переміщення вантажопідйомного органу, а саме опорні й підвісні мостові крани, козлові та напівкозлові крани, встановлено критерії вибору того чи іншого конструктивного типу залежно від технологічних і архітектурних умов виробничого приміщення. Проаналізовано конструктивні рішення провідних виробників кранового обладнання, зокрема особливості застосування частотно-регульованого електропривода для мінімізації динамічних навантажень на вантаж і металоконструкцію крана під час перехідних режимів роботи. Розглянуто конструкцію мостового крана для заводу залізобетонних виробів вантажопідйомністю 40 т. На основі аналізу конструкцій сучасного кранового обладнання запропоноване застосування опорної двобалкової схеми з вантажним візком, механізмом підйому та механізмом пересування. Визначено основні силові й кінематичні параметри приводів, виконано перевірку металоконструкції моста на міцність, жорсткість і місцеву стійкість. Обґрунтовано використання системи ребер жорсткості, перевірено зварне з'єднання та взаємодію ходової частини з рейками.*

Ключові слова: *мостовий кран; кранове обладнання; вантажопідйомність; завод залізобетонних виробів; металоконструкція; частотно-регульований привод.*

Вступ. Сучасний стан промислового виробництва будівельних матеріалів, зокрема сегмента залізобетонних виробів, характеризується стрімкою автоматизацією технологічних процесів і підвищенням вимог до інтенсифікації вантажопідйомних операцій. Ефективність функціонування підприємств цієї галузі значною мірою визначається надійністю та продуктивністю підйомно-транспортного обладнання, яке забезпечує переміщення важких і великогабаритних елементів на всіх етапах виробничого циклу – від формування виробів до їх складування та відвантаження споживачу. У цьому технологічному ланцюзі мостові крани відіграють роль ключової сполучної ланки, забезпечуючи транспортування вантажів у межах виробничих цехів та на прилеглих відкритих майданчиках.

Актуальність дослідження конструктивних рішень мостового кранового обладнання для заводів залізобетонних виробів зумовлена кількома факторами. По-перше, значна частина технічного парку підйомно-транспортних машин на діючих підприємствах галузі вичерпала свій нормативний ресурс або не відповідає сучасним вимогам щодо продуктивності та енергоефективності, що потребує обґрунтованого підходу до модернізації чи заміни обладнання. По-друге, специфіка виробництва залізобетонних виробів висуває підвищені вимоги до плавності руху вантажопідйомних механізмів, оскільки динамічні удари та розгойдування вантажу можуть спричинити порушення структури свіжовідформованої бетонної суміші, деформацію опалубки або пошкодження арматурних каркасів. По-третє, умови експлуатації кранового обладнання в цехах формування характеризуються підвищеною запиленістю (цементний пил) та вологістю, що ускладнює завдання забезпечення надійної роботи електричних і механічних вузлів протягом тривалого терміну служби.

У зв'язку з переліченими факторами одним із пріоритетних напрямів наукових досліджень у сфері підйомно-транспортного машинобудування є систематизація та порівняльний аналіз наявних конструктивних схем мостових кранів з метою обґрунтованого вибору технічного рішення, оптимізованого під конкретні умови експлуатації на підприємстві з виробництва ЗБВ. Розв'язання

цього завдання передбачає комплексний розгляд функціональної класифікації кранового обладнання, аналіз переваг і обмежень опорних, підвісних, козлових та напівкозлових конструктивних схем, а також вивчення технічних рішень провідних виробників, що визначають сучасний рівень розвитку галузі.

Аналіз літературних джерел. Питання класифікації, розрахунку та проєктування вантажопідйомних машин, зокрема мостових кранів, докладно висвітлено в низці фундаментальних підручників і навчальних посібників вітчизняних авторів. Так, у роботі Іванченка Ф.К. [1] систематизовано теоретичні основи розрахунку підйомно-транспортних машин, наведено методики визначення параметрів механізмів підйому та пересування залежно від вантажопідйомності та групи режиму роботи обладнання. Аналогічний комплексний підхід до розрахунку вантажопідйомних і транспортувальних машин представлено в підручнику за редакцією Бондарєва В.С. [2], де детально розглянуто методики визначення навантажень на металоконструкцію крана та перевірочні розрахунки на міцність і жорсткість основних несучих елементів.

Класифікація кранового обладнання за конструктивною схемою розглядається в роботах Лівінського О.М. зі співавторами [3], а також Пшінька О.М. [4], де підйомно-транспортні машини систематизовано за способом спирання на несучі конструкції будівлі: опорні мостові крани, ходові колеса яких безпосередньо спираються на підкранові рейки, закріплені на колонах, та підвісні крани, ходові візки яких переміщуються по нижніх полицях двотаврових балок перекриття. Згідно з наведеною в зазначених джерелах класифікацією, вибір між опорною та підвісною схемою визначається насамперед необхідною вантажопідйомністю та геометрією робочого простору: опорні крани здатні забезпечувати вантажопідйомність від кількох тонн до сотень тонн при прольотах понад 30 метрів завдяки високій жорсткості двобалкової конструкції, тоді як підвісні системи, що вирізняються меншою власною масою металоконструкції, зазвичай обмежені вантажопідйомністю 10–12 тонн через залежність від несучої здатності ферм перекриття будівлі.

Питання конструктивних особливостей однобалкових та двобалкових мостових кранів висвітлено в навчальному посібнику Баладінського В.Л. зі співавторами [5] та в підручнику з будівельної техніки цього ж автора [6]. Автори зазначають, що однобалкові крани (кран-балки), в яких вантажопідйомний орган (електрична таль) переміщується безпосередньо по нижній полиці двотаврової балки, є оптимальним рішенням для приміщень з обмеженим простором і вантажів масою до 10 тонн, тоді як двобалкові крани з вантажним візком, оснащеним поліспастовою системою, застосовуються для інтенсивних режимів роботи з вантажами до 500 тонн і більше завдяки підвищеній жорсткості мостової конструкції.

Окрему групу літературних джерел становлять роботи, присвячені козловим та напівкозловим кранам. У навчальному посібнику Гончарука О.М. [7] розглянуто портальні конструкції козлових кранів, що спираються на наземні рейкові колії та не залежать від архітектурних особливостей виробничого приміщення, що робить їх пріоритетним рішенням для обслуговування відкритих складських майданчиків і полігонів готової продукції заводів ЗБВ. Комбіновані (напівкозлові) конструктивні схеми, в яких одна опора крана спирається на підкранову колію будівлі, а інша – на наземну рейкову колію, дозволяють реалізувати наскрізну транспортну операцію між внутрішньоцеховим простором і зовнішньою вантажно-розвантажувальною площадкою без необхідності зведення додаткових несучих колон на всій довжині маршруту переміщення вантажу.

Аналіз технічної документації провідних світових виробників кранового обладнання свідчить про стійку тенденцію до інтеграції частотно-регульованих електроприводів у механізми підйому та пересування сучасних мостових кранів. Застосування частотного регулювання забезпечує реалізацію плавної (S-подібної) характеристики розгону та гальмування механізмів, що дозволяє суттєво знизити амплітуду розгойдування вантажу під час перехідних режимів роботи. Для підприємств з виробництва залізобетонних виробів, де критично важливою є цілісність свіжовідформованих бетонних елементів, ця технічна характеристика набуває особливого практичного значення, оскільки мінімізація динамічних ударів під час транспортування безпосередньо впливає на якість готової продукції. Крім того, застосування спеціалізованих ходових коліс з адаптивною геометрією профілю, а також бокового розташування вантажного візка відносно головної балки дозволяє виграти додаткові 200–400 міліметрів корисної висоти підйому,

що є суттєвим фактором для цехів з обмеженою відстанню від підкранових шляхів до конструкцій покриття.

Значна увага в науково-технічній літературі приділяється також питанням нормування режимів роботи кранового обладнання. Методичні рекомендації Русана І.В. [8; 9] та Волянюка В.О. [10] містять систематизовані підходи до визначення групи класифікації механізмів згідно з міжнародним стандартом ISO 4301 [13], що регламентують вибір розрахункових параметрів кранового обладнання залежно від інтенсивності та тривалості його експлуатації. Встановлення групи режиму роботи є визначальним етапом проєктування, оскільки безпосередньо впливає на вибір матеріалів, коефіцієнтів запасу міцності канатів, а також на призначення ресурсу основних вузлів механізмів підйому та пересування. Для важких умов експлуатації, характерних для кранів-перевантажувачів вантажопідйомністю понад 30–40 тонн, зазначені джерела рекомендують призначати групу режиму роботи не нижче 7М (важкий режим), що зумовлює підвищені вимоги до вибору матеріалів металоконструкції, канатів та підшипникових вузлів.

Мета роботи. Проведення техніко-аналітичного огляду конструктивних рішень мостового кранового обладнання, що застосовується на підприємствах з виробництва залізобетонних виробів, та обґрунтування раціональних вихідних параметрів для проєктування крана, здатного забезпечити високу продуктивність, точність позиціонування вантажу та надійність експлуатації в умовах агресивного виробничого середовища.

Матеріали і методи. Основними матеріалами для аналізу є науково-технічна та довідкова література з проєктування вантажопідйомних машин, технічна документація провідних виробників кранового обладнання, а також чинні нормативні документи, що регламентують класифікацію режимів роботи кранів. Основними методами дослідження є аналіз і систематизація науково-технічної інформації, а також порівняльний метод оцінювання конструктивних рішень за сукупністю техніко-експлуатаційних критеріїв.

Виклад основного матеріалу. Функціональна класифікація підйомно-транспортних машин, що застосовуються на підприємствах ЗБВ, базується на способі спирання та переміщення вантажопідйомного органу. Опорні мостові крани, у яких ходові колеса спираються безпосередньо на підкранові рейки, закріплені на колонах будівлі, забезпечують високу жорсткість конструкції та стабільність динамічних характеристик, що є критично важливим при маніпуляціях із масивними та чутливими до ударних навантажень бетонними виробами. Підвісні мостові крани, ходові візки яких переміщуються по нижніх полицях двотаврових балок перекриття, дозволяють максимізувати корисну площу цеху. Козлові та напівкозлові крани є оптимальним рішенням для відкритих складських майданчиків, але поступаються опорним кранам за точністю позиціонування вантажу в умовах закритого виробничого приміщення.

За зоною застосування опорні мостові крани орієнтовані переважно на закриті виробничі цехи, підвісні – на цехи та ремонтні дільниці з обмеженим простором, а козлові – на відкриті полігони та складські майданчики. За способом передачі навантаження опорні крани передають вертикальні зусилля безпосередньо на колони будівлі, підвісні – на ферми покриття, тоді як козлові конструкції спираються на власні наземні рейкові шляхи, що робить їх незалежними від несучої здатності будівельних конструкцій. Діапазон вантажопідйомності опорних кранів є найширшим і охоплює значення від кількох тонн до понад 500 тонн, тоді як підвісні системи обмежені величинами порядку 10–12 тонн, а козлові крани здебільшого перекривають середній та високий діапазон вантажопідйомності. З погляду коефіцієнта використання виробничої площі підвісні крани мають перевагу завдяки можливості виїзду за межі прольоту будівлі на консолях, тоді як козлові конструкції поступаються через наявність власних опор. Водночас за точністю позиціонування вантажу, що є критичним показником для заводів ЗБВ, опорні мостові крани демонструють найвищі результати завдяки жорсткому з'єднанню з підкрановими шляхами та мінімальним коливанням металоконструкції, тоді як козлові крани поступаються через більшу довжину та піддатливість опорних стійок. Наведене зіставлення підтверджує, що для основних технологічних операцій усередині цеху формування залізобетонних виробів, пов'язаних із переміщенням масивних і чутливих до динамічних впливів виробів, найбільш обґрунтованим є застосування опорної двобалкової конструктивної схеми, тоді як підвісні та козлові крани доцільно використовувати як

допоміжне обладнання для обслуговування локальних дільниць і відкритих складських зон. Порівняльний аналіз наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльні технічні характеристики кранового обладнання для цехів ЗБВ

Характеристика	Мостовий опорний кран	Мостовий підвісний кран	Козловий / напівкозловий кран
Зона застосування	Закриті виробничі цехи	Цехи, ремонтні зони	Відкриті полігони, склади
Діапазон вантажопідйомності, т	5-500	0,5-12	5-200
Точність позиціонування	Дуже висока	Висока	Середня
Вплив на несучі конструкції будівлі	Високий	Середній	Відсутній

Для розрахунку механізмів пересування моста та візка опір пересуванню крана визначений, як сума опору тертя ковзання в цапфах ходових коліс і тертя кочення коліс по рейках, опору, спричиненого можливим ухилом підкранової колії, та вітрового навантаження на конструкцію. Для механізму пересування крана прийнято кранові дворебордні колеса типу К2Р-710×150 за ГОСТ 3569-74; маса крана-аналога, використана для розрахунку опорів руху з подальшим коригуванням на прийняті конструктивні параметри, становить 152000 кг. За результатами розрахунку визначено необхідну кількість ходових коліс балансирного візка, виконано перевірку відсутності буксування приводних коліс (коефіцієнт запасу зчеплення перевищує нормативне значення) та обчислено потужність приводу механізму пересування крана - 7,9 кВт при моменті на валу двигуна 2790 Нм. Аналогічний розрахунок виконано для механізму пересування вантажного візка (маса візка-аналога 12600 кг, кранові одноребордні колеса К1Р-400×100 за ГОСТ 3569-74); потужність приводу механізму пересування візка становить 7,5 кВт при моменті на валу 1000 Нм. Обидва механізми пересування виконані безредукторними, з використанням високомоментних гідромоторів, з'єднаних із приводними колесами через відкриту зубчасту передачу, що дозволяє спростити кінематичну схему та підвищити надійність приводу в умовах запиленого середовища цеху ЗБВ.

Питання проєктування металоконструкцій мостових кранів, зокрема методики розрахунку прогінних балок моста на міцність, жорсткість та стійкість, викладені в [11] та [12], подають узагальнені конструктивні схеми несучих елементів кранів різного технологічного призначення. Зазначені джерела підкреслюють, що застосування зварних балок коробчастого перерізу дозволяє забезпечити необхідну жорсткість на вигин і кручення металоконструкції при відносно малій власній масі, що є важливим фактором зниження навантаження на підкранові шляхи та несучі конструкції будівлі цеху.

Основні розміри прогінної (головної) балки моста коробчастого перерізу визначено з умови необхідної висоти в середньому перерізі, узгодженої зі стандартною шириною прокатного листа, з подальшим призначенням висоти стінки, товщини поясів і стінки, ширини балки та величини звисання поясів. Для врахування впливу власної маси балки на її згин обчислено інтенсивність розподіленого навантаження з коефіцієнтом, що враховує масу настилу, діафрагм і підвізкової рейки. Розрахункове динамічне навантаження на гаку визначене з урахуванням динамічного коефіцієнта, обчисленого для двох розрахункових випадків - відриву вантажу від основи (підйом із підхватом) та екстреного гальмування механізму підйому; для подальших розрахунків прийнято більше з двох значень коефіцієнта. Перевірка міцності при згині середнього перерізу балки, виконана для найнебезпечнішого положення вантажного візка посередині прольоту, підтвердила виконання умови міцності з достатнім запасом відносно допустимого напруження для сталі Ст3. Визначено розміщення поперечних (основних і додаткових) та поздовжнього ребер жорсткості з урахуванням гнучкості стінки балки; для прийнятих параметрів необхідним визнано встановлення поперечних діафрагм і одного поздовжнього ребра жорсткості. Перевірка місцевої стійкості стінки балки за нормальними та дотичними напруженнями, а також стійкості стиснутого поясу, підтвердила достатній коефіцієнт запасу стійкості відносно нормативного значення. Розрахунок кутового зварного шва, що з'єднує пояс балки зі стінкою, виконаний для трьох варіантів технології

зварювання (однопрохідне автоматичне, однопрохідне напівавтоматичне та ручне багатопрохідне зварювання), підтвердив запас міцності шва в усіх розглянутих випадках. Перевірка статичної жорсткості моста за допустимим прогином поздовжньої балки від дії рухомого навантаження та перевірка динамічної жорсткості за часом згасання вертикальних коливань підтвердили відповідність спроєктованої конструкції нормативним вимогам.

Обговорення. Отримані результати розрахунку свідчать про те, що обґрунтоване поєднання двобалкової опорної конструктивної схеми з незалежними безредукторними гідроприводами механізмів підйому та пересування дозволяє забезпечити необхідну вантажопідйомність (40 т) при збереженні прийнятних масо-габаритних показників крана та достатніх запасів міцності, стійкості й жорсткості несучих елементів. Використання високомоментних гідромоторів без проміжних редукторів у механізмах пересування спрощує кінематичну схему приводу, знижує кількість елементів, що потребують технічного обслуговування в умовах запиленого середовища, і водночас забезпечує плавність розгону та гальмування, що є визначальним чинником для збереження цілісності свіжовідформованих залізобетонних виробів під час транспортування. Порівняння отриманих запасів міцності металоконструкції з нормативними значеннями (зокрема, за умовами міцності при згині та зсуві, місцевої стійкості стінки й поясів, міцності зварних з'єднань) показує, що прийняті конструктивні параметри балки моста забезпечують надійну роботу конструкції у важкому режимі 7М без надмірного перевитрачання металу.

Висновки. За результатами виконаного дослідження обґрунтовано конструктивне рішення мостового опорного крана вантажопідйомністю 40 тонн для заводу залізобетонних виробів у вигляді двобалкової конструкції з вантажним візком та безредукторними гідравлічними приводами механізмів підйому і пересування. Виконано розрахунок механізму підйому вантажу, за результатами якого обрано канат конструкції 25-Г-І-Н-1568 (160) діаметром 22,5 мм, визначено геометричні параметри барабана (діаметр 490 мм, довжина 2000 мм) та підтверджено міцність його стінки.

Список використаних джерел

1. Іванченко Ф.К. Підйомно-транспортні машини: підручник / Ф.К. Іванченко. Київ: Вища шк., 1993. 413 с.
2. Підйомно-транспортні машини: Розрахунки підіймальних і транспортувальних машин: підручник / В.С. Бондарєв, О.І. Дубинець, М.П. Колісник та ін. К.: Вища шк., 2009. 734 с.
3. Підйомно-транспортні та вантажно-розвантажувальні машини: підручник / О.М. Лівінський, О.І. Курок, Л.Є. Пелевін та ін. Київ: Вид-во «МП Леся», 2016. 676 с.
4. Будівельні машини та обладнання: підручник / О.М. Пшінько, М.В. Савицький та ін. – Київ: «МП Леся», 2015. 611 с.
5. Баладінський В.Л. Пристрої та механізми вантажопідйомних машин: навч. посіб. / В.Л. Баладінський, І.В. Русан, О.М. Гаркавенко, О.Ю. Вольтерс. Київ: КНУБА, 2005. 132 с.
6. Будівельна техніка: підручник / В.Л. Баладінський, А.М. Тугай, О.М. Гаркавенко, І.В. Русан. Київ: КНУБА, 2002. 236 с.
7. Гончарук О.М. Вантажопідйомна, транспортуюча та транспортна техніка: навч. посіб. / О.М. Гончарук, В.М. Стрілець. Рівне: Вид-во НУВГП, 2006. 345 с.
8. Русан І.В. Вантажопідйомні машини: метод. рек. і завдання до курсового проекту для студ. спец. БМО і ПНМ / І.В. Русан, О.М. Гаркавенко, О.Ю. Вольтерс. Київ: КНУБА, 2006. 60 с.
9. Русан І.В. Підйомно-транспортні машини: метод. вказівки до практичних занять та тестові питання з модульних контролів / І.В. Русан, Л.Є. Пелевін, О.М. Гаркавенко. Київ: КНУБА, 2008. 58 с.
10. Волянюк В.О. Підйомно-транспортні машини: метод. рек. та завдання до курсової роботи / В.О. Волянюк, Д.О. Міщук, О.Ю. Вольтерс. Київ: КНУБА, 2018. 72 с.
11. Тіщенко Л.М. Проектування вантажопідйомних машин та навантажувачів / Л.М. Тіщенко, В.О. Білостоцький. Харків, 2003. 401 с.
12. Атлас конструкцій підйомно-транспортних машин / В.О. Білостоцький, Д.І. Мазоренко, Л.М. Тіщенко та ін. – Харків: ХНТУСГ, 2008. – Ч. І. Крани і кранові механізми. 100 с.; Ч. ІІ. Транспортуючі машини. 2009. 98 с.
13. ISO 4301-1. Cranes – Classification. Part 1: General.

СЕКЦІЯ 2

«ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ В УКРАЇНІ»

RENOVATION OPTIONS COMPARATIVE ANALYSIS OF A SEWER TUNNEL COLLECTOR BY LIMIT STATES

Alevtyna Aleynikova[1], Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technology and Organization of Construction Production
Svitlana Yesakova[1]**,** PhD, Associate Professor of Department of Geotechnics, Underground Structures and Hydrotechnical Construction
Ihor Voronenko[1,2], postgraduate of the Department of Technology and Organization of Construction Production, Deputy General Director for Sewerage Operations - Director of the Kharkiv Water and Sewage Complex
Borys Sorokin[2], PhD, Deputy Head of the Service for Cooperation with International Organizations
1 – O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine
2 –Municipal enterprise «Kharkiv Thermal Networks» in Kharkiv, Ukraine

ABSTRACT. *The results of a thorough investigation of two design and technological schemes for the renovation of a large-diameter sewer tunnel collector in the sewers of the municipal oblivion of Kharkov have been presented. The solutions for the use of polyethylene sheathing as permanent formwork and internal anti-corrosion element have been developed, in which the main load-bearing element is a polyethylene polyethylene pipe. ring hardness. For both schemes, the work was analyzed at a depth of 4 and 13 meters, the wastage of concrete and reinforcement, the specific features of the conveyance, technological risks and the prospects for practical stagnation were assessed.It has been shown that the option with a shield is more promising for deep repairs, since it allows for the use of load-bearing monolithic concrete, the corrosion resistance of polyethylene and the reduced wear resistance of a polymer structure.*

Keywords: *construction; technology; restoration; collector; polymer; concrete.*

Introduction. External sewerage networks of large cities of Ukraine are among the most responsible elements of engineering infrastructure, since the sanitary condition of territories, safe operation of buildings and structures, as well as the stability of the operation of residential and industrial areas depend on their uninterrupted functioning. For the city of Kharkiv, the problem of wear and tear of critical infrastructure is a real problem. The search for rational options is of particular relevance due to the high degree of wear and tear of reinforced concrete tubing collectors, the difficult conditions of dense urban development and restrictions on the complete decommissioning of networks for the period of repair and restoration work.

For a well-founded choice of a rational option, it is not enough to simply compare geometric parameters or general technical characteristics. It is necessary to establish the nature of the transfer of soil load to the structure, to estimate the change in the consumption of concrete and reinforcement depending on the depth of occurrence, to determine the role of the annular stiffness of the polymer element in the overall operation of the system, and also to check the compliance of the selected structural scheme with the conditions of reconstruction in a limited urban space. It is this formulation of the problem that determines the scientific and practical relevance of the research performed.

Analysis of recent research and publications. A separate area of scientific research is related to the aggressiveness of the sewage environment. It has been established that in the upper zone of collectors under the influence of H_2S, moisture and thion bacteria, biogenic sulfuric acid corrosion develops, which is one of the main causes of degradation of concrete and reinforced concrete structures [1–17]. The results of survey and experimental studies indicate that even high-quality concrete under such conditions requires the use of special protective systems or design solutions that exclude direct contact of cement stone with an

aggressive environment. It is for this reason that polyethylene linings, sheets and profile elements are considered as an effective means of barrier anti-corrosion protection.

Research objective. The purpose of the article is to provide an engineering justification for the feasibility of using polyethylene pipe to restore the operational reliability of a large-diameter sewer tunnel collector in comparison with the option of complete replacement with a polyethylene pipe of increased annular stiffness.

Main part. The initial data for the study were design and calculation materials for the restoration of the section of the sewer collector Ø1500 mm between shafts No. 10 and No. 11. For the basic comparison, the specific gravity of the soil $\gamma = 20$ kN/m³ and the calculated soil resistance $R = 20$ t/m² were adopted. 2 options for the height of the backfill above the collector vault were considered separately: 4 m and 13 m. This combination of initial parameters makes it possible to evaluate the operation of the structure both in conditions of relatively shallow laying and during the operation of a deep city collector [17].

Option A (Fig. 1,2) provides for the dismantling of the destroyed vaulted part of the existing tunnel, cleaning and, if necessary, restoration of the tray part, arrangement of foundations with reinforcement outlets, installation of a polyethylene liner made of a profiled pipe of low ring stiffness, installation of a reinforcement frame and concreting of a monolithic vault. In this scheme, the polyethylene liner is not considered as the main load-bearing element. Its functional purpose is to form the inner surface of the channel, protect the structure from aggressive environments and ensure the manufacturability of concrete work.

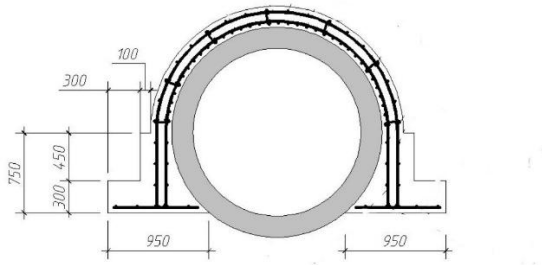


Fig.1. Scheme with polyethylene sheathing and monolithic vault (option A)

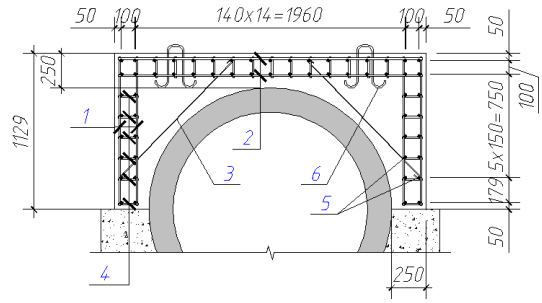


Fig.2. Scheme with a full polyethylene pipe and protective block (option B, 1-6 range of fittings)

In option B, after similar preparation of the base and foundations, a solid profiled polyethylene pipe of large diameter with increased annular stiffness is laid, over which a prefabricated monolithic protective block is arranged. In this case, the polymer element performs not an auxiliary, but an essential structural function. Therefore, the economic efficiency and reliability of the system largely depend on the class of annular stiffness of the pipe, the accuracy of its laying, the quality of contact with the base and the conditions for backfilling.

The structural scheme using polyethylene sheathing is based on the principle of rational functional distribution between materials. The polyethylene element forms a continuous inner surface of the channel, which is operated in an aggressive sewage environment, ensures manufacturability of installation and performs the function of non-removable formwork. The monolithic reinforced concrete arch, in turn, is the

main load-bearing element of the structure and perceives the load from the soil massif. This approach makes it possible to use a polyethylene element of a lower class of annular stiffness without assigning the main load-bearing function to it. For the repair of an existing tunnel collector, this is also of fundamental importance due to the possibility of partial preservation of the existing tray part and local restoration of damaged areas without complete dismantling of the entire structure.

The technological sequence of works in option A involves opening the collector in an open way with the arrangement of fastening the walls of the pit, dismantling the emergency upper part of the tunnel, cleaning the tray part, arranging the foundations, fixing the polyethylene lining, installing the reinforcing frame, concreting the monolithic vault, arranging waterproofing and performing backfilling with compaction. In the junctions of the inspection shafts, such a scheme provides greater flexibility in the formation of design solutions, since the geometric parameters of the monolithic part can be specified taking into account the actual technical condition of the existing collector. A new inspection shaft measuring 6 × 4 m with an internal polyethylene lining has also been designed for the object under consideration, which additionally increases the corrosion resistance of the junction.

The design scheme using a solid polyethylene pipe is based on a different principle of operation. It allows you to reduce the consumption of reinforcement in the external protective element, but requires the use of a pipe with a significantly higher annular stiffness. This, in turn, leads to an increase in the thickness or complexity of the wall profile, an increase in the mass of the polymer, an increase in the purchase price and increased dependence on a specific manufacturer. In addition, such a scheme imposes stricter requirements for the accuracy of base preparation and the quality of backfill compaction, since excessive ovality of the cross-section or local defects in the support can cause undesirable redistribution of forces in the pipe body.

Conclusions. From a constructive point of view, the main difference between the considered options is the place of formation of the main bearing reserve of the system. In option A, this reserve is provided by traditional and relatively accessible materials for the local market - concrete and steel reinforcement. In option B, a significant part of the bearing reserve is transferred to a specialized polyethylene product of large diameter. For objects of critical engineering infrastructure in conditions of unstable material and technical support, such a difference has not only an estimated, but also a significant organizational and technological significance.

References

1. Aleinikova, A. I. (2020) Organizational and technological solutions for the restoration of the sewage collector near the KhTZ plant. *Scientific Bulletin of Construction, vol. 4*, 69–75. https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/uk/article/view/206 [in Ukrainian].
2. Aleinikova, A. I., Hulievskyi, P. Yu., Voronenko, V. O. (2023) Organizational and technological solutions for the repair and restoration of sewer tunnels in the bordering areas with inspection shafts. *Communal Management of Cities, vol. 4 (178)*, 118–124 https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-118-124 [in Ukrainian].
3. Honcharenko, D. F., Hulievskyi, P. Yu. (2021) Use of basalt in repair and restoration of water supply and sewerage networks. *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture. 2*, 36–42 http://uajcea.pgasa.dp.ua/article/view/235817 [in Ukrainian].
4. Wang, X., Zeng, C., Yan, X., & Zhang, P. (2024). Study on the Bearing Capacity of the Polyethylene Pipe–Cured-In-Place Pipe Liner Composite Structure under External Pressure. *Buildings, 14(7), 2253* https://doi.org/10.3390/buildings14072253.
5. Starkova O., Shapovalova, O., Aleinikova, A., Solodovnyk, G., & Liubynskyi, P. (2026). Development of a system of indices for monitoring and assessing the sustainability of underground utilities. *Technology Audit and Production Reserves, 1(2(87)*, 57–65 https://doi.org/10.15587/2706-5448.2026.350994.
6. Abdullah A. (2022). Biogenic corrosion of cementitious composite in wastewater sewerage system. *Process Safety and Environmental Protection. V.165*, 545-585. https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.07.030.
7. Cheshire B. (2024). Concrete Structures in Wastewater Environments: Key Considerations for Substrate Repair and Surface Preparation for Protective Coatings. *Proceedings of the AMPP C2024-20364*, 1-15. https://doi.org/10.5006/C2024-20364
8. Anwar, A., Liu, X., Zhang, L. (2022) Biogenic corrosion of cementitious composite in wastewater sewerage system. Process Safety and Environmental Protection, Vol. 165, 545–585. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582022006437

ФОРМУВАННЯ БАГАТОШАРОВИХ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ВІНІЛЕСТЕРНИХ СМОЛ ДЛЯ ЗАХИСТУ КАНАЛІЗАЦІЙНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Олексій Кабусь, кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник[1],
Анна Скрипинець, доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри хімії та інтегрованих технологій[1],
Олександр Гук, аспірант кафедри матеріалознавства та інженерії композитних конструкцій[1],
[1]Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Чорноглазівська, 17, 61002, м. Харків, Україна

АНОТАЦІЯ. *Проаналізовано сучасні підходи до застосування полімерних покриттів, композитних футерувальних систем і технологій релайнінгу для підвищення довговічності бетонних конструкцій каналізаційної інфраструктури в умовах агресивного кислотного середовища. Показано перспективність використання багатошарових бетон-композитних систем, у яких бетон виконує основну несучу функцію, а композитні шари забезпечують захист від корозійного впливу. Запропоновано конструкцію системи на основі вінілестерної смоли, у якій зовнішній полімерний шар забезпечує хімічну стійкість та обмежує проникнення агресивного середовища, скловолокнистий шар підвищує тріщиностійкість, а адгезійний шар формує зчеплення з бетонною основою. Наведено основні етапи формування композитних панелей. На їх основі виготовлено експериментальні зразки для довготривалих корозійних випробувань.*

Ключові слова: *біогенна сірчанокисла корозія; полімерні покриття; скловолокнисті композити; кислотостійкість; гібридні системи.*

Вступ. Каналізаційна інфраструктура працює в умовах постійного впливу агресивного середовища, що призводить до поступового руйнування бетонних і залізобетонних конструкцій. Одним із найбільш небезпечних факторів деградації є біогенна сірчанокисла корозія, яка виникає внаслідок утворення сірчаної кислоти під дією мікроорганізмів у каналізаційних мережах [1–3]. У результаті кислотного впливу відбувається руйнування цементного каменю, зниження міцності бетону, утворення тріщин і поступова втрата експлуатаційної придатності споруд (рис. 1).

Досвід експлуатації каналізаційних колекторів, насосних станцій та очисних споруд показує, що традиційні мінеральні ремонтні матеріали не забезпечують необхідну довговічність в умовах тривалого кислотного впливу [2, 3]. У зв’язку з цим актуальним є застосування полімерних і композитних систем захисту, здатних формувати бар’єр між агресивним середовищем і бетонною поверхнею.

Рис.1. Біогенна корозія залізобетонних конструкцій очисних споруд

Аналіз літературних джерел. Одним із перспективних напрямів захисту бетонних конструкцій є використання полімерних покриттів і композитних матеріалів [4 – 6]. Одним із

найбільш поширених рішень є технологія релайнінгу (CIPP), що передбачає просочування скловолокнистих рукавів полімерними смолами з подальшим формуванням композитної оболонки [7]. Розвиток цього напряму підтверджується широким застосуванням склопластикових труб великого діаметра та композитних футерувальних систем у каналізаційних мережах і тунелях глибокого закладання [8]. Разом з тим використання композитів як основних несучих елементів пов'язане зі значним збільшенням вартості конструкцій. У зв'язку з цим перспективним напрямом є створення гібридних бетон-композитних систем, у яких бетон виконує основну несучу функцію, а композитний матеріал розглядається переважно як корозійностійкий захисний шар, що забезпечує герметичність і стійкість до агресивного середовища. Дослідження показують, що поліестерні та вінілестерні смоли є перспективними для створення захисних композитних систем завдяки їх підвищеній хімічній стійкості в умовах агресивних середовищ [4, 9]. При цьому традиційні одношарові полімерні покриття мають підвищену чутливість до локальних дефектів і механічних пошкоджень, що може призводити до порушення суцільності захисного шару та розвитку підплівкової корозії з подальшим відшаруванням [2, 10]. Це зумовило поступовий перехід до багатошарових композитних систем, у яких окремі шари забезпечують стійкість до агресивного середовища, підвищення тріщиностійкості та надійне зчеплення з бетонною поверхнею [11]. Використання скловолокнистих армувальних шарів дозволяє підвищити тріщиностійкість системи, знизити ризик утворення локальних дефектів та забезпечити збереження герметичності при деформаціях конструкцій. Водночас актуальним завданням є розроблення та експериментальне обґрунтування багатошарової бетон-композитної системи захисту, у якій окремі шари виконують визначені функції: формування адгезійного з'єднання з бетонною основою, підвищення тріщиностійкості та створення бар'єра для проникнення агресивного середовища.

Мета роботи. Розробка експериментальних зразків багатошарових бетон-композитних систем захисту на основі вінілестерних смол для експлуатації в умовах агресивного каналізаційного середовища.

Виклад основного матеріалу. У лабораторних умовах були сформовані експериментальні зразки багатошарових композитних систем, призначених для захисту бетонних конструкцій каналізаційної інфраструктури від дії агресивних середовищ. Формування системи здійснювали пошаровим нанесенням полімерних композицій та армувальних елементів із функціональним розділенням окремих шарів (рис. 2).

На першому етапі формували зовнішній захисний шар на основі вінілестерної смоли SIRESTER® VE 14-M-110/AT із використанням ініціатора твердіння Akperox A50 (рис. 2, а). До складу композиції вводили мінеральний тонкомолотий наповнювач для регулювання реологічних властивостей, зниження усадки та ущільнення структури матеріалу. Для стабілізації поверхневого шару та обмеження впливу кисню повітря на процес твердіння використовували поверхневу добавку Crystaline Solution MW. Товщина захисного шару становила близько 0,5–0,8 мм. До початку гелеутворення смоли формували основний композитний шар із використанням скловолокнистого армувального мату поверхневою щільністю 150 г/м² (рис. 2, б), просоченого смолою SIRESTER® VE 14-M-110/AT (рис. 2, в). Основний шар виконував функцію підвищення тріщиностійкості системи та обмеження розвитку локальних дефектів у захисному покритті. Товщина армованого шару становила 2–3 мм і може змінюватися залежно від агресивності умов експлуатації. Для забезпечення зчеплення композитної системи з бетонною основою на тильну поверхню панелі наносили адгезійний шар на основі полімерної композиції з подальшим посипанням сухим фракціонованим піском (рис. 2, г). Крупність піску підбирали залежно від способу поєднання композитної системи з бетонною основою та необхідних показників адгезії (рис. 2, д).

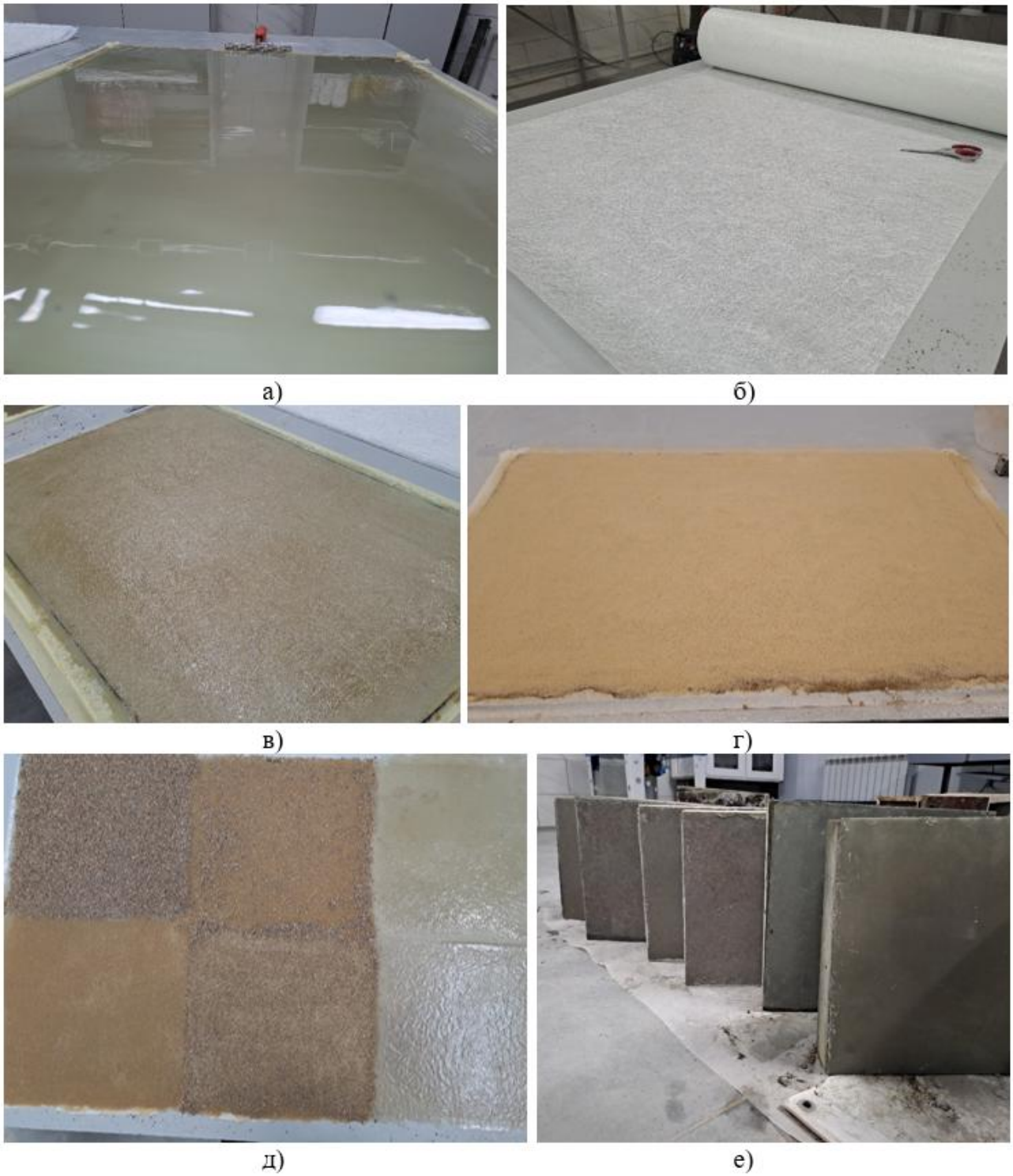


Рис.2. Етапи формування багатошарової композитної системи захисту:
а) нанесення захисного полімерного шару; б) підготовка скловолокнистого армувального шару; в) формування основного композитного шару; г) створення адгезійного шару з мінеральною посипкою; д) варіанти структури адгезійної поверхні; е) поєднання композитної панелі з бетонною основою.

Після завершення процесу твердіння сформовані композитні панелі поєднували з бетонною основою двома способами: шляхом безпосереднього бетонування при використанні панелей як незнімної опалубки або шляхом приклеювання до затверділого бетону із застосуванням полімерної адгезійної композиції з тиксотропною добавкою аеросилу (рис. 2, е). Використання тиксотропних компонентів дозволяло регулювати в’язкість композиції та товщину адгезійного шару залежно від технологічних умов нанесення. На основі сформованих композитних панелей були підготовлені

експериментальні зразки для довготривалих досліджень корозійної стійкості систем в умовах агресивного каналізаційного середовища.

Висновки. Запропоновано підхід до формування багатошарових бетон-композитних систем захисту на основі вінілестерних смол для експлуатації в умовах агресивного каналізаційного середовища. Обґрунтовано функціональне розділення шарів системи, у якій зовнішній полімерний шар виконує бар'єрну функцію, скловолокнистий армувальний шар підвищує тріщиностійкість, а адгезійний шар забезпечує зчеплення з бетонною основою. Сформовані композитні панелі використані для виготовлення експериментальних зразків для довготривалих досліджень стійкості до корозійного впливу. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оцінку довговічності систем, адгезійної міцності та проведення натурних випробувань в умовах реальної експлуатації каналізаційних споруд.

Список використаних джерел:

1. Anwar, A., Liu, X., & Zhang, L. (2022). Biogenic corrosion of cementitious composite in wastewater sewerage system – a review. *Process Safety and Environmental Protection*, 165, 545–585. https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.07.030
2. Woyciechowski, P., Łukowski P. Szmigiera E. (2021). Concrete corrosion in a wastewater treatment plant – A comprehensive case study. *Construction and Building Materials*, 303, 124388. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124388
3. Pramanik, S.K., Bhuiyan M., Robert D., Roychand R. (2024). Bio-corrosion in concrete sewer systems: Mechanisms and mitigation strategies. *Science of The Total Environment*, 921, 171231. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171231
4. Motlatle, A.M., Ray, S.S., Ojijo, V., & Scriba, M.R. (2022). Polyester-based coatings for corrosion protection. *Polymers*, 14, 3413. https://doi.org/10.3390/polym14163413
5. Verma, C., et al. (2020). Epoxy resins as anticorrosive polymeric materials: A review. *Reactive and Functional Polymers*, 156, 104741. https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104741
6. Aleinikova, A.I., Hulievskyi, P.Yu., & Voronenko, I.V. (2026). Research of modern construction materials used in sewer environments. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu*, 215, 70–80. https://doi.org/10.18664/1994-7852.215.2026.358739
7. Zhu, H., Wang, T., Wang, Y., Li, V. (2021). Trenchless rehabilitation for concrete pipelines of water infrastructure: A review from the structural perspective. *Cement and Concrete Composites*, 123, 104193. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104193
8. Sever, F. (2020). Using FRP for large diameter sewer rehabilitation. *Rocky Mountain Trenchless Conference Proceedings*, 26–30. https://quakewrap.com/pdfs/FRP-Tunnel-Repair-Trenchless-QuakeWrap-2020.pdf
9. Kabus, O.V., Skrypynets, A.V., & Vynohradov, V.V. (2025). Otsinka khimichnoi stiikosti polimernykh smol dlia kompozytnykh system zakhystu betonu kanalizatsiinykh sporud [Evaluation of the chemical resistance of polymer resins for composite systems protecting concrete in sewer structures]. *Komunalne hospodarstvo mist. Seriia: Tekhnichni nauky ta arkhitektura*, 6(194), 255–261. https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-6-194-255-261
10. Goncharenko, D., Aleinikova, A., Kabus, O., Kolomiiets, Y. (2019). Study of the efficiency of epoxy coating protection of concrete surfaces from sulfuric acid corrosion. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708(1), 012081. https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012081
11. Mohammadi, M., & Mostofinejad, D. (2021). CFRP-to-concrete bond behavior under aggressive exposure of sewer chamber. *Journal of Composite Materials*, 55(24), 3359–3373. https://doi.org/10.1177/00219983211004699

АНАЛІЗ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА МЕТОДІВ ТЕРМІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ ВІДВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ ЗЕМЛЕРИЙНИХ МАШИН

Богдан Федишин, асистент, PhD[1] (ORCID: 0000-0003-2420-7332),
Русла Дідик, студент[1],
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. *У роботі проведено комплексне дослідження методів підвищення експлуатаційної ефективності дорожньо-будівельної техніки в умовах низьких температур на основі системного аналізу наукових джерел, технічної літератури та кліматичних чинників. На основі аналізу фундаментальних праць у галузі інженерної механіки досліджено фізику взаємодії металу з ґрунтовим середовищем, а також потенціал рекуперації тепла гідравлічних систем. Використовуючи метеорологічні дані та температурні карти України, обґрунтовано необхідність впровадження активних теплових систем для забезпечення безперебійної роботи техніки в умовах негативних температур. Особливу увагу приділено роботі бульдозерів, де кріогенна адгезія вологого ґрунту призводить до спотворення проектної геометрії відвала та зміни кута різання. Встановлено, що намерзання ґрунту збільшує тяговий опір та погіршує енергоефективність машини. Доведено перспективність використання відпрацьованого масла гідросистеми як теплоносія для термічного самоочищення відвала, що дозволяє знизити питомі витрати палива та підвищити продуктивність техніки.*

Ключові слова: *дорожньо-будівельна техніка; землерийні машини; відвальне обладнання; налипання ґрунту; енергоефективність; рекуперація тепла; тяговий опір; призма волочіння.*

Вступ. Сучасний стан дорожньо-будівельної галузі вимагає впровадження високоефективних та енергозберігаючих технологій, здатних забезпечити безперебійну роботу техніки у складних кліматичних умовах. Експлуатація землерийних машин у зимовий період супроводжується інтенсивною адгезією вологого ґрунту до робочих поверхонь відвалів. Це явище призводить до спотворення проектної геометрії відвала, збільшення тягового опору на 25–40 % та зниження коефіцієнта корисної дії машини [1, 2].

Коли ґрунт налипає на ніж та дзеркало відвала, змінюється кут різання, що змушує двигун працювати у режимі підвищеного навантаження, збільшуючи витрати палива та інтенсивність зношення вузлів. Традиційні методи боротьби з налипанням, зокрема механічне очищення або використання пасивних гідрофобних покриттів, є недостатньо ефективними. Механічне очищення потребує зупинки технологічного процесу, а полімерні покриття швидко руйнуються під впливом абразивних часток ґрунту [3].

У зв’язку з цим актуальним напрямком досліджень є створення активних систем теплового впливу на робочі органи землерийних машин із використанням вторинних енергоресурсів гідравлічних систем.

Аналіз літературних джерел. Проблема підвищення ефективності експлуатації землерийно-транспортних машин у складних кліматичних умовах широко висвітлена у працях вітчизняних і зарубіжних науковців. Фундаментальні основи розрахунку зусиль різання та копання ґрунту викладені у працях Л. А. Хмари, С. В. Кравця та М. П. Скоблюка [1]. У зазначених роботах детально описано фізичні процеси взаємодії металу з ґрунтовим середовищем.

У роботах Л. Є. Пелевіна та співавторів розглянуто конструктивні особливості робочих органів землерийної техніки та методи підвищення їх ефективності [2]. Питання енергоефективності будівельної техніки за низьких температур досліджено у працях, присвячених роботі гідравлічних приводів та втратам енергії у гідросистемах [4].

У сучасних зарубіжних дослідженнях значна увага приділяється методам зниження адгезії ґрунту до металевих поверхонь, використанню біонічних поверхонь та термічних методів очищення [5 - 7]. Результати цих досліджень свідчать про перспективність застосування активних систем підігріву робочих органів.

Мета роботи. Метою дослідження є аналіз теплотехнічних параметрів систем підігріву відвального обладнання та розробка рекомендацій щодо підвищення їх енергоефективності шляхом використання вторинних енергоресурсів гідравлічної системи машини.

Матеріали і методи. Методологічну основу роботи становить системний аналіз науково-технічної літератури та нормативних даних у галузі експлуатації дорожньо-будівельної техніки. Для дослідження фізики взаємодії робочих органів із ґрунтом використано фундаментальні положення інженерної механіки, викладені у працях вітчизняних і зарубіжних учених.

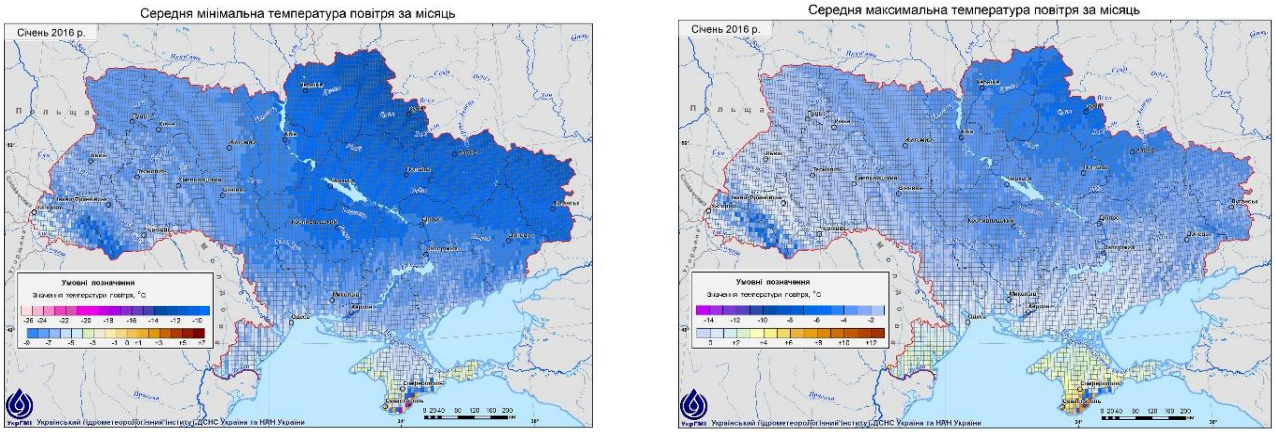
У ході дослідження застосовано порівняльний аналіз техніко-експлуатаційних показників сучасних систем очищення відвалів для визначення найбільш енергоефективного рішення. Оцінка кліматичних умов проводилася на основі аналізу температурних карт України, що дозволило обґрунтувати доцільність застосування активного теплового впливу.

Для прогнозування змін у технологічному процесі використано аналіз літературних джерел, присвячених дослідженню призми волочіння та процесів тертя між ґрунтом і металом. Це дозволило оцінити вплив температурного режиму на енергоємність розробки ґрунту.

Об’єктом дослідження є процеси термічного самоочищення відвалів землерийних машин із використанням теплової енергії гідравлічної системи.

Виклад основного матеріалу. Процес взаємодії відвального обладнання з вологим ґрунтом за негативних температур характеризується складними теплофізичними та механічними процесами. За температур нижче 0 °С волога, що міститься у ґрунті, переходить у твердий стан та утворює міцні адгезійні зв’язки між металевою поверхнею відвала та ґрунтовою масою. У результаті формується шар намерзлого ґрунту, який змінює геометрію робочого органу та істотно впливає на параметри процесу різання.

На рис. 1 наведено температурні карти України у зимовий період, що відображають розподіл мінімальних та максимальних температур повітря. Аналіз кліматичних умов свідчить про те, що у більшості регіонів країни протягом зимового сезону спостерігаються стійкі негативні температури, які створюють передумови для інтенсивного намерзання ґрунту на робочих поверхнях землерийних машин.



а **б**

Рис.1. Температурна карта України у січні 2016:
а – найнижча температура; б – найвища температура

В умовах експлуатації бульдозерів налипання ґрунту на ніж та дзеркало відвала призводить до зміни кута різання та збільшення площі контакту між робочим органом і ґрунтом. Це спричиняє зростання тягового опору, збільшення навантаження на силову установку машини та підвищення витрат палива.

На рис. 2 показано характер намерзання ґрунту на поверхні відвала бульдозера. Значний об’єм намерзлого матеріалу змінює проектну геометрію робочого органу та порушує нормальний процес формування призми волочіння. У результаті збільшується площа контакту між ґрунтовими шарами, що призводить до інтенсивного тертя ґрунту об ґрунт замість ковзання ґрунту по металевій поверхні

відвала. Це спричиняє зростання тягового опору, погіршення умов різання та підвищення енерговитрат машини.

Рис. 2. Намерзання ґрунту на відвал бульдозера

Для усунення негативного впливу кріогенної адгезії проаналізовано можливість використання теплової енергії гідравлічної системи машини. Під час роботи насосів, гідроциліндрів та гідромоторів частина механічної енергії перетворюється у теплову, внаслідок чого температура робочої рідини може досягати 50–70 °С [4].

Запропонований принцип роботи системи полягає у циркуляції нагрітої робочої рідини через внутрішні канали або теплообмінні елементи, розташовані у конструкції відвала. Таким чином теплова енергія передається металевій поверхні робочого органу та забезпечує підтримання температури вище точки замерзання води.

У процесі теплового впливу на межі контакту металу з ґрунтом утворюється тонка водяна мікроплівка, яка суттєво зменшує сили адгезії та коефіцієнт тертя. У результаті характер взаємодії змінюється: замість тертя ґрунту об намерзлий ґрунт виникає ковзання по зволоженій поверхні металу. Це сприяє стабілізації процесу різання та зменшенню тягового опору машини.

Додатковим конструктивним елементом системи є теплоізоляційний шар, розташований на тильній стороні відвала. Його використання дозволяє мінімізувати втрати тепла у навколишнє середовище та спрямувати основний тепловий потік безпосередньо до робочої поверхні.

Таким чином, використання рекуперації тепла гідравлічної системи для термічного самоочищення відвалів дозволяє підвищити ефективність роботи землерийних машин у зимових умовах, знизити енерговитрати та забезпечити стабільність технологічного процесу.

Обговорення. Проведене дослідження підтверджує, що найбільш енергоефективним методом боротьби з кріогенною адгезією ґрунту є використання систем рідинного підігріву, інтегрованих у конструкцію відвального обладнання.

Порівняння технічних рішень свідчить про доцільність використання відпрацьованого масла гідросистеми як теплоносія, що дозволяє утилізувати скидне тепло без додаткових витрат палива. Такий підхід відповідає сучасним вимогам до енергозбереження та підвищення ефективності будівельної техніки [2, 4].

Перспективним напрямком подальших досліджень є створення математичної моделі теплообміну між гідравлічною рідиною, металом відвала та ґрунтовим середовищем, а також проведення експериментальних випробувань у реальних умовах експлуатації.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує, що кріогенна адгезія вологого ґрунту до робочих поверхонь відвалів є одним із ключових факторів зниження енергоефективності землерийних машин.

Аналіз літературних джерел показав, що найбільш перспективним напрямком подолання цієї проблеми є впровадження активних систем теплового впливу із використанням вторинних енергоресурсів.

Використання рідинного підігріву шляхом рекуперації тепла гідравлічної системи дозволяє забезпечити стабільне самоочищення відвала та знизити питомі витрати палива.

Запропоновані рішення можуть бути використані при проектуванні нового покоління

енергозберігаючих робочих органів дорожньо-будівельної техніки, адаптованих до роботи у складних кліматичних умовах.

Список використаних джерел

1. Khmara, L. A., Kravets, S. V., Nichke, V. V., Nazarov, L. V., Skobliuk, M. P., & Nikitin, V. G. (2010). *Mashyny dlia zemlianykh robit* [Earth-moving machines]. Rivne; Dnipropetrovsk; Kharkiv.
2. Pelevin, L. Ye., Karpenko, M. M., & Lavryk, S. V. (2014). Bahatoiarusnyi robochyi orhan zemleryinoi mashyny [Multi-tiered working body of an earth-moving machine]. *Tekhnika Budivnytstva*, (33), 36–39.
3. Maksymiuk Yu. V., Rashkivskyi V. P., Prystailo M. O., Fedyshyn B. M. (2024). Development and computer testing of equipment for cutting soils with spatially oriented knives of a bulldozer blade. *Strength of Materials and Theory of Structures.* Issue 113. P. 285–296. https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.113.285-296
4. Zakharova, E., Sarkisyan, G., & Onyshchenko, O. (2023). Analiz ta uzahalnennia tekhnolohii vlashtuvannia zemlianoho polotna iz zaluchenniam systemy avtomatychnoho niveliuvannia robochym ahrehatom zemleryinoi tekhniky [Analysis and generalization of the technology of subgrade construction with the use of automatic leveling system by the working unit of earth-moving machinery]. *SWorldJournal, (22-01),* 44–54. https://doi.org/10.30888/2663-5712.2023-22-01-055
5. Qiang L, Zhikai C, Tingting G, Jing W, XiuJie X (2023) Overview of research on adhesion reduction and desorption technology of soil-contact construction equipment. J Civil Eng Environ Sci. 2023; 9(1). https://doi.org/10.17352/2455-488X.000060
6. Abdeldayem, M. A. A., & Tekeste, M. Z. (2024). Scaling law modeling artificial soil-to-bulldozer blade interaction. *Journal of Terramechanics, 116,*. https://doi.org/10.1016/j.jterra.2024.101001
7. Ren, L., Tong, J., Li, J., & Chen, B. (2005). Experimental investigation of bionic rough curved soil cutting blade surface to reduce soil adhesion and friction. *Soil and Tillage Research, 80*(1–2), 1–8.

АНАЛІЗ ПОВОЄННОЇ ВІДБУДОВИ З ВПРОВАДЖЕННЯМ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ СТАЛОГО РОЗВИТКУ НА ПРИКЛАДІ СМТ. БОРОДЯНКА

Олександр Молодід, професор, д.т.н., [1] (ORCID: 0000-0001-8781-6579),
Володимир Рашківський доцент, к.т.н., [1] (ORCID: 0000-0002-5369-6676),
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. *У статті розглянуто ключові організаційні та технологічні підходи до відновлення територій, що зазнали руйнувань унаслідок бойових дій. Особлива увага приділена аналізу досвіду смт Бородянка Київської області — одного з населених пунктів, які постраждали під час активних бойових дій у 2022 році. Окреслено основні виклики, застосовані технології, форми міжсекторальної взаємодії та проблеми, які виникали під час реалізації відновлювальних програм. Наведено рекомендації щодо подальшої оптимізації процесів реконструкції з урахуванням принципів сталого розвитку.*

Ключові слова: *повоєнне відновлення; організаційні рішення; технології реконструкції; смт Бородянка; гуманітарна допомога; інфраструктура; сталий розвиток.*

Вступ. Після деокупації окремих територій виявлено, що у окремих населених пунктах зруйновані цілі житлові комплекси, вулиці, чи навіть мікрорайони/масиви. Відповідно, питання відбудови зруйнованих будівель та споруд є особливо актуальним на даний час.

Після звільнення смт Бородянка було встановлено, що саме будівлі вздовж вулиці Центральної та прилеглих вулиць були майже вщент зруйновані або зазнали значних пошкоджень (рис. 1).

Можна стверджувати, що у сучасних умовах відбудова населених пунктів повинна розглядатися, як принципово новий етап розвитку територій заснований на засадах сучасних тенденцій сталого будівництва, що включає в себе економічний, екологічний та соціальний аспект.

Мета роботи. Аналіз існуючих організаційно-технологічних рішень реалізації підходів сталого розвитку громад.

Матеріали і методи. Основними матеріалами для аналізу є експертне наукове дослідження процесів, аналіз закордонного досвіду.

Виклад основного матеріалу. Воєнні дії спричинили масове вимушене переміщення

населення. У 2022 р. чисельність постійних мешканців смт Бородянка скоротилася до кількох тисяч осіб (у довоєнний період у містечку проживало близько 12 тис) [1]. Водночас у процесі поетапного відновлення спостерігається зворотна міграція населення. Станом на 2024–2025 рр. рівень повернення мешканців є одним із найвищих серед деокупованих громад Київської області, що свідчить про відновлення життєвого потенціалу території.

Наразі, відбудова громади здійснюється в межах державної політики післявоєнної реконструкції за координації профільних центральних органів виконавчої влади та за участі органів місцевого самоврядування. На сучасному етапі відновлено або перебувають у завершальній стадії реконструкції близько двох третин пошкоджених об'єктів [6]. Будівельно-відновлювальні роботи поєднуються із впровадженням принципів енергоефективності, універсального дизайну та безбар'єрності [6].

Відповідно до принципів сталого і зеленого енергоефективного будівництва, відновлення чи зведення нових будівель та споруд повинно базуватися на трьох основних положеннях, а саме: дотримання екологічності, мати економічний ефект та забезпечувати соціальні потреби.

Для оцінки дотримання вимог сталості будівництва при відновленні громади було виконано аналіз впроваджених рішень.

Процеси відновлення Бородянської селищної територіальної громади можуть розглядатися як пілотний приклад реалізації комплексного підходу до сталої енергоефективної відбудови на рівні невеликої міської агломерації (рис. 1). Високий ступінь руйнувань, значний обсяг державного фінансування та залучення міжнародних партнерів створили умови для апробації сучасних архітектурно-будівельних і управлінських рішень.

Рис.1. Інформаційні табло реалізації комплексної відбудови смт Бородянка

Запропонована комплексна модель формується на основі узагальнення теоретичних положень сталого розвитку та аналізу практики відбудови громад. Ключовим методологічним положенням є системність підходу, яка передбачає взаємоузгоджений розвиток усіх складових життєвого середовища.

Системність моделі реалізується через поєднання таких напрямів:

- енергоефективність;
- реконструкція (перебудова) та модернізація інженерних мереж;
- формування безбар'єрного середовища;
- модернізація рекреаційних зон;
- економічна активізація територій;
- збереження культурної спадщини;
- логістична модернізація.

Поєднання зазначених напрямів забезпечує перехід від локальних відбудовчих заходів до цілісної моделі сталого розвитку громади.

На серпень 2025 р у Бородянці було відновлено понад 600 житлових об'єктів із 825 пошкоджених. Відновлення пошкоджених будівель полягало не тільки у відновленні несучої здатності та експлуатаційних властивостей окремих пошкоджених конструктивних елементів будівлі а і у впровадженні енергоефективних рішень, а саме: влаштуванні на дахах багатоповерхівок сонячних панелей для забезпечення освітлення під'їздів, прибудинкових територій, роботи ліфтів.

При цьому, будинки термомодернізовують: виконують утеплення фасадів, утеплення дахів, виконують заміну та оновлення внутрішніх інженерних мереж (рис. 2).

Рис.2.Відновлення пошкоджених внаслідок військових дій будівель (було / стало) вул. Центральна, 355.

Окремо варто приділити увагу збереженню культурної спадщини для майбутніх нащадків. Так, у різний період після деокупації селища, на території населеного пункту було зафіксовано появу знакових об’єктів муралізму та графіті, що мають високу художню та історико-культурну цінність (рис. 3). Особливого значення набули роботи як місцевих авторів, так і митців зі світовим ім'ям, зокрема анонімного художника Бенксі (Banksy) [18, 19]. Ці роботи символізують спротив та людську стійкість українського народу в умовах збройної агресії.

З метою забезпечення фізичного збереження та захисту від негативного впливу атмосферних чинників, було прийнято рішення про музеєфікацію зазначених об’єктів. Так, фрагменти будівельних конструкцій із нанесеними зображеннями було вилучено зі зруйнованих будівель, та застосовано до них методи консервації. Для запобігання вандалізму та негативній дії ультрафіолетового випромінювання артефакти розміщено під спеціальним захисним склом.

Такі об'єкти зібрано в єдиний меморіальний простір на площі перед Будинком культури, позаду постаменту Тараса ШЕВЧЕНКА. Кожна експозиційна одиниця супроводжується інформаційними табличками, що містять дані про об’єкт, контекст його створення, хронологію подій, що передували створенню та авторство.

Рис.3. Меморіальний простір (фото Молодід О.)

Модернізація рекреаційних зон передбачає створення якісних громадських просторів, зон відпочинку, спортивних та дитячих майданчиків (рис. 4). Вдосконалення транспортної інфраструктури та просторових зв’язків усередині громади сприяє розвитку економічної активізації територій, орієнтованої на формування привабливого інвестиційного клімату, розвиток малого і середнього бізнесу та створення нових робочих місць, що позитивно позначається на соціальному аспекті.

Рис.4. Урбаністичний парк (фото Рашківський В.)

Отже, підсумовуючи можна виокремити складові комплексної моделі відбудови населених пунктів, що враховують вимоги сучасних нормативних документів та основ сталого розвитку (табл. 1) та може бути використана для проєктів відновлення інших населених пунктів України, що зазнали різноманітних пошкоджень та руйнувань внаслідок військових дій.

Таблиця 1

Складові комплексної моделі відбудови населених пунктів

Складова	**Зміст та напрями реалізації**
Архітектурно-містобудівна	Раціональна просторово-планувальна структура, нові типи житлової та громадської забудови, ревіталізація зруйнованих територій
Енергоефективна	Термомодернізація будівель, енергоефективні матеріали, зменшення експлуатаційних витрат
Екологічна	Циркулярне будівництво, використання продуктів повторної переробки
Інженерна	Реконструкція мереж водо-, тепло- та електропостачання
Соціальна	Формування безбар'єрного середовища, доступність для МГН
Рекреаційна	Модернізація зон відпочинку, зелених насаджень, спортивної інфраструктури
Економічна	Створення робочих місць, інвестиційна привабливість
Цифрова	Смарт-технології, цифрові сервіси, пілотні 5G-рішення

Список використаних джерел:

1. Molodid, O. S., Kovalchuk, O. Yu., Rashkivskyi, V. P., Plokhuta, R. O., & Musiiaka, I. V. (2022). Osoblyvosti obstezhennia budivel ta sporud, shcho zaznaly poshkodzhen vnaslidok voiennykh dii [Features of inspection of buildings and structures damaged as a result of hostilities]. In Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system (KZIATPS–2022): Materialy XII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (Vol. 2, pp. 94–96). NU «Chernihivska politekhnika». https://conference-chernihiv-polytechnik.com/materiali-konferentsiyi/kzyatps-2022/ [in Ukrainian].
2. Rashkivskyi, V., & Demianenko, R. (2023). Study of the adequacy of the BIM model in the survey of damaged building objects. In 2023 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies: Conference Proceedings (pp. 314–317). https://doi.org/10.1109/SIST58284.2023.10223588.
3. Varukha, V., Nechyporuk, V., & Rashkivskyi, V. (2023). Rozrobka mekhanizovanoi dilianky dlia vykonannia budivelnykh robit na terytoriiakh, shcho postrazhdaly v khodi viiskovykh dii [Development of a mechanized section for construction works in territories affected by hostilities]. In Problemy ta perspektyvy rozvytku tekhnichnykh ta bioenerhetychnykh system pryrodokorystuvannia: Konstruiuvannia ta dyzain: Tezy dopovidei XXII Mizhnarodnoi onlain-konferentsii (pp. 11–12). NUBiP Ukrainy. https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u232/zbirnik_npppdf.
4. Bilokon, S. S., Didkivskyi, O. R., & Rashkivskyi, V. P. (2024). Mechanization of preparatory work on construction sites in post-war territories. In Problemy ta perspektyvy rozvytku tekhnichnykh ta bioenerhetychnykh system pryrodokorystuvannia: Konstruiuvannia ta dyzain: Tezy dopovidei XXIII Mizhnarodnoi onlain-konferentsii (pp. 111–114). NUBiP Ukrainy. https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u232/zbirnik_1.pdf.
5. Ivashko, Y., Dmytrenko, A., Molodid, O., Ivashko, O., Molochko, V., Belinskyi, S., & Bicaj, P. (2024). The destruction of the established urban environment of Borodianka and Irpen as a result of the Russian-Ukrainian war. International Journal of Conservation Science, 15(2), 785–800. https://ijcs.ro/public/IJCS-24-02_27_Ivashko.pdf
6. Molodid, O., Musiiaka, I., Bogdan, S., Yashchenko, Y., Hryniewicz, M., Matlak, B., Plokhuta, R., & Novak, Y. (2025). Restoration of ceilings in buildings damaged as a result of over-design impacts, while preserving the established urban environment. International Journal of Conservation Science, 16(3), 1347–1362. 10. 36868/IJCS.2025.03.08.

ОРГАНІЗАЦІЙНІ ПРИНЦИПИ ВИКОРИСТАННЯ КОМПЛЕКТУ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ ПРИ БУДІВНИЦТВІ БУДИНКІВ ФОРМАТУ BUSINESS HOUSE

Іван Перегінець, к.т.н., директор[1] (ORCID: 0000-0003-3812-6509),
Георгій Хіоні, доктор філософії, консультант з економічних питань[2] (ORCID: 0000-0001-9952 - 1890),
[1]Науково-технічний центр Академії будівництва України, м. Київ, вул. Освіти, 4, 03037, Україна
[2]Академія будівництва України, м. Київ, вул. Освіти, 4, 03037, Україна

***АНОТАЦІЯ**. У роботі розглянуто питання використання сучасних будівельних машин, механізмів, електрифікованого інструменту та цифрових технологій при будівництві ^енергоефективних будинків формату Business House. Обґрунтовано, що для малоповерхового будівництва нового покоління важливим є не лише застосування енергоефективних конструктивних рішень, а й оптимізація самого будівельного виробництва. Особлива увага приділена впливу механізації, BIM-моделювання, цифрового контролю, скорочення простоїв техніки, підвищення точності монтажу та зменшення втрат матеріалів на економічну ефективність девелоперського проєкту. Показано, що застосування сучасних машин і механізмів дає можливість зменшити трудомісткість робіт, скоротити строки будівництва, підвищити якість виконання технологічних операцій та прискорити оборот інвестованого капіталу. Для будинків формату Business House це має особливе значення, оскільки такі об'єкти поєднують функції житла, енергоефективної інженерної системи та довгострокового економічного активу. Запропонований підхід дозволяє розглядати механізацію будівництва не лише як технічний інструмент, а як складову формування нового виду будівельної індустрії.*

***Ключові слова:** будівельні машини; механізація; енергоефективність; Business House; BIM; економічна ефективність; NZEB; цифрове будівництво*

Вступ. Сучасне будівельне виробництво перебуває під впливом одночасно кількох ключових чинників: підвищення вартості енергоресурсів, необхідності декарбонізації, дефіциту кваліфікованої робочої сили, зростання вимог до якості будівельно-монтажних робіт та потреби у скороченні строків реалізації проєктів. У таких умовах особливого значення набуває використання сучасних будівельних машин і механізмів, які дозволяють підвищити продуктивність праці, зменшити непродуктивні витрати та забезпечити стабільність технологічних процесів.

Для будинків формату Business House ця проблема має особливе значення. Такий будинок розглядається не лише як об'єкт житлової нерухомості, а як енергоефективна система з високими вимогами до герметичності, якості теплоізоляційного контуру, точності монтажу конструкцій, інтеграції інженерного обладнання, сонячної електростанції, систем накопичення енергії та цифрового моніторингу. Тому будівельне виробництво для таких об'єктів повинно бути максимально керованим, технологічно дисциплінованим і економічно обґрунтованим.

Аналіз літературних джерел. У сучасних дослідженнях технологічних технічних систем підкреслюється, що ефективність машин і механізмів значною мірою залежить від характеру динамічних процесів, режимів роботи та стабільності взаємодії елементів системи [1]. Для будівельного виробництва це означає необхідність не тільки вибору відповідної техніки, а й оптимізації режимів її застосування на будівельному майданчику.

Дослідження напружено-деформованого стану дерев'яного каркасу енергоефективних будівель стандарту NZEB підтверджують важливість точності виконання конструктивних рішень та контролю геометричних параметрів під час монтажу [2]. Це безпосередньо пов'язано з необхідністю використання лазерного обладнання, підйомно-монтажних механізмів, вакуумних систем та інших засобів механізації.

Питання моніторингу показників енергоспоживання житловими будинками розглядається як важливий інструмент оцінки ефективності технологічних рішень протягом життєвого циклу будівлі [3]. Такий підхід дає змогу перейти від разового контролю якості будівництва до постійного цифрового супроводу об'єкта.

Дослідження надійності елементів механічних систем залежно від характеристик робочого середовища показують важливість урахування умов експлуатації обладнання, зношування, навантажень та режимів роботи [4]. Для будівництва це означає, що економічна ефективність машин і механізмів залежить не тільки від їх вартості, а й від надійності, ремонтопридатності та зменшення простоїв.

Питання оптимізації режимів електропостачання при виконанні будівельно-технологічних процесів енергоефективних будівель має безпосереднє значення для організації сучасного будівельного майданчика [5]. Окремо слід зазначити, що енергоефективність будівельного виробництва розглядається як інструмент підвищення економічного потенціалу девелоперської компанії через зниження витрат, підвищення продуктивності та конкурентоспроможності [6].

Мета роботи. Метою роботи є обґрунтування доцільності використання сучасних будівельних машин, механізмів, електрифікованого інструменту та цифрових технологій при будівництві будинків формату Business House, а також визначення їх впливу на енергоефективність, якість будівництва та економічну результативність девелоперського проєкту.

Виклад основного матеріалу. Будівництво будинків формату Business House потребує переходу від традиційної малоповерхової забудови до більш організованої індустріальної моделі. У такій моделі кожна технологічна операція повинна бути попередньо описана, нормована, пов’язана з BIM-моделлю та забезпечена відповідними машинами, механізмами й інструментами.Доцільним є застосування малогабаритних телескопічних навантажувачів, мінікранів, вакуумних монтажних систем, акумуляторного електроінструменту, лазерних нівелірів, автоматизованих станцій приготування будівельних сумішей, мобільних систем енергозабезпечення та цифрових систем контролю виконання робіт.

Особливу роль відіграє BIM-модель будинку. Вона дозволяє не тільки відображати архітектурно-конструктивні рішення, а й планувати послідовність робіт, контролювати обсяги матеріалів, зменшувати ризик помилок та погоджувати роботу різних бригад. Для Business House BIM-модель стає інструментом не лише проєктування, а й управління будівництвом, експлуатацією та подальшим моніторингом об’єкта.

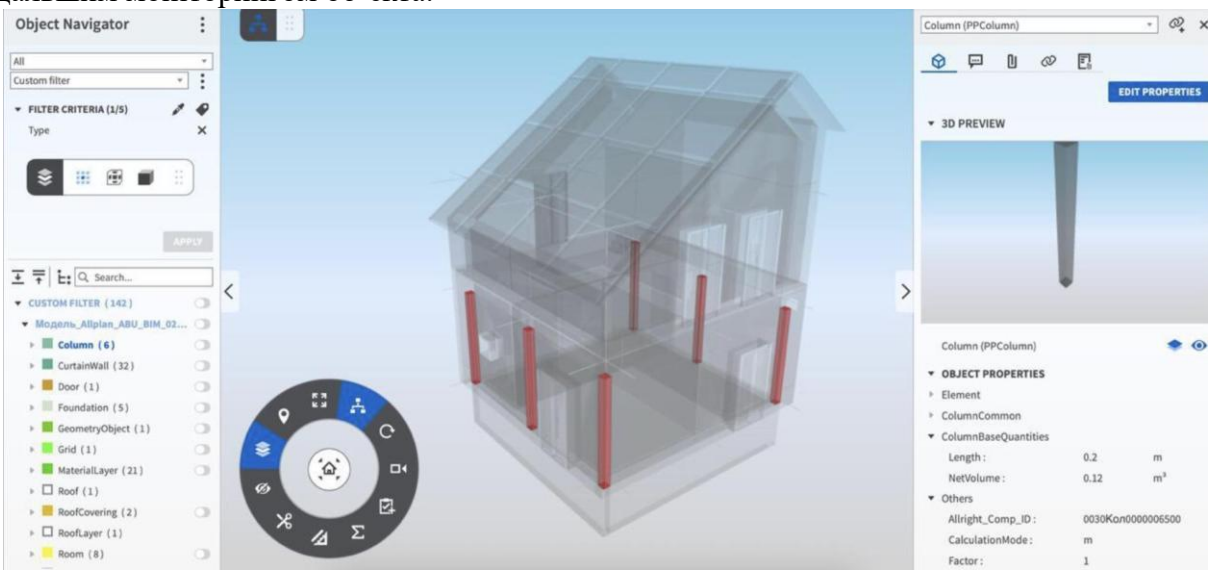


Рис. 1. BIM-модель будинку формату Business House Start як інструмент цифрової координації будівельно-технологічних процесів

Економічний ефект від застосування машин і механізмів проявляється у кількох напрямах. По-перше, скорочується тривалість виконання робіт. Це особливо важливо для девелоперського бізнесу, оскільки зменшення строків будівництва прискорює оборот капіталу. По-друге, зменшується кількість помилок і переробок, що прямо впливає на собівартість. По-третє, підвищується продуктивність праці, що дає змогу одній бригаді виконувати більший обсяг робіт за менший час.

Для енергоефективного будинку важливим є не тільки кінцевий результат, а й технологічна дисципліна під час будівництва. Неправильно виконаний монтаж теплоізоляції, порушення герметичності, відхилення у вузлах примикання або неточності встановлення вікон можуть суттєво знизити фактичну енергоефективність будинку. Тому застосування точних інструментів, механізованих систем монтажу та цифрового контролю є необхідною умовою досягнення проєктних показників.

Окремий економічний ефект пов’язаний із переходом на акумуляторний та електрифікований інструмент. Його використання дозволяє зменшити залежність від дизельних генераторів, скоротити витрати на паливо, знизити шумове навантаження та підвищити мобільність бригад. У перспективі будівельний майданчик Business House може частково забезпечуватися електроенергією від тимчасових мобільних сонячних станцій та акумуляторних систем.

Важливою складовою є також часткова заводська готовність конструкцій. Чим більша частина операцій переноситься у контрольовані виробничі умови, тим менше випадкових факторів впливає на якість будівництва. На майданчику залишається монтаж, з’єднання елементів, контроль геометрії, герметизація та введення інженерних систем в експлуатацію. Такий підхід зменшує втрати матеріалів, скорочує трудомісткість і підвищує прогнозованість економічного результату.

Рис. 2. Візуалізація будинку Business House Start із сонячною електростанцією як приклад енергоефективного житлового об’єкта нового покоління

Для економіста важливим є те, що використання сучасних машин і механізмів слід оцінювати не лише за прямою вартістю оренди або придбання техніки. Необхідно враховувати повний економічний ефект: скорочення строків будівництва, зменшення браку, зниження витрат на оплату ручної праці, підвищення якості, зменшення енергоспоживання, прискорення введення об’єкта в експлуатацію та підвищення довгострокової вартості активу.

Таким чином, застосування сучасних будівельних машин і механізмів при будівництві Business House є не допоміжним фактором, а одним із ключових елементів економічної моделі проєкту. Воно забезпечує перехід від ремісничого підходу до керованого технологічного процесу, в якому якість, строки, вартість і енергоефективність можуть бути попередньо змодельовані та проконтрольовані.

Висновки.

1. Комплексне використання сучасних будівельних машин і механізмів є важливою передумовою підвищення якості та енергоефективності будівництва будинків формату Business House.
2. Механізація та цифрове управління будівельними процесами дозволяють скоротити тривалість будівництва, зменшити трудомісткість робіт, мінімізувати помилки та підвищити продуктивність праці.
3. Економічна ефективність застосування машин і механізмів проявляється через зменшення собівартості, прискорення обороту капіталу, скорочення витрат на переробки та підвищення довгострокової вартості об'єкта.
4. Поєднання BIM-моделювання, електрифікованого інструменту, точного монтажного обладнання та цифрового моніторингу створює основу для формування нового виду будівельної індустрії в Україні.

Список використаних джерел

1. Nazarenko, I., et al. (2021). *Dynamic processes in technological technical systems: Monograph*. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER. https://doi.org/10.15587/978-617-7319-49-7
2. Nazarenko, I. I., & Pereginets, I. I. (2025). Napruzheno-deformovanyi stan konstruktsii derevianoho karkasu enerhoefektyvnykh budivel standartu NZEB [Stress-strain state of the wooden frame structure of NZEB energy-efficient buildings]. *Opir materialiv i teoriia sporud*, 115, 76–84. https://doi.org/10.32347/2410-2547.2025.115.76-84
3. Pereginets, I. I. (2024). Monitorynh pokaznykiv ta kryteriiv otsinky spozhyvannia enerhii zhytlovymy budynkamy [Monitoring indicators and criteria for assessing energy consumption by residential buildings]. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva*, 54(1), 105–114. https://doi.org/10.32347/2707-501X.2024.54(1).105-114
4. Nazarenko, I., Mishchuk, Y., Nechiporuk, V., Albeshchenko, D., & Pereginets, I. (2026). Definition of reliability parameters of the spacer plate of a jaw crusher depending on the characteristics of the working environment and the material of manufacture. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(7(139)), 13–25. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.353102
5. Pereginets, I. I., & Smirnov, Yu. O. (2026). Stroitelno-tekhnologicheskie protsessy energoeffektivnykh zdanii pri optimizatsii rezhimov elektrosnabzheniia [Construction and technological processes of energy-efficient buildings in optimizing power supply modes]. *Gradostroitelstvo i territorialnoe planirovanie*, 91, 255–272.
6. Rosynskyi, A. V., & Onofriichuk, I. I. (2020). Enerhoefektyvnist budivelnoho vyrobnytstva yak instrument rozvytku ekonomichnoho potentsialu developerskoi kompanii [Energy efficiency of construction production as a tool for developing the economic potential of a development company]. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn*, 44, 31–39. https://doi.org/10.32347/2707-501x.2020.44.31-39

LIFTING AND LOWERING MECHANISM OF A GRAVITY-BASED ENERGY STORAGE SYSTEM

Maksym Tomilov, PhD student[1]

[1]Kyiv National University of Construction and Architecture, Povitryanykh syl ave. 31, 03037, Ukraine

ABSTRACT. *The theses consider a lifting and controlled lowering mechanism for a gravity-based energy storage system. The mechanism consists of a load, guides, a rope-and-drum system, a reduction gear, a reversible motor-generator, a braking system and a control system. During charging, the drive lifts the load and converts electrical energy into potential energy. During discharge, controlled lowering drives the electrical machine in generator mode. The work presents the basic energy, force, torque and power relationships, a calculation example for a 100 t load lifted by 30 m, and technical conditions for safe operation.*

Keywords: *gravity-based energy storage; lifting mechanism; rope drum; pulley system; motor-generator; regenerative operation*

Introduction. The development of renewable generation increases the need for stationary energy storage systems that can absorb surplus electricity and return it during periods of deficit. Gravity-based

energy storage uses a lifted mass as the energy-bearing element. Its practical characteristics depend not only on mass and lifting height, but also on the design of the lifting and lowering mechanism, which determines the available power, dynamic loads, efficiency and safety of the installation [1; 2].

The purpose of the work is to substantiate the structure and main operating parameters of a mechanism for lifting and controlled lowering of a gravity-based energy storage load. The mechanism should operate as a drive during charging and as a source of mechanical input for electrical generation during discharge.

Materials and methods. The study is based on analytical generalization of rope lifting mechanisms, reversible electrical drives and gravity-based storage concepts. The proposed kinematic chain includes a motor-generator, coupling, reduction gear, service and emergency brakes, rope drum, pulley system, guided load and position sensors. The energy stored by a lifted mass is determined by $E = mgh$, where m is the load mass, g is the acceleration of gravity and h is the lifting height.

The rope force for a pulley system is estimated as $F = mg/(i_p\eta_p)$, where i_p is the pulley-system ratio and η_p is its efficiency. The simplified drum torque is $M_\beta = FD_\beta/2$, where D_β is the drum diameter. The drive power in steady lifting is $P = mgv/\eta_m$, where v is the vertical speed and η_m is the mechanical efficiency. These relationships are used to identify the influence of the lifting ratio, drum diameter, speed and mechanical losses on the selection of the drive and transmission.

Results. The mechanism operates in two energy-conversion modes. During charging, the motor-generator consumes electricity, and the reduction gear transmits torque to the drum. Rope winding lifts the load along the guides, thereby increasing its potential energy. During discharge, the load moves downward at a controlled speed. The drum and transmission rotate the same electrical machine, which then works in generator mode and transfers electricity through a power converter to the grid or local consumer.

For an illustrative case with $m = 100$ t and $h = 30$ m, the theoretical energy reserve is $E = mgh = 29.4$ MJ, or approximately 8.2 kWh. The result confirms that a single load with moderate lifting height has limited energy capacity. Practical systems therefore require a larger mass, greater height, several loads or multiple operating modules. At the same time, increasing the movement speed raises the available power but also increases dynamic loading, rope tension fluctuations, braking requirements and mechanical losses.

The pulley system decreases rope force and drum torque, which can reduce the required drive torque and enable the use of a smaller rope force in each branch. However, a higher pulley ratio increases rope travel, drum rotations and control requirements. Its selection must therefore balance force reduction against the required lifting time, rope length, drum dimensions and overall efficiency. A variable-frequency reversible drive is appropriate because it provides acceleration, steady movement, deceleration and regenerative operation under controllable speed conditions [3].

The mechanical layout must provide a continuous and predictable load path from the lifted mass to the supporting structure. Guides constrain lateral movement of the load, while the rope system transfers the vertical force to the drum. The drum diameter and rope winding arrangement should limit rope bending and avoid overlap that could cause non-uniform tension. The reduction gear matches the comparatively high rotational speed of the electrical machine to the low speed and high torque required at the drum. The coupling may compensate for small installation misalignments, but it must not allow uncontrolled relative motion when the mechanism is stopped.

During acceleration and deceleration, the control system should limit jerk and maintain rope tension. A practical control sequence includes verification of brake release, gradual torque increase, speed feedback during movement, a controlled reduction of speed near the end position and brake application only after the load is held by the drive. In generating mode, electrical torque controls the descending speed. If the receiving electrical system cannot accept the planned power, the controller must reduce speed or stop the movement before the mechanical limit is reached. This coordination is essential because the stored potential energy is released continuously during lowering.

The usable electrical energy is lower than the theoretical value because of losses in the motor-generator, converter, gear, bearings, rope system and auxiliary equipment. Consequently, the theoretical value of 8.2 kWh is a reference for preliminary assessment rather than an expected delivered value. The comparison nevertheless illustrates the direct design relationship: doubling the load mass or lifting height doubles the theoretical energy reserve, whereas the required structural capacity and braking force increase

accordingly. The chosen configuration should therefore be evaluated jointly for energy capacity, power rating, installation volume and safety requirements.

Safe operation requires normal and emergency braking, upper and lower limit switches, load-position and speed sensors, rope-tension monitoring and overspeed protection. The emergency brake must be capable of stopping or holding the load following power loss or drive malfunction. For larger systems, parallel load-bearing elements and control of force distribution can improve reliability. The control system should coordinate the electrical power command with mechanical limits in order to prevent uncontrolled lowering and excessive dynamic forces.

Conclusions. The proposed lifting and lowering mechanism enables one reversible motor-generator to perform the charging and discharging functions of a gravity-based storage system. The main parameters are load mass, lifting height, speed, pulley ratio, drum diameter, transmission ratio and total efficiency. The calculation for a 100 t load lifted by 30 m demonstrates the need to combine sufficient mass and height with an appropriately selected mechanism to obtain useful storage capacity.

Further research should focus on the optimal pulley ratio, selection of the motor-generator and reduction gear, dynamic loads during starting and braking, and the transition between motoring and generating modes. Such optimization is necessary for reliable integration of gravity-based storage with renewable generation and local power systems.

References

1. Díaz-González, F., Sumper, A., Gomis-Bellmunt, O., and Villafáfila-Robles, R. (2012). A review of energy storage technologies for wind power applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(4), 2154–2171.
2. Gravitricity. Technology. (2026). Available at: https://gravitricity.com/technology/ (accessed 23 September 2026).
3. Luo, X., Wang, J., Dooner, M., and Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. Applied Energy, 137, 511–536.

СЕКЦІЯ 3
«МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ, МОНІТОРИНГ І ДІАГНОСТИКА ТЕХНІЧНИХ ОБ`ЄКТІВ»

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ОБОЛОНОК МІНІМАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ В УМОВАХ ТЕРМОСИЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Олександр Кошевий, доктор філософії, доцент кафедри теоретичної механіки[1] (ORCID: 0000-0002-1903-2905),
Олексій Тимченко, аспірант кафедри опору матеріалів [1] (ORCID: 0009-0007-5953-0435),
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. *З метою підвищення ефективності та надійності тонкостінних просторових конструкцій проведено аналіз проблем забезпечення багатокритеріальної оптимізації параметрів оболонок мінімальних поверхонь в умовах термосилового навантаження. У роботі виконано дослідження впливу температурних і механічних навантажень на напружено-деформований стан оболонок з урахуванням геометричної та фізичної нелінійності матеріалу. Проведено розрахунки залежностей переміщень, напружень та жорсткісних характеристик оболонки від температурного навантаження і геометричних параметрів конструкції. Побудовано графіки залежностей максимальних переміщень від зміни температури та параметрів кривизни поверхні. Виконано аналіз множини Парето за критеріями мінімізації маси, напружень і переміщень оболонки. Визначено критичні значення температурного навантаження, що відповідають втраті стійкості конструкції. Встановлено раціональні значення геометричних і матеріальних параметрів оболонки, які забезпечують підвищення ефективності її роботи в умовах термосилового навантаження.*

Ключові слова: *амплітуда; вібрація; частота коливань; пружність; гумові опори, параметрична оптимізація, метод скінченних елементів, оболонки мінімальних поверхонь, оптимальне проектування.*

Вступ. При експлуатації тонкостінних просторових конструкцій у вигляді оболонок складної геометричної форми значний вплив на їх працездатність мають температурні та силові навантаження, які призводять до виникнення додаткових напружень і переміщень у конструкції. Особливо це стосується оболонок мінімальних поверхонь, для яких характерною є висока чутливість до зміни геометричних параметрів та температурних впливів. У процесі роботи таких конструкцій виникає необхідність забезпечення раціонального поєднання вимог мінімальної маси, достатньої жорсткості та забезпечення міцності і стійкості при дії термосилових навантажень [1], [2], [3]. Для забезпечення ефективної роботи оболонок мінімальних поверхонь необхідно виконувати багатокритеріальну оптимізацію їх параметрів з урахуванням впливу температурних деформацій, геометричної нелінійності та зміни фізико-механічних характеристик матеріалу. При розрахунках таких конструкцій необхідно ґрунтуватись на виконанні двох основних умов: забезпечення допустимого напружено-деформованого стану оболонки; забезпечення стійкості конструкції при змінних температурних і силових навантаженнях [4], [5].

Аналіз літературних джерел. В джерелах [1], [2] наведені основні положення теорії тонкостінних оболонок та залежності для визначення їх напружено-деформованого стану при дії механічних навантажень. У роботах [3], [4] розглядаються питання дослідження геометричних властивостей оболонок мінімальних поверхонь та особливості їх застосування в інженерних конструкціях. Вплив температурних навантажень на зміну фізико-механічних характеристик матеріалу оболонок і їх напружено-деформований стан розглянуто в роботах [5], [6]. Разом з тим питання багатокритеріальної оптимізації параметрів оболонок мінімальних поверхонь з урахуванням одночасної дії температурних і силових навантажень висвітлені недостатньо повно.

Зокрема, відсутні комплексні дослідження, спрямовані на визначення раціональних геометричних параметрів оболонок з урахуванням конфлікту критеріїв мінімізації маси, напружень та переміщень конструкції. Основні підходи до багатокритеріальної оптимізації тонкостінних конструкцій наведені в роботах [7], [8], проте питання їх застосування до оболонок мінімальних поверхонь в умовах термосилового навантаження потребують подальшого дослідження.

Мета роботи. Проведення аналізу проблем забезпечення багатокритеріальної оптимізації параметрів оболонок мінімальних поверхонь в умовах термосилового навантаження з урахуванням впливу температурних і силових факторів на напружено-деформований стан, стійкість та ефективність роботи конструкції.

Матеріали і методи. Основними матеріалами для проведення аналізу є науково-технічна та довідкова література з теорії тонкостінних оболонок, термопружності, методів чисельного моделювання та багатокритеріальної оптимізації просторових конструкцій. Основними методами, що використовуються в роботі, є методи математичного моделювання напружено-деформованого стану оболонок мінімальних поверхонь при дії термосилового навантаження, аналітичні залежності теорії оболонок та метод скінченних елементів. Для виконання розрахунків та побудови графічних залежностей використовується програмне забезпечення ANSYS**.**

Виклад основного матеріалу. При проєктуванні оболонок мінімальних поверхонь одним із визначальних факторів забезпечення їх ефективної роботи є узгодження геометричних параметрів конструкції з умовами дії зовнішніх навантажень. При цьому особливої актуальності це набуває в умовах термосилового навантаження, коли температурні деформації разом із силовими впливами істотно змінюють напружено-деформований стан оболонки та можуть призводити до відхилення її геометричної форми від початково заданої мінімальної конфігурації [9], [10]. В даному випадку досить суттєвого значення набуває проблема геометричної сумісності мінімальної поверхні з силовим полем, яка полягає в тому, що оболонки мінімальних поверхонь формуються за умовою мінімальності площі, тобто нульової середньої кривизни, що забезпечує їх геометричну оптимальність без урахування зовнішніх навантажень. Проте при дії термосилового навантаження напружено-деформований стан оболонки визначається рівняннями рівноваги з врахуванням температурних деформацій і силових впливів, які змінюють початкову геометрію поверхні та характер розподілу внутрішніх зусиль. У результаті геометрично мінімальна поверхня не завжди відповідає умовам мінімальної потенціальної енергії деформації та рівномірного розподілу напружень у конструкції, що в свою чергу призводить до необхідності узгодження геометричних параметрів оболонки з дією силового і температурного полів у процесі багатокритеріальної оптимізації, що є однією з основних проблем забезпечення ефективної роботи оболонок мінімальних поверхонь в умовах термосилового навантаження. Математично вище зазначену проблему можна описати наступним чином: Нехай оболонка мінімальної поверхні визначається умовою [1]:

$$H = \frac{k_1 + k_2}{2} = 0\,, \tag{1}$$

де: k_1, k_2 - головні кривини мінімальної поверхні (максимальна і мінімальна кривини поверхні в точці); H - середня кривина мінімальної поверхні.

Але рівняння рівноваги оболонки визначається умовою [3]:

$$\nabla_\alpha N^{\alpha\beta} + p^\beta = 0\,, \tag{2}$$

де: ∇_α - коваріантна похідна по координаті серединної поверхні оболонки; $N^{\alpha\beta}$ - тензор мембранних зусиль оболонки; p^β - компоненти зовнішнього навантаження на оболонку.

Водночас під час оптимізації виконання умови (2) вимагає узгодженості між умовами (3):

$$N = D\left(\varepsilon - \varepsilon^T\right), \tag{3}$$

тобто виникає суперечність (4):

$$H = 0 \neq, \nabla_\alpha N^{\alpha\beta} = 0 \tag{4}$$

В результаті мінімальність площі ≠ мінімальність енергії деформації, що є першою фундаментальною проблемою оптимізації. На практиці дана проблема оптимізації оболонок мінімальних поверхонь, яка полягає в неузгодженості їх початкової геометричної форми з реальним силовим і температурним полем навантаження, вирішується шляхом переходу від чисто геометричного формоутворення до комплексного інженерного підходу з урахуванням умов роботи конструкції. Для цього застосовують варіаційні методи оптимізації, що базуються на мінімізації повної потенціальної енергії системи, методи багатокритеріальної оптимізації для узгодження вимог мінімальної маси, міцності та жорсткості конструкції, а також чисельне моделювання на основі методу скінченних елементів із використанням сучасних програмних комплексів типу ANSYS (рис.1). Крім того, використовують ітераційні процедури параметричної та геометричної оптимізації форми оболонки, що дозволяють коригувати її кривизну, товщину та матеріальні характеристики з урахуванням дії термосилових навантажень і забезпечувати допустимий напружено-деформований стан конструкції.

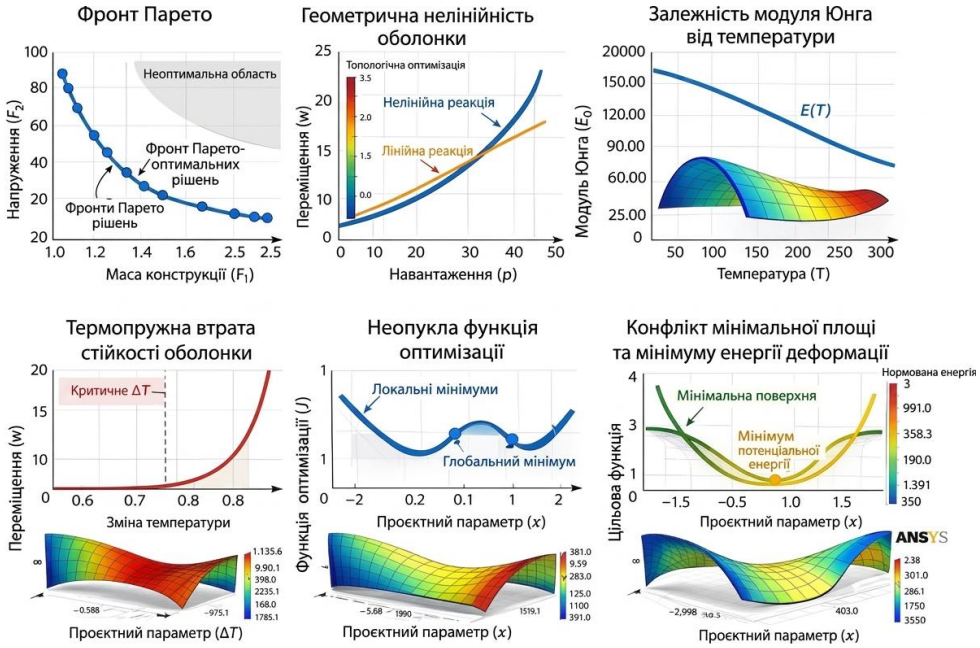


Рис.1.Основні проблеми забезпечення багатокритеріальної оптимізації параметрів оболонок мінімальних поверхонь в умовах термосилового навантаження

У межах піднятої теми друге місце займає проблема не комутативності геометричної та термосилової варіацій, яка полягає у взаємозалежності зміни геометричної форми оболонки мінімальної поверхні та її напружено-деформованого стану під дією температурних і силових навантажень, унаслідок чого послідовність урахування цих впливів приводить до різних результатів розрахунку. На практиці ця проблема вирішується застосуванням зв'язаних термомеханічних моделей, ітераційних чисельних процедур і методів багатокритеріальної параметричної оптимізації на основі методу скінченних елементів. Третє місце відводиться проблемі зв'язаної термопружної нелінійності, що виникає через взаємний вплив температурних змін фізико-механічних властивостей матеріалу та геометрії оболонки і зумовлює нелінійний характер її напружено-деформованого стану, що ускладнює процес оптимального проєктування та потребує використання зв'язаних нелінійних термомеханічних моделей і чисельних методів розрахунку. Також окреме місце займає проблема конфлікту критеріїв оптимізації, оскільки забезпечення мінімальної маси конструкції одночасно з необхідною міцністю, жорсткістю та стійкістю є взаємно суперечливим, тому вона розв'язується із застосуванням методів багатокритеріальної оптимізації, зокрема аналізу множини Парето та параметричних досліджень. Крім того, необхідно враховувати проблему геометричної нелінійності оболонки, пов'язану зі значними переміщеннями під дією термосилових навантажень, нестійкість оптимізаційної задачі через чутливість результатів до зміни

температурних і геометричних параметрів, температурну залежність фізико-механічних властивостей матеріалу оболонки, варіаційну некоректність задачі, зумовлену неопуклістю функціонала оптимізації та наявністю локальних екстремумів, проблему узгодження умов мінімальної поверхні з температурними крайовими умовами, які можуть змінювати геометрію оболонки, а також значну обчислювальну складність чисельної реалізації багатокритеріальної оптимізації, що потребує використання сучасних програмних комплексів інженерного аналізу.

Обговорення. Як видно із вище наведених даних зміна температурного навантаження та геометричних параметрів оболонки суттєво впливає на її напружено-деформований стан, зокрема на величини переміщень і напружень. Дійсні значення максимальних переміщень при зростанні температури потрапляють у діапазон, близький до критичних значень, що відповідають втраті стійкості конструкції. Таким чином, при досягненні певного температурного рівня оболонка може зазнавати значних деформацій, які є небажаними з точки зору забезпечення її надійності та експлуатаційної придатності. За умов зміни геометричних параметрів, зокрема кривизни поверхні, спостерігається зміщення цих критичних інтервалів, при якому дійсні значення напружень і переміщень можуть знаходитися у більш допустимих межах. У цьому випадку величини переміщень зменшуються, проте одночасно може зростати маса конструкції або знижуватися ефективність використання матеріалу. Отже, результати дослідження підтверджують наявність конфлікту між критеріями оптимізації, оскільки забезпечення мінімальних переміщень і напружень досягається за рахунок погіршення інших параметрів. Це свідчить про необхідність застосування багатокритеріального підходу та аналізу множини Парето для визначення раціональної області параметрів.

Висновки. Ефективність роботи оболонок мінімальних поверхонь в умовах термосилового навантаження визначається узгодженістю геометричних, матеріальних та температурно-силових параметрів. Між критеріями мінімізації маси, напружень і переміщень існує конфлікт, що обумовлює необхідність застосування багатокритеріальної оптимізації. Використання підходів на основі аналізу множини Парето дозволяє обґрунтувати раціональні параметри оболонки та забезпечити її надійну і ефективну роботу.

Список використаних джерел

1. Cao, Z., Wang, Z., Zhao, L., Fan, F., & Sun, Y. (2022). Multi-constraint and multi-objective optimization of free-form reticulated shells using improved optimization algorithm. *Engineering Structures*, *250*, 113442. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113442
2. Chen, J., Zhao, Q., & Zhang, L. (2022). Multi-Material topology optimization of thermo-elastic structures with stress constraint. *Mathematics*, *10*(8), 1216. https://doi.org/10.3390/math10081216
3. Crespino, E., Adriaenssens, S., Fraddosio, A., Olivieri, C., & Piccioni, M. D. (2024). A multi-objective optimization approach for novel shell/frame systems under seismic load. *Structures*, *65*, 106625. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106625
4. Kosheviy, O. O. (2023). Multi-criteria parametric optimisation of the displacement and weight of the shell of a minimal surface with a rectangular plan consisting of two straight lines and two semicircles under thermal and power loading. *Ways to Improve Construction Efficiency*, *1*(52), 41–54. https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.52(1).41-54
5. Liu, J. (2023). Multi-objective optimization of multi-layered cylindrical shells with opening under axial load using the NSGA-II genetic algorithm. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 1–9. https://doi.org/10.3233/jifs-230826
6. Ma, K., & Zhao, Q. (2024). Multi-objective topology optimization for thermo-elastic systems based on periodic constraints. *Journal of Thermal Stresses*, 1–31. https://doi.org/10.1080/01495739.2024.2311686
7. Shi, G., Bao, Y., Wu, W., Guo, G., Lin, Y., Zhang, X., & Tao, R. (2025). Parametric-modeling-based multi-objective thermoelastic optimization of rudder structures. *Mechanics & Industry*, *26*, 9. https://doi.org/10.1051/meca/2025002
8. Wang, S., Yi, W., Qian, H., & Ju, L. (2025). Multi-objective topology optimization of thermoelastic structures based on points density using element-free Galerkin method. *Engineering Structures*, *326*, 119515. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119515
9. Zhang, J., Luo, T., Zhang, D., Yin, S., He, H., & Peng, J. (2022). Multi-objective topology optimization of thermal-mechanical coupling anisotropic structures using the isogeometric analysis approach. *Applied Mathematical Modelling*. https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.12.014
10. Zheng, Y., & Zhang, X. (2026). Multi-Objective optimization of thermal and mechanical performance of prismatic aluminum shell lithium battery module with integrated biomimetic liquid cooling plate. *Batteries*, *12*(3), 106. https://doi.org/10.3390/batteries12030106

ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ СТІЙКОСТІ АЛЮМІНІЄВИХ ОБОЛОНОК ПРИ ТЕРМОСИЛОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ.

Олександр Кошевий, доктор філософії, доцент, доцент кафедри теоретичної механіки[1] (ORCID: 0000-0002-1903-2905),
Остап Літков, аспірант кафедри опору матеріалів[1] (ORCID: 0009-0003-4492-6980),
[1]Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. *Сучасне будівельне проєктування демонструє стійкий попит на легкі, матеріалозберігаючі просторові конструкції, серед яких особливе місце посідають алюмінієві оболонки Гаусової кривизни. Ефективне проєктування таких систем є складною задачею через необхідність врахування геометричної нелінійності та високої чутливості матеріалу до термосилових навантажень. У роботі виконано аналітичний огляд сучасних вітчизняних та світових методів оптимального проєктування оболонкових конструкцій. Проаналізовано підходи параметричної, топологічної та морфологічної оптимізації. Виявлено наукову проблему, що полягає у відсутності комплексних методик оптимізації тонкостінних алюмінієвих покриттів, які б одночасно враховували ризик нелінійної втрати стійкості та температурні напруження при варіюванні геометричних параметрів. Сформульовано перспективні напрями розв'язання задачі з використанням методу скінченних елементів та апроксимаційних метамоделей.*

Ключові слова: *алюмінієві оболонки; стійкість; термосилове навантаження; метод скінченних елементів; багатокритеріальна оптимізація; геометрична нелінійність, метод скінченних елементів, оптимальне проектування, параметрична оптимізація, напруженням по Мізесу, оптимізація стійкості, оптимізація міцності, оптимізація ваги.*

Вступ. Сучасний розвиток будівництва характеризується активним застосуванням легких тонкостінних конструкцій, зокрема оболонок складної геометрії. Алюмінієві оболонки завдяки високому співвідношенню міцності до маси, корозійній стійкості та довговічності широко використовуються у великопрогонових покриттях та інженерних спорудах [1, 4, 8]. Разом із тим такі конструкції є високочутливими до втрати стійкості, що зумовлено малою товщиною елементів та складною геометрією. Фундаментальні основи теорії стійкості пружних систем закладено в класичних працях С. П. Тимошенка [9] та В. Т. Койтера [11], які довели критичну чутливість тонкостінних конструкцій до початкових геометричних недосконалостей. З інженерної точки зору проєктування таких просторових систем з алюмінієвих сплавів жорстко регламентується європейськими нормами EN 1999-1-5 (Єврокод 9) [10]. Даний стандарт висуває суворі вимоги до перевірки оболонок на локальне та загальне випинання (buckling), проте не надає прямих рекомендацій щодо пошуку оптимальних параметрів кривизни при змінних температурних полях, що робить задачу їх оптимізації особливо актуальною. Особливу складність становить аналіз оболонок при комбінованому впливі механічних і температурних навантажень, що потребує врахування геометричної нелінійності та термосилових ефектів [8, 9, 11].

Аналіз літературних джерел. Дослідження оболонкових конструкцій охоплюють широкий спектр методів оптимального проєктування, серед яких виділяють параметричну, топологічну та морфологічну оптимізацію [3]. Як свідчить бібліометричний огляд C. Veres та M. Tănase [1], сучасний світовий тренд екологічного проєктування (Sustainable design) вимагає пошуку нових матеріалозберігаючих стратегій для оболонок. Сучасні дослідження підтверджують, що саме наявність додатної Гаусової кривизни є ключовим ідентифікатором жорсткості оболонки [2], що дозволяє ефективно перерозподіляти зусилля. Значний крок у розвитку методів оптимального проєктування форми оболонок (Shape optimal design) був зроблений завдяки впровадженню ізогеометричного аналізу [4]. Водночас особливої уваги потребують адекватні моделі поведінки пружних оболонок саме при термосилових навантаженнях, які були фундаментально описані в монографії вітчизняної школи будівельної механіки під авторством В. А. Баженова та О. П. Кривенка [8].

Метод скінченних елементів є основним інструментом чисельного аналізу оболонок, що дозволяє враховувати складну геометрію, нелінійність та неоднорідність матеріалу [6, 7]. Однак його застосування у задачах багатокритеріальної оптимізації супроводжується значними обчислювальними витратами.

Мета роботи. Метою роботи є формування підходу до багатокритеріальної параметричної оптимізації стійкості алюмінієвих оболонок при дії термосилового навантаження з урахуванням геометричної нелінійності.

Виклад основного матеріалу. У рамках дослідження розглядається задача багатокритеріальної параметричної оптимізації алюмінієвих оболонок з урахуванням геометричної нелінійності та термосилового навантаження. В якості змінних параметрів приймаються геометричні характеристики конструкції, зокрема товщина оболонки, радіус кривизни та відношення основних розмірів.

Задача оптимізації формулюється у вигляді:

$$\min_{x \in X}(f_1(x), f_2(x)) \tag{1}$$

де $f_1(x)$ — маса конструкції,

$f_2(x)$ — критичне навантаження втрати стійкості.

При обмеженнях:

$$g_i(x) \le 0, i = 1,..., m \tag{2}$$

де $g_i(x)$ включають умови міцності, жорсткості та допустимих переміщень.

Надійним теоретичним фундаментом для розв'язання поставленої задачі слугують варіаційні принципи будівельної механіки [5]. Оскільки аналітичне розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь для оболонок Гаусової кривизни є вкрай складним, базовим інструментом обрано метод скінченних елементів (МСЕ), класичні [6] та нелінійні [7] процедури якого дозволяють з високою точністю відстежувати процеси деформування. Для задоволення вимог міцності при мінімальній масі конструкції у роботі пропонується застосувати методи параметричної оптимізації. Слід зазначити, що подібні алгоритми, зокрема модифікований метод проєкції градієнта, вже довели свою високу ефективність при багатокритеріальному розрахунку стрижневих металевих конструкцій [3], що відкриває перспективи їх адаптації для просторових алюмінієвих систем.

Для визначення напружено-деформованого стану оболонок використовується метод скінченних елементів. Розрахункова модель формується у програмному комплексі Femap with Nastran з використанням оболонкових скінченних елементів, що дозволяє адекватно описати просторову роботу конструкції.

Нелінійна постановка задачі враховує геометричну нелінійність, що проявляється у вигляді великих переміщень і зміни конфігурації конструкції. В загальному вигляді рівняння рівноваги має вигляд:

$$K(u)u = F \tag{3}$$

де матриця жорсткості K залежить від переміщень.

Для нелінійної задачі вводиться рівняння нев’язки:

$$R(u) = K(u)u - F = 0 \tag{4}$$

Розв’язання виконується ітераційним методом Ньютона–Рафсона:

$$u_{n+1} = u_n - K^{-1}(u_n)R(u_n) \tag{5}$$

Термосилове навантаження враховується як суперпозиція механічних і температурних впливів:

$$F = F_{mech} + F_{temp} \tag{6}$$

Температурні деформації визначаються залежністю:

$$\varepsilon_T = \alpha \Delta T \tag{7}$$

де α — коефіцієнт лінійного розширення матеріалу.

Параметрична оптимізація реалізується шляхом варіювання геометричних параметрів конструкції з наступним чисельним аналізом кожного варіанта. У результаті формується множина Парето-ефективних рішень, що дозволяє оцінити компроміс між масою конструкції та її стійкістю.

Отримані залежності дають можливість визначити раціональні параметри оболонок та підвищити ефективність їх проєктування при забезпеченні необхідного рівня надійності [12-13].

Висновки. Проведений аналіз сучасного стану проблеми підтверджує, що алюмінієві оболонки є ефективними просторовими системами, проте їхнє проєктування суттєво ускладнюється високою чутливістю до втрати стійкості в умовах геометричної нелінійності та термосилових впливів. Огляд існуючих методик показав, що хоча метод скінченних елементів є базовим інструментом розрахунку, його пряме застосування для багатокритеріальної оптимізації супроводжується надмірними обчислювальними витратами. На основі цього сформульовано наукову задачу для подальших досліджень: розробка комплексних чисельних моделей деформування оболонок Гаусової кривизни з впровадженням апроксимаційних метамоделей (поверхонь відгуку). Такий підхід дозволить подолати обчислювальні обмеження та суттєво прискорити пошук раціональних параметрів, забезпечуючи компроміс між матеріаломісткістю та надійністю конструкції.

Список використаних джерел

1. Veres, C., & Tănase, M. (2025). Sustainable shell structures: A bibliometric and critical review of buckling behavior and material-efficient design strategies. *Applied Sciences*, 15(17), 9394. https://doi.org/10.3390/app15179394
2. Harutyunyan, D. (2016). Gaussian curvature as an identifier of shell rigidity. *arXiv*: 1606.03613 https://arxiv.org/abs/1606.03613
3. Peleshko, I. D., & Yurchenko, V. V. (2021). Parametrychna optymizatsiia metalevykh sterzhnevykh konstruktsii z vykorystanniam modyfikovanoho metodu proektsii hradiienta [Parametric optimization of metal bar structures using a modified gradient projection method]. *Prykladna mekhanika [Applied Mechanics]*, 57(4), 78–95 [in Ukrainian].
4. Kiendl, J. (2011). *Isogeometric analysis and shape optimal design of shell structures* [Doctoral dissertation, Technische Universität München]. TUM Media.
5. Bazhenov, V. A. (2014). *Variatsiini osnovy budivelnoi mekhaniky: Pidruchnyk [Variational foundations of structural mechanics: Textbook]*. Kyiv: Karavela [in Ukrainian].
6. Bathe, K. J. (2014). *Finite element procedures* (2nd ed.). Klaus-Jürgen Bathe.
7. Crisfield, M. A. (1991). *Non-linear finite element analysis of solids and structures, Vol. 1: Essentials*. John Wiley & Sons.
8. Bazhenov, V. A., & Kryvenko, O. P. (2020). *Stiikist ta kolyvannia pruzhnykh neodnooridnykh obolonok pry termosylovykh navantazhenniakh [Buckling and vibrations of elastic inhomogeneous shells under thermomechanical loads]*. Kyiv: Karavela [in Ukrainian].
9. Timoshenko, S. P., & Gere, J. M. (1961). *Theory of elastic stability* (2nd ed.). McGraw-Hill.
10. European Committee for Standardization. (2007). *Eurocode 9*: *Design of aluminium structures — Part 1-5: Shell structures* (EN 1999-1-5:2007).
11. Koiter, W. T. (1945). *On the stability of elastic equilibrium* [Doctoral dissertation, Delft University of Technology].
12. Іванченко Г.М., Кошевий О.О., Кошевий О.П., Григор'єва Л.О. (2023). Чисельне дослідження параметричної оптимізації вимушених частот коливання оболонки мінімальної поверхні на трапецевидному контурі при термосиловому навантаженні. *Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірник*, Вип. 110. С. 430-446.
13. Іванченко Г.М., Кошевий О.О. (2025). Параметрична оптимізація стійкості і ваги оболонки мінімальної поверхні з урахуванням геометричної нелінійності при термосиловому навантаженні. *Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірник*, Вип. 115, С. 231-243.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ТОНКОСТІННИХ ОБОЛОНОК В УМОВАХ ТЕМПЕРАТУРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Олександр Кошевий, доктор філософії, доцент, доцент кафедри теоретичної механіки[1] (ORCID: 0000-0002-1903-2905);
Микола Йовко, аспірант кафедр опору матеріалів [1] (ORCID: 0009-0001-0582-4389);
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. *Робота присвячена проблемі параметричної оптимізації маси тонкостінних оболонкових конструкцій, які експлуатуються в умовах інтенсивних температурних впливів. Проведено аналіз напружено-деформованого стану защемленої циліндричної оболонки, доведено наявність фізичного противоріччя, яке виникає через те, що нарощування товщини стінки підвищує загальну стійкість конструкції, але в той же час провокує лінійне зростання термічних зусиль самонапруження у вузлах з'єднання, що призводить до перевищення межі текучості матеріалу. Обґрунтовано необхідність переходу від простої геометричної оптимізації до оптимізації фізикомеханічних характеристик матеріалу, тобто в першу чергу, модуля пружності та коефіцієнту температурного розширення. Надано переконливі фактори, які свідчать про те, що такий підхід дозволяє кардинально знизити пікові напруження, повертаючи систему в безпечну зону пружної роботи без необґрунтованого нарощування її маси.*

Ключові слова: *Тонкостінна оболонка; температурні напруження; параметрична оптимізація; крайовий ефект; зусилля самонапруження; стійкість конструкцій; метод скінченних елементів; оптимальне проектування; напруженням по Мізесу.*

Вступ. Будівельні конструкції в галузі енергетики часто представляють собою тонкостінні оболонки, такі як резервуари для палива, або ж сильнонагрівні елементи промислових установок, головною особливістю роботи яких є постійний, значний вплив високих температур. При нагріванні, матеріал прямує до розширення, але конструкційні зв'язки жорсткого защемлення чинять опір цьому процесу і в результаті цього супротиву всередині конструкції виникають значні самонапружені зусилля. Традиційно, такі об'єкти зміцнюються інженерами через збільшення товщини стінок, втім для випадків, в яких температурний вплив є головуючим, використання такого підходу створює проблему, адже збільшення товщини поперечного перерізу підвищує опір розширенню, що призводить до ще більшого зростання внутрішніх напружень. Ця суперечність робить задачу пошуку оптимальної ваги та структури надзвичайно актуальною [4, 9].

Аналіз літературних джерел. Питання оптимального проектування конструкцій при силових, механічних навантаженнях наразі досліджене дуже детально, адже наприклад, в працях В.О. Баженова та інших науковців КНУБА розроблено потужні методи комп'ютерного моделювання для таких задач [3, 8], але якщо розглянути поєднання механіки та температури, ситуація ускладнюється значним чином. До прикладу, Н.В. Сметанкіна вказала на те, що стійкість оболонок при нагріві залежить не лише від товщини, а й від швидкості зміни температури [2], а також, існують дослідження, які пропонують оптимізовувати форму самої поверхні оболонки для кращого розподілу зусиль [1, 10]. В той же час, аналіз показує, що часто ігнорується можливість впливу на процес і результат оптимізації через вибір самого матеріалу, зосереджуючи увагу виключно на геометрії стінок [5, 6].

Мета роботи. Дослідження впливу фізичних властивостей матеріалу на напруження в оболонках при потужному нагріві і збільшення потенціалу доведення припущення про те, що правильний підбір характеристик матеріалу в частних випадках є ефективнішим методом оптимізації ваги, ніж маніпулювання товщиною стінок.

Матеріали і методи. Робота будь якої тонкостінної оболонки під дією навантажень описується через сумарні напруження, які складаються з напружень від тиску рідини всередині та напружень, які викликані температурою:

$$\sigma_{total} = \sigma_p + \sigma_t \leq \gamma_c R_y \quad (1)$$

де σ_p є напруженням від тиску, а σ_t є термічною складовою. Для замкнених систем термічні напруження можна виразити через формулу:

$$\sigma_t = \frac{E*\alpha*\Delta T}{1-v} \quad (2)$$

де E є модулем пружності, α є коефіцієнтом лінійного розширення, v - коефіцієнт Пуассона, а ΔT є показником зміни температури. Важливо відмітити, що наведена вище формула не включає товщину стінки, що показує, що при нагріві, напруження визначаються жорсткістю самого матеріалу та його здатністю до розширення. З іншого боку, повинна виконуватись умова забезпечення стійкості оболонки, щоб вона не зім'ялась під дією навантажень і критичне напруження, при якому це може статись, описується так:

$$\sigma_{cr} = C * E * \frac{h}{R} \quad (3)$$

де h є товщиною стінки, а R є радіусом, де і виникає головний конфлікт, адже збільшення h викликає підвищення σ_{cr}, що означає підвищення стійкості конструкції, втім також збільшується загальна жорсткість споруди, що у вузлах з'єднання призводить до різкого стрибку термічних зусиль.

На рисунку візуалізовано описаний конфлікт і точка перетину кривих чітко демонструє мінімальну необхідну товщину для забезпечення стійкості при $h \approx 4{,}7$ мм, проте також графік показує, що на всьому досліджуваному діапазоні товщин, крива максимальних термічних напружень σ_{max} знаходиться вище межі текучості для стандартних конструкційних стальних матеріалів. Це доводить, що для даної статично невизначуваної системи досягти умов міцності виключно геометричними змінами неможливо.

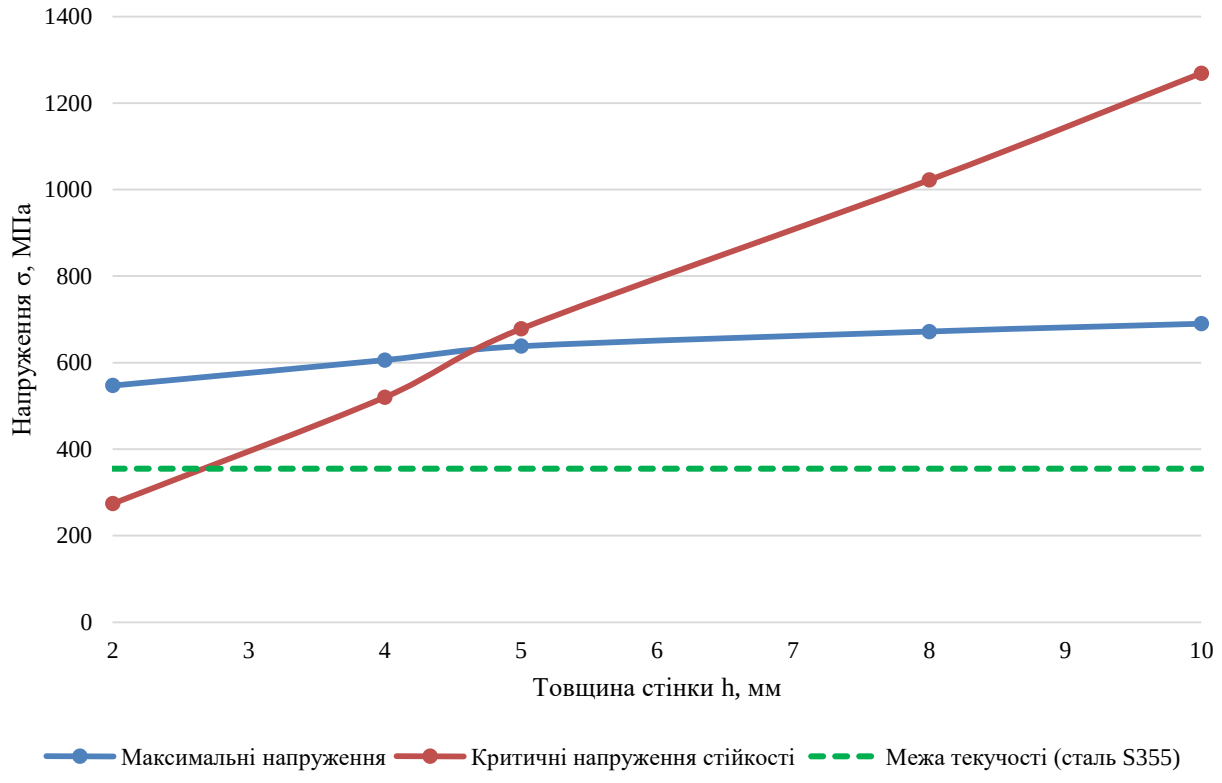


Рис. 1. Залежність напружень від товщини стінки циліндричної оболонки

Параметрична оптимізація ваги $W = 2\pi R * L * h * \rho$ зазвичай явно фокусується на мінімізації h, проте проведений аналіз показує, що при високих температурах, коли температурний вплив є головуючим чинником, вигідніше зменшувати добуток $E * \alpha$. Якщо обрати матеріал, який має менший показник температурного розширення, або ж має меншу жорсткість при тій самий міцності, стінки можна залишити більш тонкими, що дозволить уникнути значних зусиль у місцях виникнення крайового ефекту, де стінка з'єднується з дном резервуару.

Для підтвердження цієї тези доцільно порівняти напружено-деформований стан зони крайового ефекту при використанні традиційної сталі та альтернативних матеріалів, з іншими фізико-температурними властивостями, які будуть мати інший коефіцієнт лінійного розширення та модуль пружності.

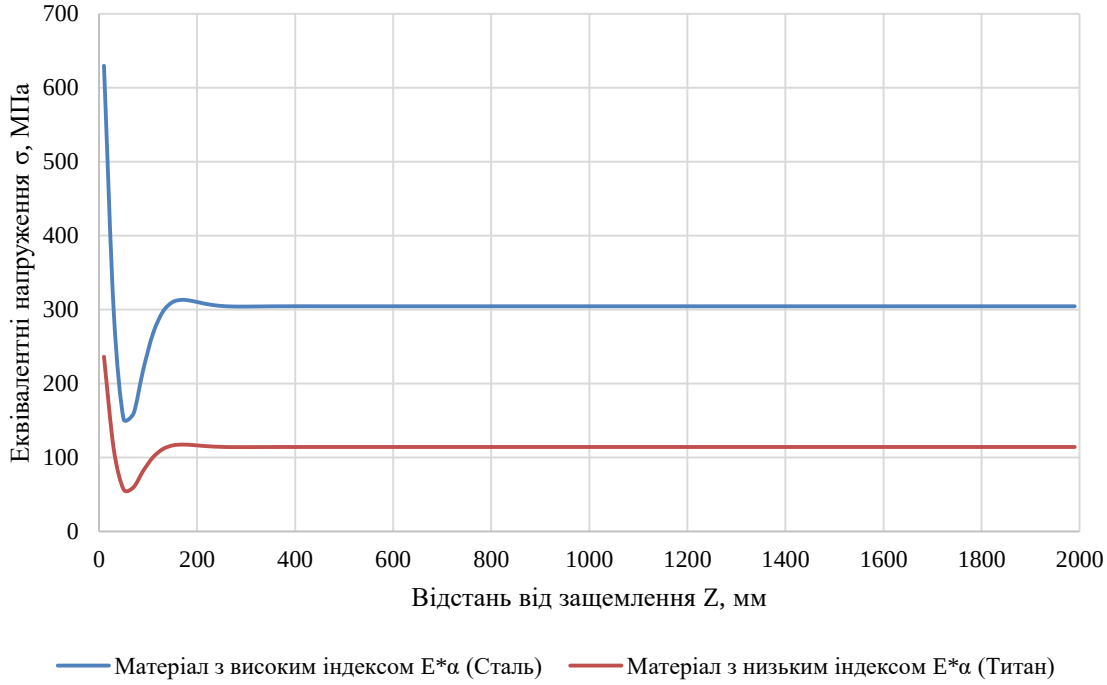


Рис. 2. Розподіл еквівалентних термічних напружень уздовж твірної циліндричної оболонки для різних матеріалів

Як видно з представлених епюр, перехід до матеріалу з нижчим індексом термічної напруженості дозволяє кардинально знизити пікові напруження у вузлах защемлення, повертаючи конструкцію з зону пружної роботи без необхідності збільшення її маси. У базовому варіанті з використанням сталі, максимальні напруження сягають ~630 МПа, що майже вдвічі перевищує межу текучості матеріалу (355 МПа для сталі марки S355) та свідчить про неминуче руйнування конструкції. Використання ж титанового сплаву не лише зменшує пікові зусилля до показника на рівні ~236 МПа, але й гарантує значний запас міцності, оскільки межа текучості такого сплаву перевищує 800 МПа, завдяки чому конструкція повертається в зону пружної роботи без необхідності збільшення її маси.

Таким чином, у задачах по оптимізації оболонок, які пра цюють під дією теплового навантаження, вибір правильного матеріалу стає першим і потенційно найбільш важливим етапом оптимізаційного процесу і розуміння цього явища дозволяє проектувати більш легкі конструкції, які не борються з власними температурними розширеннями, а адаптуються до них на рівні матеріалу.

Обговорення. Отримані результати підтверджують нелінійний характер взаємозв'язку між жорсткістю та термічною напруженістю оболонкових систем і традиційні алгоритми автоматизованого проектування, сфокусовані на мінімізації ваги шляхом зміни довжини поперечних перерізів при зовнішніх силових навантаженнях, видають часто хибні, або навіть небезпечні результати в умовах домінуючого температурного нагріву. Ефективна параметрична оптимізація в таких задачах повинна здійснюватися як багатокритеріальна, де першим параметром виступає індекс температурного розширення матеріалу, а товщина стінки оптимізується лише на другому етапі для забезпечення місцевої стійкості.

Висновки. Було встановлено, що при проектуванні гарячих оболонок використання традиційного підходу до оптимізації ваги через утворення локально потовщених секторів часто не є ефективним конструкторським рішенням, так як збільшення товщини хоч і підвищує локальну

стійкість, проте провокує зростання глобальних температурних напружень і найбільш раціонально обгрунтованим шляхом оптимізації є варіювання параметрів матеріалу на першому оптимізаційному єтапі, зокрема зниження коефіцієнту теплового розширення, що дозволяє створювати конструкції, які є одночасно легкими та надійними в екстремальних температурних умовах.

Список використаних джерел

1. Ivanchenko, H. M., Koshevyi, O. O., Koshevyi, O. P., & Hryhorieva, L. O. (2023). Chyselne doslidzhennia parametrychnoi optymizatsii vymushenykh chastot kolyvannia obolonky minimalnoi poverkhni na trapetsevydnomu konturi pry termosylovomu navantazhenni [Numerical study of parametric optimization of forced vibration frequencies of a minimal surface shell on a trapezoidal contour under thermomechanical loading]. Opir materialiv i teoriia sporud, 110, 430–446. [in Ukrainian].
2. Smetankina, N. V., Misiura, I., & Misiura, S. (2025). Stability of hollow shells of linearly variable thickness under thermal loads. Computer Modeling and Optimization of Complex Systems, 12–14.
3. Bazhenov, V. O., Perelmuter, A. V., & Shyshov, O. V. (2009). Budivelna mekhanika. Kompiuterni tekhnolohii [Structural mechanics. Computer technologies]. Kyiv: Karavela. [in Ukrainian].
4. Nazarenko, I. I. (1999). Mashini dlia vyrobnytstva budivel′nykh materialiv: Pidruchnyk [Machines for the production of building materials: Textbook]. Kyiv: KNUCA. [in Ukrainian].
5. Piskunov, S. O., & Fedorenko, T. M. (2018). Rozrakhunok tonkostinnykh prostorovykh konstruktsii na temperaturni vplyvy [Calculation of thin-walled spatial structures for temperature effects]. Zbirnyk naukovykh prats UkrDUZT [Collection of scientific works of UkrSURT], 175, 45–52. [in Ukrainian].
6. Grigorenko, Ya. M., & Pankratova, N. D. (1982). Vychislitel'nye metody v zadachakh teorii uprugosti neodnorodnykh tel [Computational methods in problems of the theory of elasticity of inhomogeneous bodies]. Kiev: Naukova dumka. [in Russian].
7. Pedchenko, L. O., & Pedchenko, M. M. (2022). Increasing the thermal resistance of shell gas-support structures. Technology Audit and Production Reserves, 3(1), 27–33.
8. Huliaiev, V. I., Bazhenov, V. O., & Lizunov, P. P. (1987). Optymalne proektuvannia konstruktsii [Optimal design of structures]. Kyiv: Vyshcha shkola. [in Ukrainian].
9. Pisarenko, H. S., Kvitka, O. L., & Umanskyi, E. S. (2004). Opir materialiv [Resistance of materials]. Kyiv: Vyshcha shkola. [in Ukrainian].
10. Ivanchenko, H. M., & Koshevyi, O. O. (2025). Parametrychna optymizatsiia stiikosti i vahy obolonky minimalnoi poverkhni z urakhuvanniam heometrychnoi neliniinosti pry termosylovomu navantazhenni [Parametric optimization of stability and weight of a minimal surface shell considering geometric nonlinearity under thermomechanical loading]. Opir materialiv i teoriia sporud, 115, 231–243. [in Ukrainian].

ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ СТІЙКОСТІ І ВАГИ ОБОЛОНКИ МІНІМАЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ З УРАХУВАННЯМ ГЕОМЕТРИЧНОЇ НЕЛІНІЙНОСТІ ПРИ СИЛОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Олександр Кошевий, д-р філософії (Ph.D.), доцент кафедри теоретичної механіки[1] (ORCID: 0000-0002-1903-2905),
Артур Смоленський, аспірант кафедри опору матеріалів[1] (ORCID: 0000-0001-5464-5064),
[1]Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. *В даній науковій роботі розглядається багатокритеріальна параметрична оптимізація тонкостінної оболонки мінімальної поверхні. Основними цільовими функціями обрано мінімізацію власної ваги конструкції при забезпеченні найменш можливого коефіцієнту запасу стійкості при впливі зовнішніх силових навантажень. В якості додаткових умов розрахунок виконано ітераційним способом з врахуванням геометричної нелінійності, що дозволяє врахувати ефект деформацій на кожному підході на загальний напружено-деформований стан. Чисельне дослідження проводиться методом скінченних елементів в розрахунковому комплексі Femap with Nastran. Результат дослідження дає можливість оцінити коефіцієнти запасу стійкості при заданих навантаженнях та візуалізувати розподіл оптимальної товщини в скінченних елементах оболонки.*

Ключові слова: *оптимізація, параметрична оптимізація, багатокритеріальна оптимізація, оптимізація цільової функції, змінні проектування, обмеження, оболонки мінімальних поверхонь, геометрична нелінійність, метод скінченних елементів, оптимальне проектування.*

Вступ. Оптимальне проектування є важливим елементом в проектуванні та розрахунку будівельних конструкцій. Цей етап проектування досить рідко використовується на практиці інженерами в області механічного опору та стійкості через складність в одночасному опрацюванні великої кількості параметрів, тому досить актуальним є питанням розробки математичних методів для пошуку найкращого рішення. Активний розвиток розрахункових програмних комплексів на основі методу скінченних елементів дозволяють значно прискорити розрахунковий етап проектування та в стислі терміни опрацювати декілька варіантів конструкцій, а такі як Femap with Nastran та Ansys навіть мають спеціальний розроблений модуль, що дозволяє виконати автоматизовану оптимізацію на основі заданих параметрів. [1]

Об’єктом дослідження виступають тонкостінні оболонки мінімальних поверхонь. Суть цих просторових конструкцій полягає в унікальності їх поверхні, яка була оптимізована за допомогою методу продовження по параметру, який базується на визначеному контурі та висоті майбутньої оболонки мінімальної поверхні. Після інтегрування виводиться оптимальна форма для майбутньої конструкції, яка має мінімальну площу та мінімальні внутрішні зусилля, які компенсує геометрична форма тонкостінної оболонки мінімальної поверхні [2].

Основним елементами оптимізації є а) цільова функція - мета оптимізаційного розрахунку, наприклад мінімальна вага конструкцій, напруження на межі допустимих, або максимальні допустимі переміщення. б) змінні проектування - геометричні характеристики конструкції, такі як товщина оболонки, форма поперечного перерізу балки, моменти інерції, моменти опору, площа та ін. ; в) обмеження або ліміти - ключовий елемент, під який підлаштовуються змінні проектування в результаті оптимізації. (вага, напруження, коефіцієнт запасу стійкості, форми коливань та ін.) Обмежень може бути один або декілька в рамках одного чисельного експерименту.

Багатокритеріальною параметрична оптимізація вважається лише тоді, коли є дві і більше цільових функції, на яких можуть знаходити точки оптимуму, що є фактично перетин цих двох цільових функцій. По Паррету, вони можуть бути незалежними один від одного, давати синергію, або конфліктувати [3].

Аналіз літературних джерел. В джерелі [4] дані основні параметри матриці жорсткості скінченно-елементної моделі з урахуванням геометричної нелінійності для оболонки мінімальної

поверхні та система розв'язуючих рівнянь з урахуванням геометричної нелінійності оболонки мінімальної поверхні методом скінченних елементів [5]. Аналіз чутливості реакцій конструкцій на зміну змінних проектування наведено в [6].

Мета роботи. Дослідження багатокритеріальної параметричної оптимізації оболонки мінімальної поверхні з урахуванням геометричної нелінійності з використанням чисельної моделі конструкції.

Матеріали і методи. Для дослідження багатокритеріальної параметричної оптимізації оболонки мінімальної поверхні з урахуванням геометричної нелінійності створюється чисельна модель конструкції в середовищі розрахункового комплексу Femap with Nastran. Скінченно-елементна модель побудована з пластинчастих скінченних елементів типу plate, які представлені в розрахунковому комплексі Femap with Nastran і їхня робота відповідає теоретичним відомостям, які вказані вище. Закріплення до жорсткого диску землі відбувається по двом сторонам, де накладаються жорсткі в'язі по трьом поступальним напрямкам і трьох кутах повороту. Навантаження прикладаються від власної ваги та зовнішнє рівномірно-розподілене по площі пластин. Розрахункова модель зображена на рис. 1

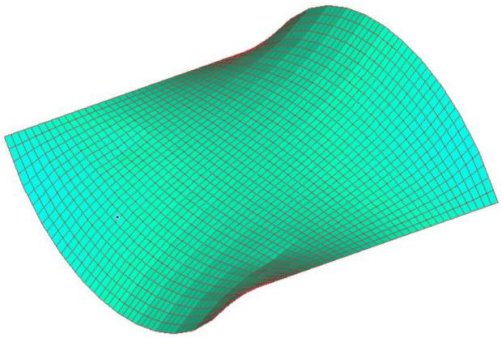


Рис.1. Скінченно-елементна модель оболонки

Виклад основного матеріалу. Для налаштування чисельного дослідження багатокритеріальної параметричної оптимізації вводяться необхідні параметри: а) цільова функція – вага конструкції та коефіцієнт запасу стійкості λ; б) змінні проектування – товщина оболонки від 1 до 200 мм; в) обмеження - розрахунковий опір сталі на розтяг Ry=260 МПа, коефіцієнт запасу стійкості $1.1 \geq \lambda \geq 1$, які забезпечують максимальне використання матеріалу без надлишкових запасів.

Врахування геометричної нелінійності відбувається через нелінійний розрахунок Buckling, який відповідає за стійкість в геометричній нелінійній постановці, за допомогою якого при кожній ітерації відбувається перенесення дійсних вузлових переміщень на оболонку за допомогою напруженодеформованого стану.

В результаті проведеного розрахунку можна дослідити напружено-деформований стан оболонки мінімальної поверхні з квадратним планом, який складається з двох прямих ліній і двох півкіл, форми втрати стійкості та коефіцієнти запасу стійкості при заданих навантаженнях.

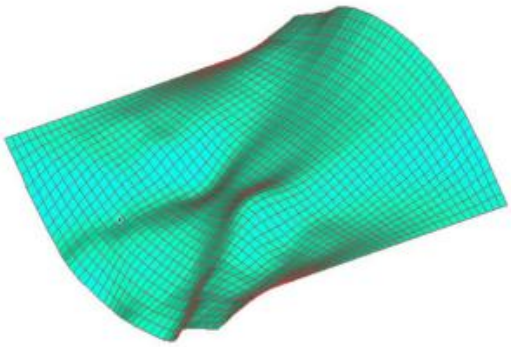


Рис.2. 1-ша форма втрати стійкості

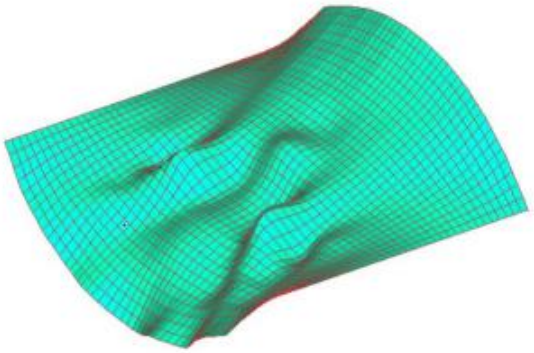


Рис.3. 2-га форма втрати стійкості

Висновки. Отримані результати оптимальної товщини пластин відображаються у вигляді графічної мозаїки скінченно-елементної сітки, яка показує оптимальну товщину пластин в кожному окрмемому скінченному елементі досліджуваної оболонки. Подальше додаткове опрацювання, що включає уніфікацію отриманих значень та внесенні відповідних корегувань в розрахункову модель дозволяє виконати повторний розрахунок. Це дасть можливість більш точно дослідити фактичний напружено-деформований стан конструкції, обчислити підсумкову вагу та оцінити ефект від оптимізації для досягнення матеріальної економічності.

Список використаних джерел

1. Ivanchenko, H. M., Koshevyi, O. O., & Koshevyi, O. P. (2022). Chyselna realizatsiia bahatokryterialnoi parametrychnoi optymizatsii obolonky minimalnoi poverkhni na kvadratnomu konturi pry termosylovomu navantazhenni [Numerical implementation of multicriteria parametric optimization of a minimal surface shell on a square contour under thermomechanical loading]. Opir materialiv i teoriia sporud, 109, 50–65. [in Ukrainian].
2. Koshevyi, O. O. (2019). Optymalne proektuvannia tsylindrychnykh rezervuariv z zhorstkymy obolonkamy pokryttia [Optimal design of cylindrical tanks with rigid shell coverings]. Opir materialiv i teoriia sporud, 103, 253–265. [in Ukrainian].
3. Lizunov, P. P., Lukianchenko, O. O., Palii, O. M., & Kostina, O. V. (2024). Vlasni chastoty i formy parametrychnykh kolyvan obolonky rezervuaru z nedoskonalostiamy formy [Natural frequencies and forms of parametric oscillations of a tank shell with shape imperfections]. Opir materialiv i teoriia sporud, 112, 58–66. [in Ukrainian].
4. Koshevoi, A. P. (1991). Ustoichyvost plastyn y obolochek slozhnoi formy [Stability of plates and shells of complex shape]. Soprotyvlenye materyalov i teoryia sooruzhenyi, 59, 65–71. [in Russian].
5. Peleshko, I. D., Lisotskyi, R. V., & Baluk, I. M. (2010). Optymalne proektuvannia stalevoi stryzhnevoi konstruktsii pokryttia torhovorozvazhalnoho kompleksu [Optimal design of a steel bar structure for the covering of a shopping and entertainment complex]. Zbirnyk naukovykh prats UkrNDIPSK im. V. M. Shymanovskoho, 5, 181–191. [in Ukrainian].
6. Cheung Y. K. (1997). The Finite Strip Method. Them. *Boca Raton*, 416.
7. Bazenov V.A., Gaidaichuk V.V., Koshevoy A.P. (1993). Stability of multiply connected ribbed shells and platesin a magnetic field. *Journal of Soviet Mathematics*, 66(6), 2631–2636.
8. Sakharov A.S., Kyslookyi V.N., Kyrychevskyi V.V., Altenbakh Y., Habbert U., Dankert Yu., Keppler Kh., Kochyk Z. (1982). Metod konechnyh elementov v mehanike tverdyh tel [Finite element method in solid mechanics]. Kyiv: Vyshcha shkola. [In Russian].
9. Hotsuliak, Ye. O., Koshevyi, O. P., & Morskov, Yu. A. (2001). Chyselne modeliuvannia obolonok, utvorenykh minimalnymy poverkhniamy [Numerical modeling of shells formed by minimal surfaces]. Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika, 69, 47–51. [in Ukrainian].

ІДЕАЛІЗОВАНА МОДЕЛЬ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗОНИ ФАКТИЧНОГО КОНТАКТА ГЕТЕРАГЕННИХ МАТЕРІАЛІВ НА ПРИКЛАДІ БЕТОНУ

Єгор Волков,аспірант[1],
Сергій Ільїн, к.т.н.,доцент[1],
[1] Запорізький національний університет,96011,Україна

АНОТАЦІЯ. *Розглядається модель механізму організації структури гетерогенних матеріалів на прикладі бетону на рівні структурної неоднорідності типу матриця-заповнювачі; механізм виникнення контактної взаємодії поверхонь як початкова стадія утворення і розвитку технологічних та експлуатаційних тріщин у бетоні на мікроструктурному рівні. Запропоновано модель механізму дії статичних та механічних характеристик поведінки складових гетерогенного матеріалу при взаємному переміщенні точок і поверхонь фактичного контакту твердих включень наповнювачів на мікрорівні. Отримано розрахункові формули дозволяють визначати динамічні характеристики контактування матеріалів у зоні фактичного контакту різної геометрії: площина, опукла та увігнута поверхні.Отримані результати є першим етапом подальшого теоретичного та експериментального дослідження візуального моніторингу утворення мікротріщин бетонних виробів.*

Ключові слова: *бетон; фактичний контакт поверхонь; модельна схема; наповнювачі; статичні і динамічні характеристики; рух поверхонь*

Вступ. Використання фракційного складу каркасу бетону спрямовується на мінімальну пустотність суміші зерен різної розмірності. Гранулометрія наповнювачів витікає з геометричних закономірностей укладання зернистих матеріалів при оптимальних співвідношеннях компонентів.

У якості дрібного заповнювача бетонного тіста може слугувати річний пісок, кварцові піски після виробництва каоліну, пісок при розробці яруг, грануловані домішки відходів металургійного виробництва, порошкової металургії при в'яжучому матеріалі – цементі.

Аналіз літературних джерел. Модуль крупності дрібних наповнювачів може коливатись у межах від 0,07 до 3,33 одиниць. Добавки, що гальмують тужавіння цементного тіста, адсорбуються тонкими шарами на зернах в'яжучого, а також процесів коагуляції і зближення зерен цементу і його гідратних утворень. Такі добавки не тільки слугують регуляторами реологічних властивостей бетонних сумішей, а й суттєво впливають на фізико-механічні і інші експлуатаційні властивості бетону. Зменшення пустотності заповнювачів впливає на підвищення якості бетонної суміші та техніко-економічні показники бетонних виробів. Раціонально укладена бетонна суміш призводить до зменшення пустотності з 29-38% до 18% [1].

Автор [2] вказує на наявність у спеціальних бетонах остаточних технологічних тріщин, наприклад, шириною d = 0,386…0,421 мкм з довжиною, що значно у 8…14 разів перевищує ширину, яка в лабораторних умовах може вимірюватися методом рентгеноскопії [1].

Мета роботи. Тверді матеріали контактують між собою точково на макрорівні. Розгляд контакту на мікрорівні показує, що фактичний контакт у процесі експлуатації або при навантаженні зовнішньою силою з точки перетворюється у деяку елементарну площину, яка становить пласку, випуклу або увігнуту поверхню. Змоделюємо цей процес і розрахуємо статичні і динамічні параметри у точці контакту та площі фактичного контакту навколо неї.

На цьому припущенні побудована дана модель.

Виклад основного матеріалу. Якщо при дії точкової сили на площину динамічні характеристики процесів переміщення досить прості (рис. 1), то при контактуванні із опуклою або увігнутою поверхнями переміщення мають місце певні складнощі. Далі розглянемо модельні схеми усіх можливих випадків контактування (рис.1,2).

Динамічні характеристики контактування зведено у табл.1.

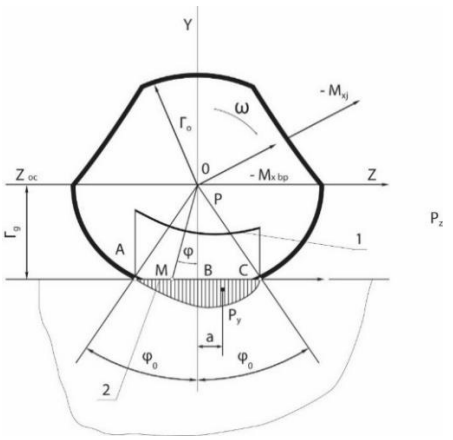


Рис. 1. Розрахункова схема моделі фактичного контакта частки заповнювача з площиною
1 – епюра розподілу сил зсуву в зоні фактичного контакту тіл на периферії після тривалої експлуатації; 2 – епюра розподілу сил нормальних реакцій на площині зони фактичного контакту

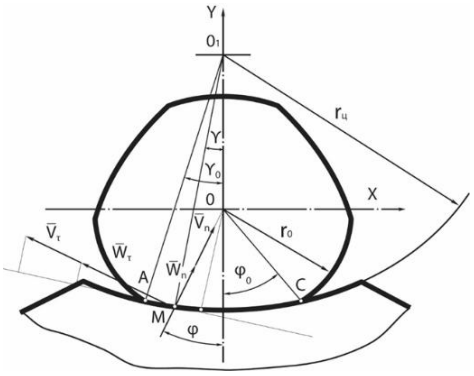


Рис. 2. Розрахункова схема контактування моделі фактичного контакта з увігнутою поверхнею

На рис.1 та 2 зображені розрахункові схеми динамічних параметрів, що діють на фактичний контакт із площиною і увігнутою поверхнею впродовж експлуатації. Для зручності користування та стислості викладення зведемо отримані результати в табл.1.

Таблиця 1

Динамічні характеристики моделі контактування у зоні фактичного контакту з площиною і опуклою поверхнею

Динамічні характеристики	**Форма поверхні фактичного контакту**	
	Площина	**Увігнута поверхня**
Радіус-вектор частки контакту, r	r_g/ cosφ	$\sqrt{R_ц^2 - (R_ц - r_g)^2 sin^2\varphi}$-($R_ц - r_g$)cosφ
Тангенційна складова швидкості зсуву, V_τ	rω / cosφ	ωr (φ)
Нормальна складова швидкості зсуву, V_n	$\frac{r_g\,\omega}{cos^2\varphi}$ sinφ	$\left[\frac{(R_ц - r_g)^2 sin\varphi cos\varphi}{\sqrt{R_ц^2 - (R_ц - r_g)^2 sin^2\varphi}} - (R_ц - r_g) sin\varphi\right]\omega$

Продовження табл.1

Прискорення зсуву тангенціальне, W_τ	$\frac{r_g\omega^2}{cos^2\varphi}$ sinφ	$\left[\frac{(R_ц-r_д)^2 sin\varphi cos\varphi}{\sqrt{R_ц^2-(R_ц-r_д)^2 sin^2\varphi}} - (R_ц - r_д)sin\varphi\right]\omega^2$
Прискорення зсуву нормальне, Wn	$\omega r_g^2 \times$ $\times \frac{(1+sin^2\varphi)}{cos^3\varphi}$	$\dot{V}_n$
Швидкість зсуву точки контакту, Vм	Vτ cosφ + +Vn sinφ	$V_\tau$sin(φ-γ) + $V_n$cos(φ-γ)
Прискорення зсуву точки контакту, Wм	$W_\tau cos\varphi$ $+ W_n sin\varphi$	$W_\tau$sin(φ-γ) + $W_n$cos(φ-γ)
Кут зсуву від лінії центрів під дією сили P у зоні контакту, γ	0	arcsin $\left\{\left[sin\varphi\sqrt{\frac{R_ц^2-(R_ц-r_g)^2 sin^2\varphi}{R_ц}} - \frac{(R_ц-r_g)cos\varphi}{R_ц}\right]\right\}$

З геометричної точки зору схема динамічних характеристик моделі фактичного контакту матеріалів з опуклою поверхнею є дзеркальним відображенням контакту з увігнутою поверхнею. Але з математичної точки зору схема набуває іншого виду через тригонометричні константи кутів, які приймаються у розрахунках. Тому результати розрахунків отримуємо суттєво різними. Результати експериментальних досліджень опробовані нами та викладені у [3].

Висновки. Отже, ідеалізована модель здійснення механічних процесів на площині фактичного контакту, на нашу думку, коректно віддзеркалює стан середовища і може бути прийнята для подальшого розгляду експериментальної перевірки моменту руйнації матеріалу на початковій стадії. Тому динамічні характеристики розглядаються окремо.

Розроблена ідеалізована модель механічного контакту та кінематичних характеристик зони фактичного контактування твердих матеріалів різного ступеня гетерогенності з зрізною кривизною поверхонь, яка моделює найбільш зручні для експериментальної перевірки види контактування в зоні фактичного контакту гетерогенних матеріалів: площина або увігнута поверхня.

Список використаних джерел

1. Cherepanov, G. P. (1997). O rasprostranenii treshchin v sploshnoi srede [On the propagation of cracks in a continuous medium]. Prikladnaia matematika i mekhanika, 31(3), 476–486. [in Russian].
2. Fracturing process of micro-concrete under uniaxial and triaxial compression: in-situ X-CT mechanical tests / Stamati O. et al. Cement and Concrete Research. 2021. Article 106578. DOI: 10.1016/ j.cemconres.2021.106578
3. Volkov, Ye. V., & Ilin, S. V. (2026). Metodyka doslidzhennia trishchynoutvorennia v betonnykh konstruktsiiakh z vykorystanniam holohrafichnoi interferometrii [Methodology for studying crack formation in concrete structures using holographic interferometry]. In Science development in a changing world: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference (pp. 408–413). SPC "Sci-conf.com.ua". URL:https//sci-conf.com.ua/iii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-scientific-development-in-a-changing-world-16-18-03-2026-lviv-ukrayina-arhiv/.

ПІВДЕННОУКРАЇНСЬКА АЕС ЯК ОБ'ЄКТ ПІДВИЩЕННОЇ НЕБЕЗПЕКИ: СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО МОНІТОРИНГУ

Вячеслав Курепін, кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри методики професійного навчання[1],
[1]Миколаївський національний аграрний університет,
Вулиця Георгія Гонгадзе, 9, Миколаїв, Миколаївська область, 54000, Україна

АНОТАЦІЯ. *Розглядається Південноукраїнська АЕС як об'єкт підвищеної небезпеки та аналізуються сучасні підходи до її моніторингу. Окреслено роль атомної електростанції в енергосистемі України та необхідність забезпечення високого рівня безпеки її функціонування. Розкрито поняття техногенних ризиків та можливі наслідки аварійних ситуацій для довкілля та населення, включаючи радіаційне загрязнення та вплив на екологічний стан регіону. Описано систему технічного та екологічного моніторингу, що включає автоматизовані системи контролю, радіаційний нагляд та цифрові технології діагностики, які забезпечують безперервне відстеження стану обладнання. Особливу увагу приділено сучасним методам прогнозування та запобігання аваріям на основі аналізу даних та цифрових технологій. Підкреслено важливість комплексного підходу до безпеки, який поєднує технічні, екологічні та організаційні заходи, а також роль постійного моніторингу у зменшенні ризиків техногенних загроз.*

Ключові слова: *Південноукраїнська АЕС; об'єкт підвищеної небезпеки; моніторинг; радіаційна безпека; техногенні ризики; екологічний контроль.*

Вступ. Атомна енергетика є важливою складовою енергетичної системи України, оскільки забезпечує значну частку виробництва електроенергії та сприяє підтриманню стабільності енергопостачання. Її розвиток дозволяє зменшити залежність держави від традиційних викопних ресурсів, таких як вугілля та природний газ, що має суттєве значення для енергетичної безпеки країни. Використання атомної енергетики сприяє зниженню обсягів викидів парникових газів, що позитивно впливає на стан довкілля та відповідає сучасним екологічним вимогам. Важливою особливістю атомних електростанцій є здатність забезпечувати безперервне виробництво електроенергії, зокрема в періоди підвищеного навантаження на енергосистему, коли інші джерела енергії можуть працювати менш ефективно або бути недостатньо стабільними.

Особливе значення має безпека на об'єктах підвищеної небезпеки, зокрема атомних електростанцій. Порушення їхньої роботи може призвести до серйозних наслідків для довкілля та здоров'я населення [1, с 137]. Аварійна ситуація на атомній електростанції може спричинити радіаційне загрязнення територій, повітря чи води. Саме тому на таких об'єктах впроваджуються багаторівневі системи контролю, моніторингу та аварійного реагування. Це дозволяє своєчасно виявляти відхилення в роботі обладнання, запобігати аваріям та мінімізувати можливі ризики для людей та навколишнього середовища.

Аналіз літературних джерел. Атомні електростанції є ключовим елементом енергетичної системи держави, проте потребують багаторівневого контролю через потенційні техногенні ризики. Автори наукових праць Піндера М.В. [10], Лазіс М.І. [3], Вишневський О.О. [6], наголошують на важливості моніторингу для забезпечення безпечної експлуатації таких об'єктів.

Окрему увагу приділено використанню цифрових технологій, сенсорних мереж та систем прогнозування, що підвищують ефективність управління ризиками. У працях з екологічної тематики Дідняк А.В. [7], Марченко Д.Д. [8], акцентується на необхідності постійного моніторингу стану повітря, води та ґрунтів у зонах впливу атомних електростанцій. У літературних джерелах науковців Зубєхіна-Хайят О. В. [12], Соколюк-Орел Д. А. [13] зазначається важливість міжнародного досвіду у сфері ядерної безпеки, зокрема впровадження стандартів МАГАТЕ, які регламентують вимоги до експлуатації та контролю атомних об'єктів.

Мета роботи. Дослідження Південноукраїнської атомної електростанції як об'єкта підвищеної небезпеки та аналіз сучасних підходів до моніторингу її технічного та екологічного стану. Визначення ролі систем контролю у забезпеченні безпечного функціонування атомної енергетики,

а також на виявлення основних принципів запобігання техногенним ризикам. Окрему увагу приділено оцінці значення комплексного моніторингу для мінімізації можливих аварійних ситуацій та захисту довкілля та населення.

Виклад основного матеріалу. Забезпечення радіаційної безпеки на атомній електростанції неможливо без надійної системи моніторингу. Саме завдяки постійному контролю технічних параметрів, стану обладнання та рівня радіаційного фону забезпечується стабільна та безпечна робота енергоблоків.

Сучасні атомні електростанції, зокрема Південноукраїнська АЕС, здійснюють свою діяльність в умовах постійного автоматизованого моніторингу технологічних процесів [2, с 208]. Функціонування енергоблоків забезпечується складною системою цифрового контролю, в межах якої тисячі датчиків у безперервному режимі передають інформацію щодо температурних параметрів реактора, тиску в контурах охолодження, рівня теплоносія, потужності реакторної установки, а також технічного стану турбінного обладнання, вентиляційних комплексів та систем радіаційного контролю. Отримані дані централізовано надходять до щита управління, де оперативний персонал здійснює їх аналіз у режимі реального часу, що забезпечує своєчасне виявлення можливих відхилень від встановлених нормативних параметрів та дозволяє оперативно приймати необхідні управлінські рішення для підтримання належного рівня ядерної та радіаційної безпеки.

Важливою складовою системи моніторингу Південноукраїнської атомної електростанції є контроль технічного стану обладнання реакторного та турбінного відділень, що забезпечується комплексом сучасних діагностичних засобів. Зокрема, застосовуються системи вібраційного контролю насосного та турбінного обладнання, тепловізійний моніторинг електричних мереж, автоматизовані засоби контролю герметичності трубопроводів, а також безперервний аналіз хімічного складу теплоносія. Відхилення температурних параметрів окремих вузлів або зміни вібраційних характеристик турбогенераторів можуть бути індикаторами зародження технічних несправностей. Своєчасне виявлення таких відхилень дає змогу здійснювати профілактичні та ремонтні заходи до виникнення аварійних ситуацій, що суттєво підвищує рівень безпеки та надійності експлуатації енергоблоку [3, с 13].

На Південноукраїнській АЕС здійснюється активне впровадження цифрових технологій та елементів штучного інтелекту в систему моніторингу, що суттєво підвищує її аналітичні можливості. Спеціалізовані програмні комплекси забезпечують обробку великих обсягів даних, здійснюють прогнозування технічного стану обладнання та сприяють виявленню прихованих ризиків. Завдяки реалізації функцій прогнозної аналітики визначається ймовірність зношування насосного обладнання або перегріву електричних систем задовго до настання критичних відхилень у їх роботі. Застосування таких технологічних рішень набуває особливого значення в умовах підвищених техногенних та воєнних ризиків [4, с 45], коли безперервність моніторингу та оперативність реагування є визначальними факторами безпечної експлуатації енергетичних об'єктів.

На території, прилеглій до Південноукраїнської АЕС, на регулярній основі здійснюється екологічний моніторинг стану довкілля, що охоплює контроль повітряного середовища, водних ресурсів, ґрунтів та рослинності [5, с 147]. Співробітники лабораторії проводять відбір проб води з річок та водойм-охолоджувачів, здійснюють радіологічний аналіз ґрунтів, а також контролюють якість питної води в населених пунктах, розташованих поблизу атомної електростанції. Отримані результати досліджень засвідчують дотримання встановлених екологічних нормативів та сприяють забезпеченню прозорості та відкритості екологічної інформації для населення.

Ефективність системи моніторингу значною мірою зумовлюється рівнем професійної підготовки персоналу, який забезпечує її функціонування. Оператори, інженерно-технічні працівники та фахівці з радіаційного контролю Південноукраїнської АЕС систематично проходять тренування на повномасштабних тренажерних комплексах, що дає змогу відтворювати різні сценарії потенційних надзвичайних ситуацій. У процесі підготовки відпрацьовуються алгоритми дій у випадках втрати електроживлення, відхилення параметрів роботи реакторної установки або порушення функціонування систем охолодження. Така форма навчання забезпечує підтримання

високого рівня готовності персоналу до оперативного реагування та сприяє мінімізації ризиків для працівників, населення та навколишнього природного середовища.

Сучасні підходи до діагностики та контролю технічних та технологічних процесів базуються на комплексному поєднанні цифрових технологій, автоматизованих систем збирання даних та інтелектуальних аналітичних інструментів. Така інтеграція забезпечує підвищення точності вимірювань, оперативності обробки інформації та розширення можливостей прогнозування відхилень у роботі обладнання. На відміну від традиційних методів контролю, сучасні технологічні рішення орієнтовані на безперервне відстеження параметрів функціонування технічних систем в режимі реального часу. Це суттєво підсилює ефективність управління безпекою та надійністю експлуатації складних інженерних об'єктів [6, с 33].

Застосування методів вібраційної діагностики забезпечує можливість своєчасного виявлення початкових ознак дисбалансу обертових механізмів та інших прихованих технічних відхилень. У роботі турбінного обладнання навіть незначні зміни амплітуди вібрацій можуть свідчити про ранню стадію розвитку механічного дефекту, який ще не виявляється у формі очевидної несправності, проте вже потребує проведення профілактичних заходів. Для контролю технічного стану електричних мереж та трансформаторного обладнання широко використовують тепловізійний моніторинг, що дозволяє оперативно виявляти локальні температурні аномалії. Підвищення температури в зоні контактних з'єднань може бути індикатором перевантаження електричної мережі або погіршення електропровідності, що за відсутності своєчасного реагування створює передумови для виникнення аварійних ситуацій.

На об'єктах енергетичної інфраструктури Південноукраїнської АЕС впроваджуються алгоритми машинного навчання, що забезпечують можливість прогнозування залишкового ресурсу обладнання та оцінювання перспектив його подальшої експлуатації. У разі фіксації системою поступових змін параметрів функціонування насосного обладнання, зокрема показників тиску або витрат, автоматизовані програмні комплекси здійснюють аналіз отриманих даних і формують прогноз щодо ймовірного рівня зношення. На основі таких розрахунків система здатна завчасно рекомендувати проведення технічного обслуговування або профілактичних заходів ще до настання критичного стану обладнання.

Важливе місце в сучасних системах контролю займають засоби діагностики [7, с 24], що базуються на хімічному аналізі робочих середовищ. У теплоенергетичних установках зміна хімічного складу теплоносія, зокрема зростання концентрації домішок або продуктів корозії, може свідчити про порушення цілісності обладнання чи недостатню ефективність функціонування систем очищення. Застосування таких методів контролю забезпечує можливість не тільки фіксації поточного технічного стану системи, але й виявлення динаміки та тенденцій його змін у процесі експлуатації.

Одним із пріоритетних напрямів забезпечення екологічної безпеки та контролю впливу енергетичного об'єкта на навколишнє природнє середовище є здійснення екологічного моніторингу [8, с 272]. Призначення моніторингу полягає у систематичному спостереженні за станом атмосферного повітря, водних ресурсів, ґрунту, рослинності, а також рівнем радіаційного фону в межах санітарно-захисної зони та прилеглих населених пунктів. Регулярне проведення відповідних досліджень забезпечує можливість своєчасного виявлення навіть незначних змін екологічних показників, аналізу їх динаміки та попередження потенційних ризиків для населення та довкілля.

На територіях, прилеглих до Південноукраїнської АЕС, функціонує автоматизована система радіаційного контролю, яка забезпечує безперервне цілодобове спостереження за рівнем іонізуючого випромінювання [9, с 371]. Вимірювальні датчики розміщені як на промисловій площадці атомної електростанції, так і в межах санітарно-захисної зони та в навколишніх населених пунктах. Інформація, отримана в режимі реального часу, надходить до інформаційно-аналітичних центрів, де здійснюється її обробка, аналіз та порівняння із встановленими нормативними показниками. У разі фіксації навіть незначного підвищення радіаційного фону система автоматично формує повідомлення для відповідних служб з метою проведення додаткових перевірок та встановлення причин виявлених відхилень.

Контроль стану водних ресурсів забезпечується фахівцями лабораторних підрозділів, які систематично здійснюють відбір проб води з річок, підземних джерел та водойм-охолоджувачів, задіяних у технологічному циклі станції. У процесі досліджень визначаються показники радіаційної безпеки, хімічного складу, температурного режиму та рівня біологічного загрязнення водного середовища [10, с 247]. Зростання температури води у водоймі-охолоджувачі може негативно впливати на стан водних екосистем, у зв'язку з чим контроль цього параметра набуває важливого значення для збереження біорізноманіття та підтримання екологічної рівноваги.

Моніторинг стану ґрунтів та рослинності на територіях, прилеглих до Південноукраїнської АЕС, здійснюється шляхом проведення аналізу вмісту радіонуклідів, важких металів та інших потенційно небезпечних речовин. Дослідження сільськогосподарської продукції, вирощеної поблизу атомної електростанції, дають можливість підтвердити її відповідність установленим санітарним та екологічним нормативам.

Функціонування системи екологічного моніторингу забезпечується завдяки співпраці атомної електростанції з державними екологічними службами та спеціалізованими лабораторіями [11, с 137]. Така взаємодія сприяє обміну інформацією, погодженню методик проведення досліджень та здійсненню незалежного оцінювання екологічного стану території. Результати радіаційного контролю можуть додатково перевірятися регіональними підрозділами екологічної інспекції або установами гідрометеорологічної служби, що підвищує рівень об'єктивності та достовірності отриманих даних. У разі виникнення надзвичайних ситуацій така координація забезпечує можливість оперативної організації спільних заходів щодо оцінювання обстановки, інформування населення та мінімізації потенційних наслідків.

Система реагування на надзвичайні ситуації на Південноукраїнській АЕС орієнтована на гарантування безпеки персоналу, населення та навколишнього природного середовища у разі виникнення аварійних чи потенційно небезпечних подій. Її функціонування базується на засадах оперативного реагування, безперервного контролю технологічних процесів та чіткого розмежування функціональних обов'язків між структурними підрозділами станції. Важливим складником також є налагоджена взаємодія з державними органами та службами цивільної захисту, що забезпечує скоординованість дій у кризових ситуаціях.

Функції координації дій у разі виникнення надзвичайної ситуації на Південноукраїнській АЕС виконує кризовий центр, який забезпечує централізоване управління інформаційними потоками та прийняттям рішень [12, с 98]. В межах своєї діяльності фахівці здійснюють комплексний аналіз даних, що надходять з автоматизованих систем контролю, засобів радіаційного моніторингу та технологічних датчиків, що дає змогу сформувати цілісне уявлення про розвиток подій. У разі виявлення ознак потенційного порушення роботи систем охолодження кризовий центр має можливість ініціювати переведення обладнання у безпечний режим експлуатації, а також залучити додаткові технічні ресурси для оперативного усунення виявлених несправностей.

Система реагування на надзвичайні ситуації передбачає взаємодію з підрозділами Державної служби України з надзвичайних ситуацій [13, с 222], медичними установами та органами місцевого самоврядування, що забезпечує комплексний характер управління кризовими подіями. У разі виникнення нестандартних або потенційно небезпечних ситуацій здійснюється оперативне інформування населення з використанням багатоканальної системи оповіщення, яка охоплює гучномовні засоби, засоби масової інформації та сучасні цифрові комунікаційні платформи. За потреби проведення профілактичних заходів або запровадження тимчасових обмежень перебування в окремих зонах населенню надаються відповідні інструкції щодо правил безпечної поведінки, що сприяє мінімізації можливих ризиків.

Важливе значення в забезпеченні ефективності системи реагування на надзвичайні ситуації має регулярна підготовка персоналу до відповідних дій. На Південноукраїнській АЕС на системній основі проводяться тренувальні заходи, в межах яких моделюються різні сценарії можливих аварійних подій, зокрема випадки втрати зовнішнього електропостачання або порушення функціонування систем охолодження. Проведення таких навчань сприяє відпрацюванню узгоджених алгоритмів взаємодії між структурними підрозділами та підвищенню оперативності прийняття управлінських рішень в умовах підвищеного стресового навантаження.

Система реагування на надзвичайні ситуації на Південноукраїнській АЕС є комплексно організованою структурною моделлю, що інтегрує технічні засоби контролю, управлінські механізми та міжвідомчу взаємодію [14, с 130]. Її результативність забезпечується неперервним моніторингом технологічних процесів, належним рівнем професійної підготовки персоналу та узгодженістю дій усіх залучених служб. Така організація функціонування системи є одним із ключових факторів гарантування ядерної та радіаційної безпеки.

Висновки. Отже, система безпеки та моніторингу Південноукраїнської АЕС ґрунтується на безперервному контролі технологічних процесів із широким застосуванням сучасних цифрових технологій. Використання інтелектуального аналізу даних забезпечує своєчасне виявлення потенційних відхилень у роботі обладнання та підвищує точність діагностичних процедур. Завдяки цьому відбувається поступовий перехід від реагування на вже наявні несправності до їх попередження на ранніх стадіях розвитку. Екологічний моніторинг навколо станції сприяє систематичному спостереженню за станом навколишнього природного середовища та підтверджує дотримання встановлених нормативних вимог. Діагностика технічного обладнання підвищує рівень надійності експлуатації енергоблоків і зменшує ймовірність виникнення аварійних ситуацій. Важливу роль відіграє також ефективна взаємодія з державними службами та кризовими центрами, що забезпечує оперативність реагування в разі надзвичайних подій. У підсумку реалізація зазначених заходів формує цілісну та багаторівневу систему гарантування ядерної, радіаційної та екологічної безпеки Південноукраїнської АЕС.

Список використаних джерел

1. Ivanenko V. S., Kurepin V. M. (2023) Ensuring the prevention of industrial injuries at nuclear power plants through increasing the level of safety culture. *Occupational safety: education and practice. Problems and prospects for the development of occupational safety*: collection of scientific works of the III All-Ukrainian scientific and practical conference of teachers and practitioners and the XII All-Ukrainian scientific and practical conference of cadets, students, postgraduates and adjuncts. May 11, 2023. Lviv: LDU BZhD, 2023. P. 135-137. URL:https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/14163.
2. Ivanenko V. S. (2025) Artificial intelligence in security systems. *Problems and prospects for the development of occupational health and safety*: collection of scientific papers of the V All-Ukrainian scientific and practical conference of teachers and practitioners and the XV All-Ukrainian scientific and practical conference of cadets, students, postgraduates and adjuncts (Lviv. May 15, 2025). Lviv: LDUBZHD, 2025. P. 207-209. URL:https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/21887.
3. Lazis M. I. (2025) Methods of determining the significance of the risk and making a decision on the need and sequence of measures. *OSHAgro – 2025*: collection of abstracts of the V international scientific and practical conference, September 30, 2025 / Ministry of Education and Science of Ukraine; National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine; Scientific and Production Journal "Occupational Safety"; European Community for Occupational Safety. Kyiv, 2025. P. 13-15. https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/23326.
4. Ivanenko V.S. (2025) Factors of vulnerability of objects to terrorist attacks and ways of overcoming them. *Problems of Emergency Situations*: materials of the international scientific-practical conference, Cherkasy, May 14, 2025. Cherkasy: National University of Civil Defense of Ukraine, 2025. P. 44-46. URL:https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/21484.
5. Ivanenko V. (2024) Technological load on the natural environment of the Mykolaiv region: problems, solution ways. Scientific and practical conference dedicated to World Meteorological Day "On Guard of Climate Action" and World Water Day "Water for Peace" (Kyiv, March 22-23, 2024). Kyiv, 2024. P. 146-148. URL:https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/18868.
6. Vyshnevskyi O. O. (2025) Digital platforms for crisis management: experience and challenges. *Problems of civil protection of the population and safety of life*: modern realities of Ukraine: materials of the XI All-Ukrainian correspondence scientific-practical conference, Kyiv, April 25, 2025. Kyiv: Mykhailo Dragomanov UDU, 2025. P. 32-33. https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/21286.
7. Didnyak A. V. (2026) Digital technologies in the system of occupational safety and health as a factor of sustainable business development. *Innovative and investment development of business in conditions of economic turmoil*: materials of the VII International scientific and practical conference of higher education graduates and young scientists to the 210th anniversary of Lviv Polytechnic (Lviv, March 26-27, 2026). Lviv: Lviv Polytechnic, 2026. P 23-25. URL:https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/24794.
8. Kurepin V. M., Ivanenko V. S., Marchenko D. D. (2026) Civil protection: emergencies in peacetime and wartime. Part 2 Emergencies of a technogenic nature: actions of the population under threat and in the event of emergencies: a textbook for

applicants of the first (bachelor's) and second (master's) levels of higher education of full-time and part-time forms of higher education. Mykolaiv: MNAU, 2026. 397 p. URL:https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/24226
9. Kurepin V. M., Kurepin D. V., Ivanenko V. S. (2025) Civil Protection: a textbook for applicants of the second (master's) level of higher education in full-time and part-time forms of higher education. Mykolaiv: MNAU, 2025. 491 p. URL:https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/20130.
10. Pindera M. V. (2025) Ecological monitoring of groundwater at water intakes of enterprises. *Mining, construction, environmental protection technologies and ecology*: theses of the All-Ukrainian scientific and practical online conference of postgraduates, young scientists and students dedicated to Science Day (Zhytomyr. May 12-17, 2025). Zhytomyr: Zhytomyr Polytechnic Institute, 2025. P. 247-248. URL:https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/21908.
11. Ivanenko V. S. (2025) Energy security of Ukraine: main problems of the energy sector, ways of solving them. *Ecology, nature management and environmental protection*: applied aspects: materials of the VIII All-Ukrainian scientific-practical correspondence conference, Kyiv, May 17, 2025 / edited by Kh.S. Mityushkina. Kyiv: Moscow State University, 2025. P 136-139. URL:https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/22022.
12. Kurepin V., Zubykhina-Khayat A. (2025). Anti-crisis Management Mechanisms as the Basis for Business Adaptation to a Turbulent Environment. *Modern Economics*, 54(2025), 95-103. DOI:https://doi.org/10.31521/modecon.V54(2025)-13.
13. Sokolyuk-Orel D. A. (2024) Peculiarities of cooperation between local authorities and fire and rescue units of the State Emergency Service of Ukraine under martial law. *Legal principles of organization and exercise of public power*: materials of the VII international scientific-practical conference dedicated to the bright memory of the doctor of legal sciences, professor, academician-founder of the National Academy of Law of Ukraine, the first Chairman of the Constitutional Court of Ukraine Leonid Petrovich Yuzkov (Khmelnytskyi, May 17, 2024). Khmelnytskyi: Khmelnytskyi University of Management and Law named after Leonid Yuzkov, 2024. P. 220-223. URL:https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/18498.
14. Kurepin V., Ivanenko V. (2025). Interaction Between Local Authorities and the Media as a Factor in Implementing Information Policy in Emergency Situations. *Modern Economics*, 49(2025), 124-132. DOI: https://doi.org/10.31521/modecon.V49(2025)-17.

CFD-АНАЛІЗ ПОВІТРОРОЗПОДІЛУ В ПРИМІЩЕННЯХ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ HVAC-СИСТЕМ

В’ячеслав Джеджула, професор, д.е.н., кафедра будівництва, містобудування та архітектури [1]
[1]Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, 21021, м.Вінниця, Україна

АНОТАЦІЯ. *У роботі розглянуто питання чисельного моделювання повітророзподілу в приміщеннях житлових і громадських будівель з метою підвищення енергетичної ефективності систем вентиляції та кондиціонування повітря. Запропоновано підхід на основі обчислювальної гідродинаміки (CFD), реалізований у відкритому пакеті OpenFOAM, який дозволяє оцінити поля швидкостей, температур та концентрацій забруднень в обслуговуваній зоні. Виконано порівняльний аналіз трьох типових схем подачі припливного повітря – змішувальної, витискальної та зональної – за критеріями теплового комфорту, якості повітря і питомих енерговитрат. Встановлено вплив геометричних параметрів повітрозабірних пристроїв, висоти приміщення та теплового навантаження на параметри мікроклімату. Отримані результати дозволяють обґрунтовано обирати схему повітророзподілу для забезпечення нормативних параметрів повітря робочої зони за мінімальних експлуатаційних витрат енергії. Доведено, що зональна схема забезпечує економію енергії до 40 % порівняно зі змішувальною за умов збереження нормативної якості повітря.*

Ключові слова: повітророзподіл; CFD-моделювання; OpenFOAM; вентиляція; енергоефективність; мікроклімат; тепловий комфорт.

Вступ. Сучасні системи вентиляції та кондиціонування повітря належать до найбільш енергоємних інженерних систем будівель і споруд: за різними оцінками на їхню частку припадає від 30 до 50 % загального енергоспоживання об’єктів цивільного призначення. У зв’язку з цим питання раціональної організації повітрообміну в обслуговуваній зоні приміщення набуває першочергового значення як з точки зору забезпечення нормативних параметрів мікроклімату, так і з позиції скорочення витрат теплової та електричної енергії [1-5]. Неефективна організація припливно-витяжних потоків призводить до утворення застійних зон, неоднорідного температурного поля, перевитрат припливного повітря та, як наслідок, до зростання

експлуатаційних витрат і погіршення якості повітря робочої зони. Натомість впровадження сучасних чисельних методів моделювання дає можливість на стадії проектування оцінити характер руху повітря, визначити ефективні схеми його розподілу й уникнути зайвих енерговитрат у процесі експлуатації.

Аналіз літературних джерел. Сучасний розвиток методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) перетворив їх на універсальний інструмент аналізу процесів тепломасообміну та повітророзподілу у вкрай різних інженерних задачах – від промислових апаратів до тваринницьких комплексів і міського середовища.

У сфері енергоефективності будівель та зеленої архітектури важливим напрямом є інтеграція рослинних систем з механічною вентиляцією. Feng et al. [1] розробили чисельну модель вентильованої вертикальної системи озеленення (VGS) шляхом поєднання CFD, моделі пористого середовища та рівняння енергетичного балансу листя з урахуванням сонячної радіації, конвекції та транспірації. Cho та Lee [2] продовжують цей напрям, аналізуючи активний енергообмін між дахом-теплицею та основною будівлею за допомогою об'єднаної CFD- та BES-моделі.

Окрему групу робіт складають дослідження клімату транспортних засобів. Ramesh Babu et al. [3] запропонували адаптивну стратегію рециркуляції повітря в кабіні електровантажівки на основі суміщеної CFD- та термофізіологічної моделі (JOS-3 у поєднанні з моделлю комфорту Berkeley) з урахуванням вологості та CO_2. У промисловому секторі CFD широко використовується для оптимізації газодинаміки апаратів. Esmaeilpour et al. [4] виконали тривимірне двофазне моделювання промислового повітряного класифікатора цементу на заводі Kerman Momtazan. Подібну логіку оптимізації за рахунок CFD-аналізу геометрії застосовують Dewangan et al. [5] для триходових трубчастих сонячних повітронагрівачів (TP-TSAH), порівнюючи квадратні, круглі, трикутні та конічні манифольди з кутами 2°–10°.

Значну увагу приділено питанням якості повітря та безпеки людей. Yoo et al. [6] застосували CFD для пошуку оптимальних місць встановлення повітроочисних систем на автобусних зупинках в індустріальному місті Ульсан (Південна Корея). У контексті промислової безпеки Sun et al. [7] використали зв'язаний CFD-DEM підхід для моделювання утворення пилу при роботі прохідницьких комбайнів у вугільних шахтах і запропонували технологію повного закритого повітряного завісного контролю.

Узагальнюючи проаналізовані роботи, можна виокремити кілька спільних тенденцій. По-перше, дослідники переходять від суто верифікаційних CFD-розрахунків до моделей, що поєднують гідродинаміку із суміжними фізичними процесами – термофізіологією людини, енергетичним балансом рослин, дискретним рухом частинок (DEM) чи симуляцією енергоспоживання будівель (BES). По-друге, спостерігається стійка прив'язка чисельних результатів до експериментальної валідації (похибка зазвичай не перевищує 5–6 %), що підвищує довіру до отриманих рекомендацій. Це створює надійне підґрунтя для подальшого розвитку міждисциплінарних CFD-моделей як інструменту проєктування енергоефективних, безпечних та комфортних інженерних систем. Водночас комплексні дослідження, що поєднують аналіз геометрії повітрозабірних пристроїв, схем подачі повітря та питомих енерговитрат для типових громадських і житлових приміщень в умовах України, залишаються недостатньо повними.

Мета роботи. Розроблення чисельної моделі повітророзподілу в приміщеннях громадських і житлових будівель, спрямованої на вибір раціональної схеми подачі та видалення повітря, яка забезпечує нормативні параметри мікроклімату за мінімальних енергетичних витрат системи вентиляції.

Матеріали і методи. Основу математичного апарату моделі складають рівняння нерозривності, рівняння Нав'є–Стокса в осередненому за Рейнольдсом виді (RANS), а також рівняння переносу енергії та концентрації домішок. Для замикання системи використано стандартну двопараметричну k–ε модель турбулентності з пристінковими функціями.

Виклад основного матеріалу. Питомі енергетичні витрати на роботу вентиляційної установки можна оцінити за залежністю:

$$N = L \cdot \Delta p \,/\, (3600 \cdot \eta_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{д}}), \qquad (1)$$

де N – електрична потужність вентилятора, Вт; L – об'ємна витрата повітря, м³/год; Δp – повний тиск, що його розвиває вентилятор, Па; $\eta_в$, $\eta_д$ – коефіцієнти корисної дії вентилятора та електродвигуна відповідно.

Теплове навантаження на систему вентиляції визначається з рівняння теплового балансу обслуговуваної зони:

$$Q = c \cdot \rho \cdot L \cdot (t_{\text{пр}} - t_{\text{вид}}) / 3600, \quad (2)$$

де Q – теплова потужність, що відводиться вентиляційним повітрям, Вт; c – питома теплоємність повітря, Дж/(кг·К); ρ – густина повітря, кг/м³; $t_{пр}$, $t_{вид}$ – температура припливного та витяжного повітря відповідно, °С.

Для порівняльного аналізу досліджено три типові схеми повітророзподілу: змішувальну (через стельові дифузори з настильним рухом струменя), витискальну (через перфоровані панелі у нижній частині приміщення) та зональну з направленою подачею припливного повітря в зону перебування людей. Чисельні експерименти проводились для офісного приміщення площею 50 м², висотою 3,2 м, з тепловим надлишком 35 Вт/м² та нормативною кратністю повітрообміну n = 3 год⁻¹. Кількість одночасно присутніх осіб – 6, температура припливного повітря – +18 °С, температура зовнішнього повітря – +28 °С. На рис. 1 наведено принципову схему повітророзподілу у вигляді полів модуля швидкості повітря |U| та накладених на них ліній струму (streamlines), отриманих у ParaView.

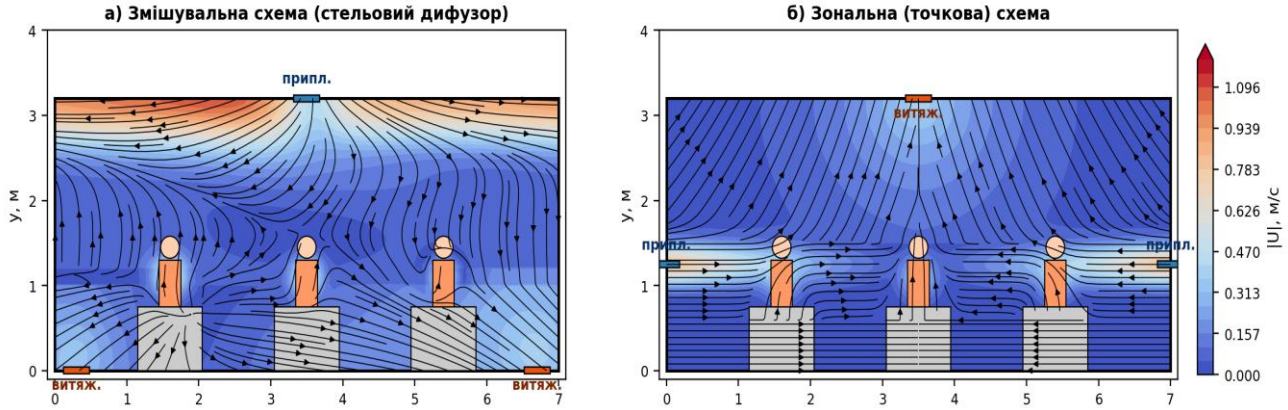


Рис. 1. Принципова схема полей модуля швидкості повітря |U|, м/с, та лінії струму у вертикальному перерізі приміщення: а – змішувальна схема; б – зональна (точкова) схема з боковими настінними струменями

Для змішувальної схеми (рис. 1, а) ціль припливного повітря формує настильний рух уздовж стелі з подальшим спаданням біля бокових стін та інтенсивною рециркуляцією у верхній частині приміщення; швидкості у зоні дихання людей коливаються у межах 0,15…0,35 м/с, спостерігаються застійні зони над робочими місцями. Для зональної схеми (рис. 1, б) припливне повітря подається горизонтальними настінними струменями безпосередньо на рівень робочої зони ($y \approx 1{,}2$ м), що забезпечує цілеспрямоване обтікання людей, локальне видалення теплонадлишків і помітне зниження середніх швидкостей у верхній частині об'єму. Поле швидкостей у зоні перебування людей виявляється більш рівномірним, а відсутність зворотних струменів у верхній частині приміщення дозволяє знизити витрату припливного повітря без погіршення параметрів мікроклімату.

Як видно з результатів моделювання, найрівномірніше температурне поле в обслуговуваній зоні забезпечує витискальна схема: відносна неоднорідність температури становить 4,8 %, тоді як для змішувальної схеми цей показник сягає 12,3 %. Найбільш енергоощадною виявилася зональна схема: за рахунок зосередженої подачі повітря у робочу зону вдалося зменшити сумарну витрату припливного повітря на 22–28 % порівняно зі змішувальною схемою при дотриманні нормативних значень концентрації CO_2 та теплового комфорту.

Таблиця 1

Порівняльні характеристики схем повітророзподілу

Показник	**Змішувальна**	**Витискальна**	**Зональна**	**Гібридна**
Кратність повітрообміну, год$^{-1}$	3,0	2,6	2,2	2,4
Питома потужність вентилятора, Вт/м²	4,2	3,1	2,4	2,7
Неоднорідність температури, %	12,3	4,8	6,5	5,4
Очікувана економія енергії, %	0	26	43	35

Висновки. 1. Розроблено чисельну CFD-модель повітророзподілу в приміщеннях, реалізовану у відкритому пакеті OpenFOAM, яка дає змогу комплексно враховувати турбулентний рух повітря, теплові потоки та перенос забруднень і слугує інструментом для енергетичного аналізу типових схем вентиляції. 2. Серед досліджених схем найвищу енергоощадність у поєднанні з нормованою якістю повітря в робочій зоні забезпечує зональна (точкова) схема: економія енергії досягає 43 % порівняно зі змішувальною схемою. 3. Гібридна схема з керуванням за фактичним завантаженням приміщення є оптимальним рішенням для громадських просторів зі змінним перебуванням людей і забезпечує економію енергії до 35 %. 4. Подальші дослідження доцільно спрямувати на інтеграцію розробленої моделі з системами автоматичного керування мікрокліматом та на її верифікацію в натурних умовах експлуатації цивільних будівель.

Список використаних джерел

1. Chen, G., Zhang, G., Bjerg, B., Pedersen, P., Jensen, T., & Rong, L. (2024). CFD investigation on a novel pen partition-attached jet air supply for mitigating heat stress among lactating sows. *Computers and Electronics in Agriculture*, *220*, 108840. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108840
2. Cho, J.-h., & Lee, I.-b. (2025). Active energy exchange effect between building and rooftop greenhouse for energy saving, part 2: Energy consumption reduction scenario development. *Energy Reports*, *14*, 4589–4608. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.11.065
3. Cho, J.-h., & Lee, S. M. (2026). CFD-based evaluation of air distribution strategies for improving environmental uniformity and reducing energy use in container and building vertical farms. *Biosystems Engineering*, *266*, 104461. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2026.104461
4. Dewangan, D., Ekka, J. P., Albela, D. K., Mahto, A., & Kumar, A. (2026). CFD-based analysis of flow distribution improvement in triple-pass tubular solar air heaters using different manifold geometry. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *172*, 110456. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.110456
5. Esmaeilpour, M., Mohebbi, A., & Ghalandari, V. (2024). CFD simulation and optimization of an industrial cement gas–solid air classifier. *Particuology*, *89*, 172–184. https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.10.011
6. Feng, Z., Yang, Z., Zhou, Y., & Ren, C. (2026). A ventilated vertical greenery system for energy-efficient fresh air cooling: Model development and implementation. *Renewable Energy*, *260*, 125211. https://doi.org/10.1016/j.renene.2026.125211
7. Ramesh Babu, A., Sebben, S., Chronéer, Z., & Etemad, S. (2024). An adaptive cabin air recirculation strategy for an electric truck using a coupled CFD-thermoregulation approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *221*, 125056. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125056
8. Sun, B., Xie, F., Zhou, G., Liu, Y., Liu, Z., Liu, C., & Qu, Y. (2026). CFD-DEM numerical simulation of large cross section of full area closed air curtain closure control and dust removal technology in continuous digging working face: A case study. *Powder Technology*, *469*, 121869. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2025.121869
9. Yoo, Y., Kim, J., Lee, J., & Cho, H. (2024). Air quality improvement at urban bus stops: Optimal air purification placement using CFD. *Sustainable Cities and Society*, *117*, 105937. https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105937

ВПЛИВ СИНХРОНІЗАЦІЇ ІНЕРЦІЙНИХ ВІБРОЗБУДЖУВАЧІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ВІБРАЦІЙНОГО КОНВЕЄРА

Юрій Тікан аспірант[1] **(**ORCID: 0009-0007-5547-1693),
Тетяна Нестеренко, доцент, к.т.н., доцент[1] (ORCID: 0000-0002-2387-8575),
Микола Нестеренко, доцент, к.т.н., доцент[1] (ORCID: 0000-0002-4073-1233),
[1]Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка 24, 36011, Україна

АНОТАЦІЯ. *Розглянуто вплив синхронізації інерційних віброзбуджувачів на ефективність роботи вібраційного конвеєра для транспортування сипких матеріалів. Показано, що для конвеєрів із двома інерційними віброзбуджувачами раціональним є режим, за якого дебаланси обертаються у протилежних напрямах і формують напрямлену гармонічну збурювальну силу. Встановлено, що проходження лінії дії цієї сили через центр мас робочого органа забезпечує стабільний поступальний рух лотка, рівномірне переміщення матеріалу та зменшення небажаних кутових коливань. Обґрунтовано, що фазове розузгодження віброзбуджувачів може спричиняти появу додаткових складових руху, порушення рівномірності транспортування, локальні накопичення матеріалу та зниження продуктивності конвеєра. Запропоновано розглядати синхронізацію віброзбуджувачів як один із ключових чинників підвищення ефективності, стабільності та енергоощадності вібраційного транспортного обладнання.*

Ключові слова: *вібраційний конвеєр; інерційний віброзбуджувач; синхронізація; дебаланс; фазове розузгодження; збурювальна сила; сипкий матеріал; коливальний режим; транспортування; ефективність.*

Вступ. Вібраційні конвеєри широко застосовуються для транспортування сипких, кускових і зернистих матеріалів у будівельній, гірничій, металургійній, хімічній та переробній промисловості. Їх перевагами є простота конструкції, надійність, можливість поєднання транспортування з технологічними операціями дозування, охолодження, сушіння, сортування або сепарації матеріалу. Ефективність роботи таких машин значною мірою залежить від характеру коливального руху робочого органа, стабільності збурювальної дії та узгодженості параметрів віброзбуджувачів.

У вібраційних конвеєрах із двома інерційними віброзбуджувачами важливим є забезпечення їх синхронної роботи. За умови протилежного напряму обертання дебалансів формується напрямлена гармонічна збурювальна сила, яка забезпечує переважно поступальний рух лотка. Якщо лінія дії цієї сили проходить через центр мас конвеєра, зменшується ймовірність виникнення небажаних кутових коливань, а транспортування матеріалу відбувається більш рівномірно.

У реальних умовах експлуатації робота віброзбуджувачів може супроводжуватися фазовим розузгодженням, що виникає через відмінність моментів опору, взаємодію з транспортованим матеріалом, зміну завантаження або особливості самосинхронізації. Такі відхилення порушують стабільність коливального режиму, спричиняють появу додаткових складових руху, локальні накопичення матеріалу та зниження продуктивності конвеєра.

Аналіз літературних джерел. У роботі [1] розглянуто подієве керування вібраційними конвеєрами, що працюють на основі динамічного гасника Фрама. Автори показали, що застосування спеціальних алгоритмів керування дозволяє підвищити стабільність роботи конвеєра та зменшити небажані коливання, які можуть погіршувати транспортування матеріалу. Це джерело є важливим для обґрунтування необхідності керування коливальним режимом вібраційного обладнання.

У праці [2] наведено підхід до визначення кінетичних параметрів елементів вібраційної машини з обертовим пристроєм. Такі дослідження мають значення для аналізу машин з інерційними віброзбуджувачами, оскільки дають змогу оцінювати вплив масово-інерційних характеристик на формування коливального руху робочого органа.

У дослідженні [3] розглянуто теоретичні основи синхронізації двох збудників у нелінійній вібраційній системі з кількома резонансними режимами. Встановлення умов синхронної роботи

віброзбуджувачів є особливо важливим для вібраційних конвеєрів, оскільки саме синхронізація визначає напрям дії результуючої збурювальної сили та стабільність руху лотка.

У роботі [4] досліджено вібраційний двомасовий транспортер-маніпулятор із незалежними поздовжніми, поперечними та вертикальними коливаннями. Такий підхід показує можливість керування просторовим рухом робочого органа та розширення функціональних можливостей вібраційного транспортувального обладнання.

Джерело [5] характеризує промислове застосування вібраційних конвеєрів як ефективних і багатофункціональних машин для переміщення сипких матеріалів. У ньому підкреслено, що такі конвеєри можуть не лише транспортувати матеріал, а й поєднувати цей процес із дозуванням, охолодженням, сортуванням або іншими технологічними операціями.

У праці [6] проаналізовано транспортні можливості енергоефективного резонансного вібраційного конвеєра класичної конструкції. Автори показали, що використання резонансних режимів дозволяє зменшити енергоспоживання та підвищити ефективність переміщення матеріалу, що є важливим напрямом удосконалення вібраційних транспортних машин.

У роботі [7] розглянуто керування напрямом і швидкістю транспортування у двосторонньому реверсивному вібраційному конвеєрі. Це дослідження підтверджує, що зміна параметрів коливального руху може використовуватися для регулювання швидкості переміщення матеріалу та навіть зміни напряму його транспортування.

У джерелі [8] досліджено експлуатаційні властивості вібраційних конвеєрів антирезонансного типу. Такі машини є перспективними з погляду зменшення динамічних навантажень на основу та підвищення енергоефективності, що безпосередньо пов’язано з питаннями стабілізації коливального режиму.

У праці [9] наведено результати дослідження транспортних можливостей нового вібраційного конвеєра з одним електровібратором. Показано, що навіть за спрощеної конструкції приводу можна забезпечити ефективне переміщення матеріалу за умови раціонального вибору параметрів коливань.

Таким чином, аналіз джерел [1–9] показує, що ефективність вібраційних конвеєрів визначається не лише конструкцією робочого органа, а й стабільністю коливального режиму, умовами синхронізації віброзбуджувачів, можливістю керування напрямом і швидкістю транспортування та раціональним використанням резонансних або антирезонансних режимів. Особливо важливим для конвеєрів із двома інерційними віброзбуджувачами є забезпечення їх синхронної роботи, оскільки фазове розузгодження може спричиняти додаткові кутові коливання, нерівномірність переміщення матеріалу та зниження продуктивності обладнання.

Мета роботи. Метою роботи є аналіз впливу синхронізації інерційних віброзбуджувачів на ефективність роботи вібраційного конвеєра для транспортування сипких матеріалів. Передбачається встановити роль синфазного та протифазного режимів обертання дебалансів у формуванні результуючої збурювальної сили, оцінити вплив фазового розузгодження на характер коливального руху лотка та визначити умови, за яких забезпечується рівномірне переміщення матеріалу, зменшення небажаних кутових коливань і підвищення продуктивності конвеєра.

Виклад основного матеріалу. Ефективність роботи вібраційного конвеєра значною мірою визначається характером коливального руху його робочого органа та узгодженістю дії інерційних віброзбуджувачів. У досліджуваній установці транспортування сипкого матеріалу здійснюється за рахунок коливань лотка, встановленого на пружних опорах. Збурювальна дія створюється двома інерційними віброзбуджувачами, закріпленими на рамі конвеєра під певним кутом до напрямку транспортування. Загальний вигляд експериментальної установки наведено на рис. 1.

Рис. 1. Загальний вигляд вібраційного конвеєра з двома інерційними віброзбуджувачами

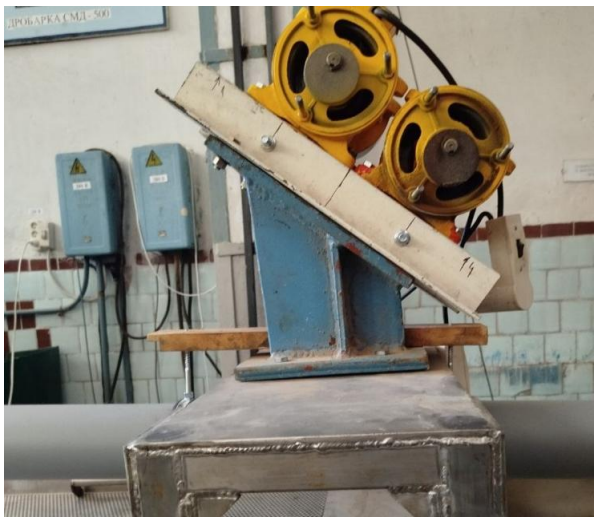


Рис. 2. Кріплення інерційних віброзбуджувачів на рамі вібраційного конвеєра

Під час роботи віброзбуджувачі обертаються у протилежних напрямах і створюють періодичні відцентрові сили. За умови синхронного обертання дебалансів результуюча збурювальна сила набуває напрямленого характеру та спричиняє переважно поступальні коливання лотка. Якщо лінія дії цієї сили проходить через центр мас системи, зменшується ймовірність виникнення небажаних кутових коливань корпусу, а рух матеріалу вздовж лотка стає більш рівномірним. Такий режим є найбільш сприятливим для стабільного транспортування сипких матеріалів.

Конструктивне розміщення віброзбуджувачів на рамі конвеєра показано на рис. 2. Нахилена схема кріплення дозволяє сформувати коливальний рух із горизонтальною та вертикальною складовими. Вертикальна складова забезпечує періодичне підкидання або розвантаження шару матеріалу, а горизонтальна — його поступальне переміщення вздовж транспортного каналу. Саме поєднання цих складових створює умови для безперервного руху сипкого середовища.

У реальних умовах експлуатації ідеальна синхронізація віброзбуджувачів може порушуватися. Причинами цього є нерівномірне завантаження лотка, зміна опору руху матеріалу, відмінність моментів опору в приводах, особливості самосинхронізації та пружні властивості опорної системи. Фазове розузгодження віброзбуджувачів призводить до появи додаткових складових руху, зокрема кутових коливань корпусу. Унаслідок цього матеріал може переміщуватися нерівномірно, утворювати локальні накопичення або змінювати інтенсивність руху на окремих ділянках лотка.

Особливо важливим показником ефективності є сталість потоку матеріалу на виході з транспортного каналу. На рис. 3 показано процес вивантаження сипкого матеріалу з труби після транспортування. Рівномірний характер виходу матеріалу свідчить про достатню інтенсивність коливального впливу та узгоджену роботу віброзбуджувачів. У разі порушення синхронізації можливі пульсації потоку, нерівномірна подача або часткове накопичення матеріалу в робочій зоні.

Синхронізація інерційних віброзбуджувачів є одним із ключових чинників підвищення ефективності вібраційного конвеєра. Раціональний режим роботи досягається тоді, коли результуюча збурювальна сила має стабільний напрям, а її дія забезпечує необхідне співвідношення вертикальної та горизонтальної складових коливань. Це дозволяє підвищити рівномірність транспортування, зменшити втрати енергії на небажані кутові коливання, уникнути локального накопичення матеріалу та забезпечити стабільну продуктивність обладнання. Основні положення узгоджуються з аналітичним підходом до опису роботи вібраційного конвеєра з двома інерційними віброзбуджувачами, де враховано поступальні переміщення центра мас лотка, малий кутовий поворот корпусу та сумарну дію відцентрових сил дебалансів

Рис. 3. Вивантаження сипкого матеріалу після транспортування вібраційним конвеєром

Висновки. Розглянуто вплив синхронізації інерційних віброзбуджувачів на ефективність роботи вібраційного конвеєра для транспортування сипких матеріалів. Встановлено, що узгоджена робота двох віброзбуджувачів, які обертаються у протилежних напрямах, забезпечує формування напрямленої збурювальної сили та стабільний коливальний режим робочого органа.

Показано, що проходження лінії дії результуючої сили через центр мас конвеєра сприяє переважно поступальному руху лотка, зменшенню небажаних кутових коливань і підвищенню рівномірності транспортування матеріалу. У разі фазового розузгодження віброзбуджувачів виникають додаткові складові руху, що можуть спричиняти пульсації потоку, локальні накопичення матеріалу та зниження продуктивності.

Синхронізація інерційних віброзбуджувачів є важливою умовою підвищення ефективності вібраційного конвеєра. Раціональне узгодження параметрів коливань дозволяє забезпечити стабільне переміщення сипкого матеріалу, зменшити енерговитрати на небажані коливання та підвищити надійність роботи транспортно-технологічного обладнання.

Список використаних джерел

1. Klemiato, M., & Czubak, P. (2015). Event driven control of vibratory conveyors operating on the Frahm's eliminator basis. Archives of Metallurgy and Materials, 60(1), 19–25. DOI: 10.1515/amm-2015-0003.
2. Borovets, V. M., Shenbor, V. S., & Bespalov, A. S. (2009). Vyznachennia kinetychnykh parametriv elementiv vibratsiinoi mashyny z obertovym prystroiem [Determination of kinetic parameters of elements of a vibration machine with a rotating device]. Avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsesiv u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni, 43, 3–7. [in Ukrainian].
3. Zhang, X., Wen, B., & Zhao, C. (2016). Theoretical study on synchronization of two exciters in a nonlinear vibrating system with multiple resonant types. Nonlinear Dynamics, 85(1), 141–154.
4. Vrublevskyi, I. Y. (1999). Vibratsiinyi dvomasovyi transporter-manipuliator z nezalezhnymy pozdovzhnimy, poperechnymy ta vertykalnymy kolyvanniamy [Vibratory two-mass conveyor-manipulator with independent longitudinal, transverse and vertical oscillations]. Visnyk Derzhavnoho universytetu "Lvivska politekhnika", 371, 71–74. [in Ukrainian].
5. Bruks Siwertell. Vibrating conveyors ensure efficient, multi-functional material handling. Retrieved March 16, 2026, from https://bruks-siwertell.com/conveying/vibrating-conveyor
6. Czubak, P., & Klemiato, M. (2025). Analysis of the transport capabilities of an energy-efficient resonant vibratory conveyor of classical construction. Energies, 18(10), Article 2500. DOI: 10.3390/en18102500.
7. Klemiato, M., & Czubak, P. (2019). Control of the transport direction and velocity of the two-way reversible vibratory conveyor. Archive of Applied Mechanics, 89(7), 1359–1373. DOI: 10.1007/s00419-018-01507-8.
8. Michalczyk, J., & Gajowy, M. (2023). Operational properties of vibratory conveyors of the antiresonance type. Archives of Mining Sciences. DOI: 10.24425/122449.
9. Żmuda, W., & Czubak, P. (2022). Investigations of the transport possibilities of a new vibratory conveyor equipped with a single electro-vibrator. Transport Problems, 17(4), 127–136. DOI: 10.20858/tp.2022.17.4.11.

ВПЛИВ ФОРМИ КОЛИВАНЬ КОНТЕЙНЕРА НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ВІБРАЦІЙНОЇ ОЧИСТКИ ДЕТАЛЕЙ

Микола Нестеренко, доцент, к.т.н., доцент[1] (ORCID: 0000-0002-4073-1233),
Тетяна Нестеренко, доцент, к.т.н., доцент[1] (ORCID: 0000-0002-2387-8575),
Дмитро Бодак, аспірант[1] **(**ORCID: 0009-0002-1584-4778),
[1]Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка 24, 36011, Україна

АНОТАЦІЯ. *Розглянуто особливості процесу вібраційної очистки деталей, що ґрунтується на інтенсивній взаємодії оброблюваних виробів із частинками абразивного або іншого сипучого наповнювача в коливальному контейнері. Показано, що ефективність очищення залежить від характеру траєкторії руху маси, амплітуди та частоти коливань, співвідношення швидкостей переміщення деталей і частинок робочого середовища, а також від форми вібраційного впливу. Проаналізовано прямолінійну, площинну та просторову вібрацію, встановлено їх вплив на перемішування наповнювача, контакт частинок із поверхнею деталей і рівномірність обробки. Обґрунтовано, що найбільш сприятливі умови для якісної очистки забезпечуються за складного коливального руху, який створює інтенсивне переміщення робочої маси, підвищує турбулентність потоку та сприяє рівномірному зніманню забруднень із зовнішніх і внутрішніх поверхонь деталей.*

Ключові слова: *вібраційна очистка; деталь; абразивний наповнювач; коливальний контейнер; амплітуда; частота коливань; траєкторія руху; робоче середовище; вібраційна обробка.*

Вступ. Для встановлення впливу основних конструктивних і режимних параметрів малогабаритного обладнання для вібраційної очистки деталей на характер руху робочого контейнера доцільно застосувати математичне моделювання механічної системи. Реальна система, що включає контейнер із деталями та робочим наповнювачем, пружні опори, віброзбуджувач і привід, має складний характер взаємодії елементів, тому її повний чисельний аналіз є досить громіздким. З метою спрощення розрахунків розглянуто узагальнену механічну модель вібраційної установки, яка дозволяє описати основні закономірності коливального руху контейнера та оцінити вплив амплітуди, частоти, маси робочого середовища і параметрів віброзбудження на інтенсивність процесу очистки. Початковим етапом побудови такої моделі є визначення кінетичної енергії системи з подальшим складанням рівнянь руху на основі положень аналітичної механіки.

Аналіз літературних джерел. Вібраційна очистка деталей належить до групи процесів вібраційної обробки, у яких знімання забруднень, задирок або поверхневого шару відбувається внаслідок багаторазової взаємодії деталі з частинками робочого середовища. У роботі [1] зазначено, що процес вібраційного фінішування тривалий час розглядався переважно як емпіричний, оскільки фундаментальні закономірності знімання матеріалу та впливу контактних сил між деталлю і наповнювачем були досліджені недостатньо. Авторами запропоновано математичний підхід до опису механізму знімання матеріалу з урахуванням властивостей оброблюваного виробу, робочого середовища, швидкості ударної взаємодії та контактних навантажень.

У дослідженні [2] розглянуто можливість застосування чисельного моделювання руху робочого середовища у вібраційних установках. Використання методів обчислювальної гідродинаміки дає змогу оцінити швидкість і тиск потоку наповнювача навколо оброблюваних деталей, що є важливим для прогнозування інтенсивності очистки та рівномірності обробки поверхонь. Такий підхід є корисним для аналізу складного руху маси в контейнері, особливо у випадках, коли експериментальне визначення траєкторій частинок є ускладненим.

Вплив режимних параметрів вібрації на продуктивність процесу досліджено в роботі [3]. Автори показали, що збільшення частоти та амплітуди коливань може скорочувати тривалість обробки, однак ці параметри мають підбиратися з урахуванням допустимих навантажень на конструкцію установки та можливого пошкодження поверхні деталей. Це підтверджує необхідність раціонального вибору режиму вібраційної очистки, за якого забезпечується достатня інтенсивність взаємодії наповнювача з деталями без надмірного ударного впливу.

У роботі [4] проаналізовано вплив складу керамічного робочого середовища на інтенсивність знімання матеріалу під час вібраційного фінішування. Встановлено, що властивості наповнювача, зокрема його матеріал, форма, абразивність і зносостійкість, істотно впливають на характер контакту з деталлю та якість обробленої поверхні. Отже, ефективність вібраційної очистки визначається не лише параметрами коливань контейнера, а й фізико–механічними властивостями робочого середовища.

Аналіз літературних джерел показує, що процес вібраційної очистки деталей є багатофакторним і залежить від кінематичних параметрів установки, траєкторії руху контейнера, властивостей наповнювача та умов контакту частинок із поверхнею деталей. Водночас питання спрощеного математичного опису руху робочого органу малогабаритної вібраційної установки залишається актуальним, оскільки саме така модель дозволяє на початковому етапі оцінити вплив основних параметрів на ефективність процесу очистки.

Мета роботи. Метою роботи є аналіз процесу вібраційної очистки деталей у контейнерній установці та встановлення впливу траєкторії коливального руху робочого органу на характер переміщення деталей і частинок абразивного наповнювача. Особливу увагу приділено порівнянню прямолінійної та кругової траєкторій вібрації, визначенню умов формування активного циркуляційного руху робочого середовища, а також обґрунтуванню параметрів, що забезпечують підвищення рівномірності та ефективності очищення поверхонь деталей.

Виклад основного матеріалу. Вібраційна очистка деталей здійснюється у робочому контейнері, який заповнюється оброблюваними деталями та абразивним або іншим сипучим наповнювачем. Загальний вигляд установки контейнерного типу наведено на рис. 1. Основними елементами такої установки є робочий контейнер, пружна система, опорна тумба, віброзбуджувач і вузли кріплення. Під час роботи контейнер здійснює коливальний рух, унаслідок чого деталі та частинки наповнювача починають інтенсивно переміщуватися відносно одне одного. Саме ця взаємодія забезпечує очищення поверхонь деталей від забруднень, окалини, залишків формувальних сумішей, задирок або тонкого поверхневого шару.

Ефективність процесу значною мірою залежить від характеру руху робочого органу установки. У найпростішому випадку контейнер може здійснювати прямолінійні коливання, однак для забезпечення більш інтенсивного перемішування робочої маси доцільно формувати площинний рух із горизонтальною та вертикальною складовими. Схему площинної вібрації робочого органу установки наведено на рис. 2. Вона показує, що залежно від співвідношення амплітуд і фаз коливань траєкторія руху контейнера може бути прямолінійною, еліптичною або круговою.

При прямолінійній вібрації робоча маса переважно переміщується в одному напрямку. Такий режим є конструктивно простим, однак він не завжди забезпечує рівномірне перемішування деталей і наповнювача в усьому об’ємі контейнера. У результаті можуть утворюватися зони з різною інтенсивністю обробки: на одних ділянках поверхня деталі контактує з наповнювачем активно, а на інших — недостатньо. Тому прямолінійний режим доцільно застосовувати переважно для нескладних за формою деталей або для попередньої очистки.

Рис. 1. Загальний вигляд вібраційної установки контейнерного типу для очистки деталей із сірим абразивним наповнювачем

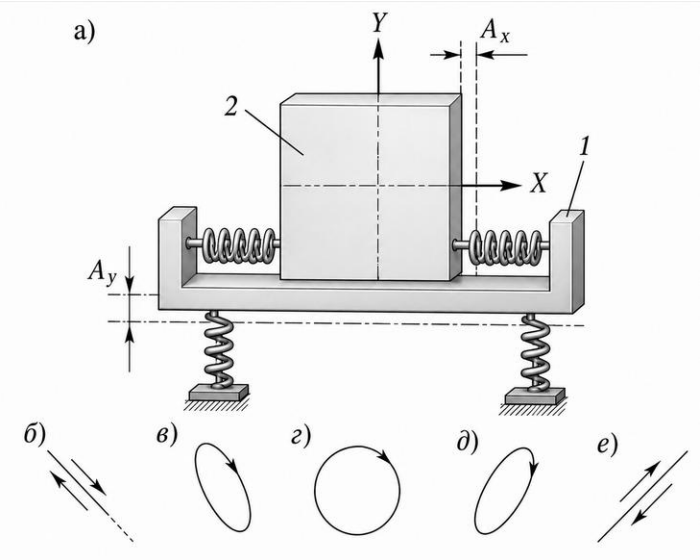


Рис. 2. Розрахункова схема площинної вібрації робочого органу установки:
а – спрощена механічна модель робочого контейнера на пружних опорах; б, е – прямолінійні траєкторії коливань; в, д – еліптичні траєкторії коливань; г – кругова траєкторія коливань.

Більш ефективним для вібраційної очистки є складний площинний рух, за якого контейнер одночасно здійснює горизонтальні та вертикальні переміщення. У цьому випадку частинки робочого середовища не лише ковзають по поверхні деталей, а й переміщуються по складних траєкторіях, змінюючи напрямок руху. Це сприяє кращому перемішуванню маси, збільшенню кількості контактів між деталями та наповнювачем, а також підвищенню рівномірності очищення зовнішніх і внутрішніх поверхонь.

Схема вібраційної очистки деталей з урахуванням дії збурювальної сили наведена на рис. 3. Збурювальна сила створюється віброзбуджувачем із неврівноваженою масою та спричиняє коливання контейнера у горизонтальному і вертикальному напрямках. У результаті робоче середовище переходить у стан активного перемішування, а деталі та частинки наповнювача отримують відносне переміщення.

Ефективність очистки залежить від інтенсивності коливань. За недостатнього прискорення деталі й наповнювач рухаються разом із контейнером, тому процес очищення майже не відбувається. При достатній інтенсивності частинки наповнювача зміщуються, ковзають і ударяють по поверхнях деталей, забезпечуючи знімання забруднень.

При прямолінійній траєкторії коливань, показаній на рис. 4 а), робоче середовище переміщується менш інтенсивно, що може спричиняти нерівномірну обробку окремих ділянок деталей. Натомість при круговій або близькій до кругової траєкторії, наведеної на рис. 4 б), у контейнері формується виражений циркуляційний рух. Це покращує перемішування всієї маси, зменшує застійні зони та підвищує рівномірність контакту наповнювача з поверхнями деталей.

Важливе значення має також відносна швидкість руху деталей і частинок робочого середовища. Чим активніше змінюються їхні напрямки переміщення, тим інтенсивнішою є взаємодія та вищою продуктивність очистки. На якість процесу впливають і властивості наповнювача: його форма, розміри, твердість та абразивність, які слід добирати з урахуванням матеріалу, форми й конструктивних особливостей деталей.

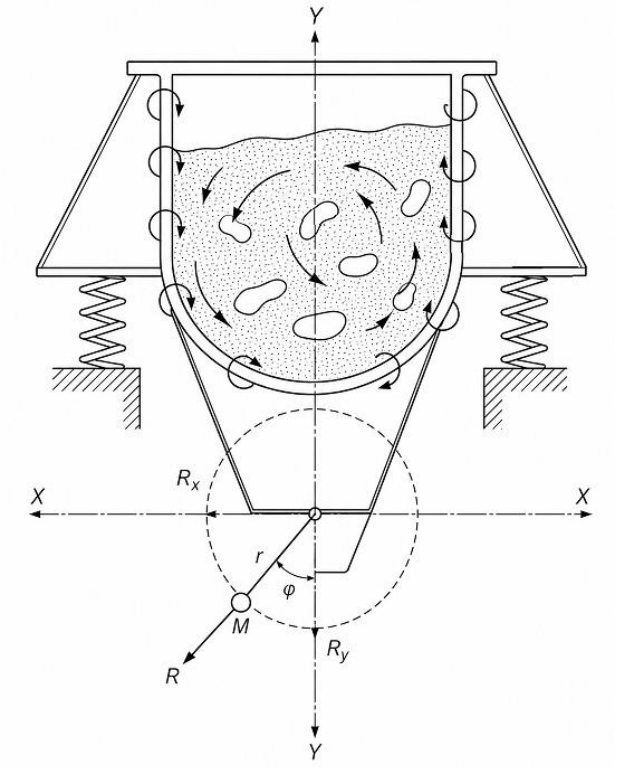


Рис. 3. Схема вібраційної очистки деталей у контейнері з урахуванням дії збурювальної сили та її складових

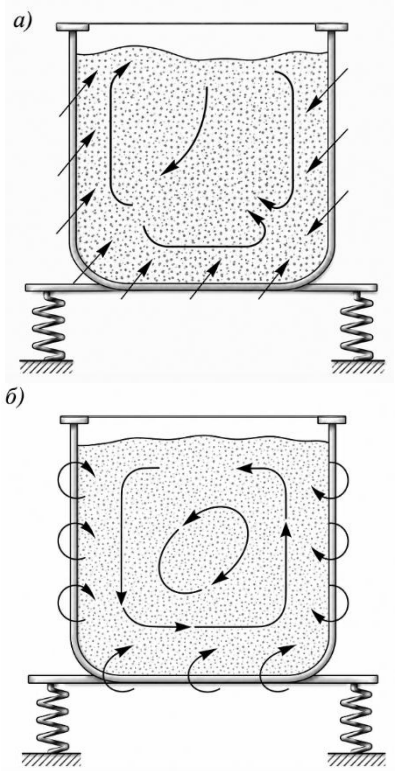


Рис. 4. Характер руху робочого середовища в контейнері:
а) при лінійній траєкторії коливань, б) при круговій траєкторії коливань

Висновки. У роботі розглянуто особливості процесу вібраційної очистки деталей у контейнерній установці та встановлено, що ефективність обробки визначається характером коливального руху робочого органу, інтенсивністю перемішування робочого середовища і властивостями наповнювача. Показано, що за недостатньої інтенсивності коливань деталі та наповнювач переміщуються разом із контейнером, тому відносна взаємодія між ними є незначною, а процес очищення малоефективним.

Визначено, що прямолінійна траєкторія коливань забезпечує простий режим руху робочої маси, однак може призводити до нерівномірної обробки деталей через утворення менш активних зон. Більш ефективною є кругова або близька до кругової траєкторія, за якої в контейнері формується циркуляційний рух частинок наповнювача і деталей. Це сприяє активному перемішуванню, підвищенню кількості контактів із поверхнями деталей та більш рівномірному очищенню зовнішніх і внутрішніх поверхонь.

Отже, для підвищення якості та продуктивності вібраційної очистки доцільно забезпечувати раціональне поєднання горизонтальної і вертикальної складових коливань, достатню інтенсивність руху робочого середовища та правильний вибір наповнювача з урахуванням матеріалу, форми й конструктивних особливостей деталей.

Список використаних джерел

1. Hashimoto, F., DeBra, D. B., & Zhou, M. (2016). Modeling of material removal mechanism in vibratory finishing process. CIRP Annals, 65(1), 325–328. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.011.
2. Mullany, B., et al. (2017). The application of computational fluid dynamics to vibratory finishing processes. CIRP Annals, 66(1), 313–316. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.087.
3. Mediratta, R., Ahluwalia, K., & Yeo, S. H. (2016). High frequency and amplitude effects in vibratory media finishing. Procedia Manufacturing, 5, 616–628. DOI: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.045.
4. Uhlmann, E., Eulitz, A., & Dethlefs, A. (2018). Influence of ceramic media composition on material removal in vibratory finishing. Procedia CIRP, 68, 593–598. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.285.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ВІБРАЦІЙНИХ ВНУТРІШНЬОТРУБНИХ РОБОТІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В РЕЖИМАХ КОВЗАННЯ ТА КОЧЕННЯ

Віталій Корендій, доцент, к.т.н., завідувач кафедри [1] (ORCID: 0000-0002-6025-3013),
Олександр Качур, доцент, к.т.н., доцент [1] (ORCID: 0000-0003-2263-6360),
Максим-Павло Зелінський, аспірант [1] (ORCID: 0009-0008-5885-4750),
Анна Похмурська, к.т.н., асистент [1] (ORCID: 0000-0003-3722-0616),
[1] Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери 12, 79013, Львів, Україна

АНОТАЦІЯ. *У роботі досліджуються кінематичні та динамічні характеристики двох варіантів конструкції вібраційного внутрішньотрубного робота, оснащеного механізмом самогальмування, електромагнітним збудником та механізмами адаптації до діаметра труби. Перший варіант базується на використанні пружних шкребків, що реалізують режим ковзання, і призначений переважно для очищення внутрішніх поверхонь трубопроводів. Другий — удосконалений варіант — застосовує роликові опори, які забезпечують режим кочення для ефективнішого відеомоніторингу стану труб, зварних швів та з'єднань. На основі розроблених спрощених динамічних моделей отримано системи диференціальних рівнянь, розв'язок яких здійснено числовими методами у середовищі Wolfram Mathematica. Віртуальні експерименти та 3D-моделювання проведено у програмному комплексі SolidWorks Motion. Результати демонструють, що перехід від режиму ковзання до кочення дозволяє знизити втрати на тертя та збільшити середню швидкість руху робота з 0.08...0.09 м/с до 0.235...0.245 м/с при співмірних енергетичних затратах.*

Ключові слова: *вібраційний робот; внутрішньотрубний робот; електромагнітний збудник; механізм самогальмування; математичне моделювання; комп'ютерна симуляція; режими руху.*

Вступ. Проблеми технічного обслуговування, моніторингу, інспектування та очищення внутрішніх поверхонь різних трубопроводів, посудин і технологічних магістралей дедалі частіше вирішуються за допомогою спеціалізованих внутрішньотрубних робототехнічних систем. Зважаючи на складні умови експлуатації та обмежений простір, вимоги до таких систем постійно зростають: вони повинні мати високу прохідність, енергоефективність, здатність адаптуватися до змінного діаметра труби та забезпечувати стабільний рух. Застосування вібраційного приводу з інерційними або електромагнітними збудниками є одним із перспективних напрямів розвитку, що дозволяє спростити кінематичну схему, відмовившись від складних трансмісій, та забезпечити високу надійність роботи механізму в агресивних середовищах.

Аналіз літературних джерел. Широкий спектр конструктивних рішень для внутрішньотрубної діагностики включає колісні, гусеничні, шнекові та крокуючі механізми [1]. Роботи типу PIG (pipe inspection gauge) традиційно використовуються для виконання завдань всередині труб [2]. Для забезпечення адаптації роботів до змінних геометричних параметрів магістралей розроблено низку пасивних та активних реконфігурованих механізмів [3].

Перспективним напрямом є використання систем з електромагнітним приводом. Наприклад, оптимальні моделі керування рухом для електромагнітних червоподібних роботів детально досліджено у роботах [4], а особливості відеоінспекції внутрішніх дефектів труб розглядаються багатьма дослідницькими групами [5]. Водночас, впровадження вібраційних приводів у колісні екіпажі внутрішньотрубних роботів потребує подальших досліджень, зокрема в частині оптимізації їх динамічних параметрів. Початкові концепції та дослідження розроблених вібраційних роботів були раніше представлені у працях [6] і [7], де було закладено основу для математичного опису їхньої динаміки.

Мета роботи. Метою даного дослідження є порівняльний аналіз кінематичних і динамічних характеристик двох конфігурацій вібраційного внутрішньотрубного робота: базової моделі (з режимом ковзання) та вдосконаленої моделі (з режимом кочення), а також обґрунтування оптимальних режимів їх роботи (частот і амплітуд збурення) для максимізації швидкості та енергоефективності.

Матеріали і методи. У даному дослідженні застосовано комплексний підхід, що включає розробку спрощених динамічних моделей та виведення систем диференціальних рівнянь для опису умов руху двомасової коливальної системи вібраційного внутрішньотрубного робота. Для розв'язання цих рівнянь та детального аналізу основних кінематичних і динамічних параметрів (переміщення, швидкості, прискорення та споживаної потужності) використовувалося числове моделювання на основі методів Рунге-Кутта 5-го порядку в програмному середовищі Wolfram Mathematica. З метою верифікації отриманих математичних моделей проводилися віртуальні експерименти шляхом комп'ютерної симуляції руху попередньо створених 3D-моделей у програмному комплексі SolidWorks Motion.

Виклад основного матеріалу. Досліджуваний вібраційний робот складається з рами (корпусу), на якій змонтовано важільно-пружні механізми для утримання системи всередині труби. Коливання внутрішньої (збурюючої) маси ініціюються електромагнітним збудником соленоїдного типу. У базовій версії робота (рис. 1) механізми підвісу оснащені шкребками для очищення труби. У вдосконаленій версії (рис. 2) замість шкребків встановлено ролики, що забезпечує режим вільного кочення робота в одному напрямку, в той час як спеціальний важільний гальмівний (самогальмівний) механізм, керований якорем соленоїда, блокує рух у зворотному напрямку.

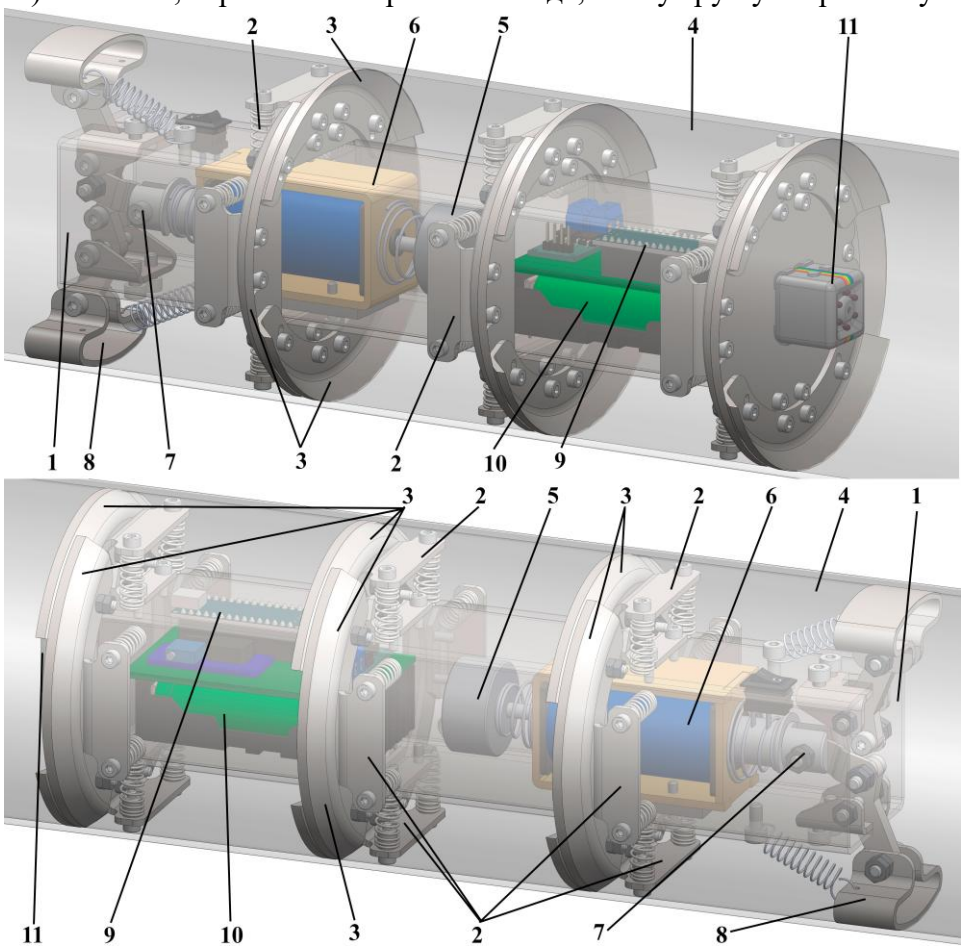


Рис. 1. Базова конструкція внутрішньотрубного робота

Спрощена динамічна модель внутрішньотрубного робота базується на його представленні як двомасової коливальної системи (рис. 3). Маса m_1 відповідає масі корпусу робота, маса m_2 – внутрішньому (збурюючому) тілу. Рух системи описується узагальненими координатами x_1 (для корпусу) та x_2 (для збурюючої маси).

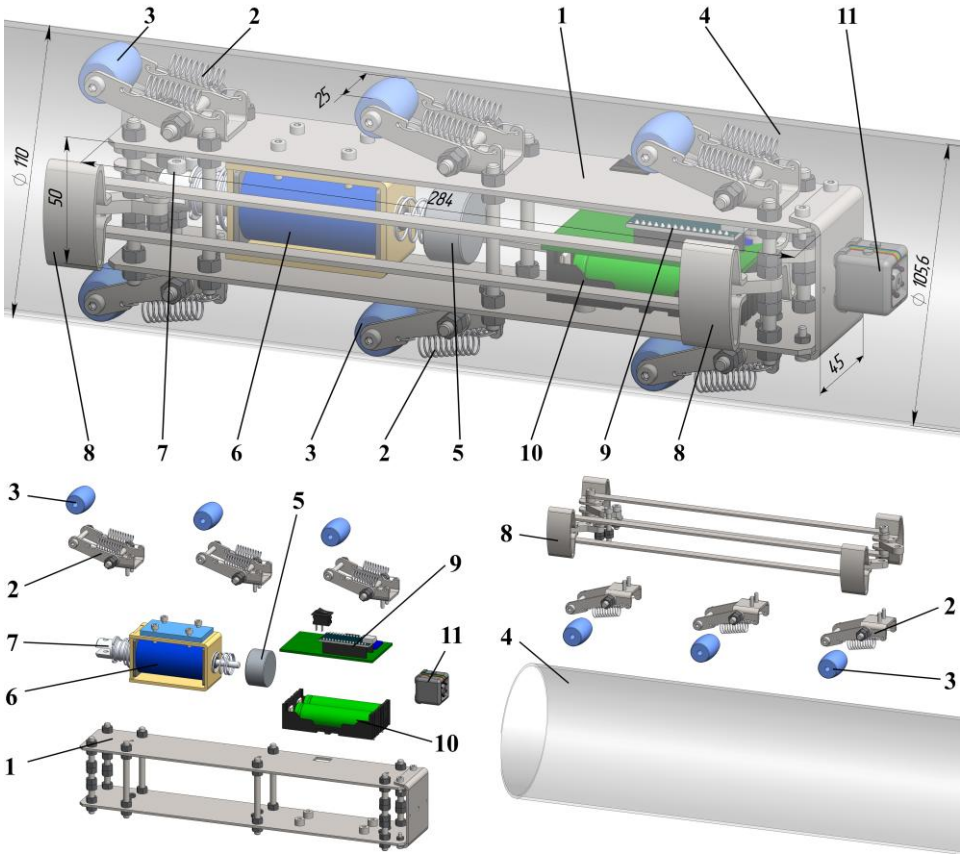


Рис. 2. Удосконалена версія внутрішньотрубного робота

Математична модель руху базується на такій системі диференціальних рівнянь:

$$(m_1 + m_2)\cdot \ddot{x}_1 + (x_1 - x_2)\cdot k_{123} = F_{ij}(t) - F_{br}(t);$$

$$m_2 \cdot \ddot{x}_2 + (x_2 - x_1)\cdot k_{123} = -F_{ij}(t),$$

де k_{123} – зведена жорсткість пружної системи механізму самогальмування; $F_{ij}(t)$ – періодичне гармонічне зусилля збурення, що генерується соленоїдом; $F_{br}(t)$ – сила гальмування.

Для ідеалізованої роботи механізму самогальмування (коли рух вперед вільний, а рух назад заблокований), сила $F_{br}(t)$ моделюється так:

$$F_{br}(t) = \begin{cases} F_{fr}(t), & \text{sign}(\dot{x}_1) \geq 0; \\ F_{ij}(t) - (x_1 - x_2)\cdot k_1, & \text{sign}(\dot{x}_1) < 0. \end{cases}$$

Зусилля збурення має вигляд $F_{ij}(t) = F_i \cdot \sin(2\cdot\pi\cdot f_j \cdot t)$, де F_i – амплітуда сили, f_j – частота збурення. Сила тертя $F_{fr}(t)$, яка протидіє руху (або намаганню рухатися) робота залежить від низки чинників, зокрема, від стану і матеріалів опорних поверхонь, зусилля притискання роликів (скребків), типу тертя (ковзання чи кочення) тощо.

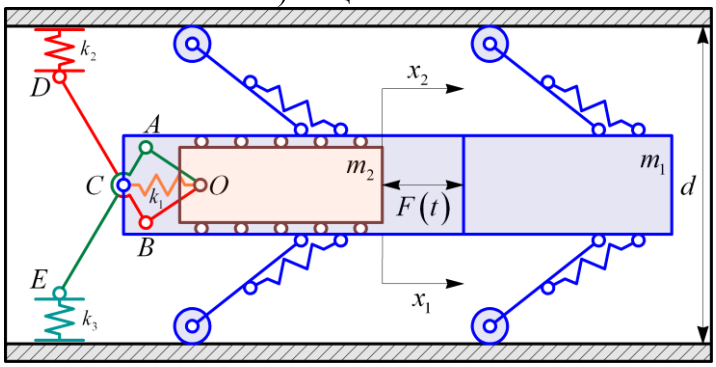


Рис. 3. Розрахункова схема механічної системи робота

Моделювання динаміки здійснювалось шляхом інтегрування систем диференціальних рівнянь за допомогою методів Рунге-Кутта 5-го порядку у середовищі Wolfram Mathematica при нульових початкових умовах. Для базової моделі (режим ковзання) використовувалися маси $m_1 = 1.79$ кг, $m_2 = 0.15$ кг, жорсткість $k = 2000$ Н/м. Для вдосконаленої (режим кочення) – $m_1 = 1.54$ кг, $m_2 = 0.12$ кг, зведена жорсткість $k_{123} = 1800$ Н/м. Власна колова частота вдосконаленої системи становить $\omega \approx 127.16$ рад/с. Додатково була здійснена комп'ютерна симуляція руху розроблених 3D-моделей у середовищі SolidWorks Motion для верифікації математичних моделей.

Обговорення результатів. Числове моделювання дозволило простежити чіткий стрибкоподібний (переривчастий) характер односпрямованого руху робота в обох випадках.

Для базової моделі зі шкребками при дослідженні дорезонансних режимів ($f_1 = 10$ Гц, $f_2 = 15$ Гц, $F_1 = 10$ Н, $F_2 = 15$ Н) максимальна середня швидкість становила близько 0.08...0.09 м/с при 15 Гц та 15 Н. Комп'ютерна симуляція у SolidWorks Motion для цих же умов показала схожий результат: швидкість руху вперед сягала максимуму в 175 мм/с, а відкочування назад становило до 6 мм/с, що в сумі давало середню швидкість близько 82 мм/с (рис. 4).

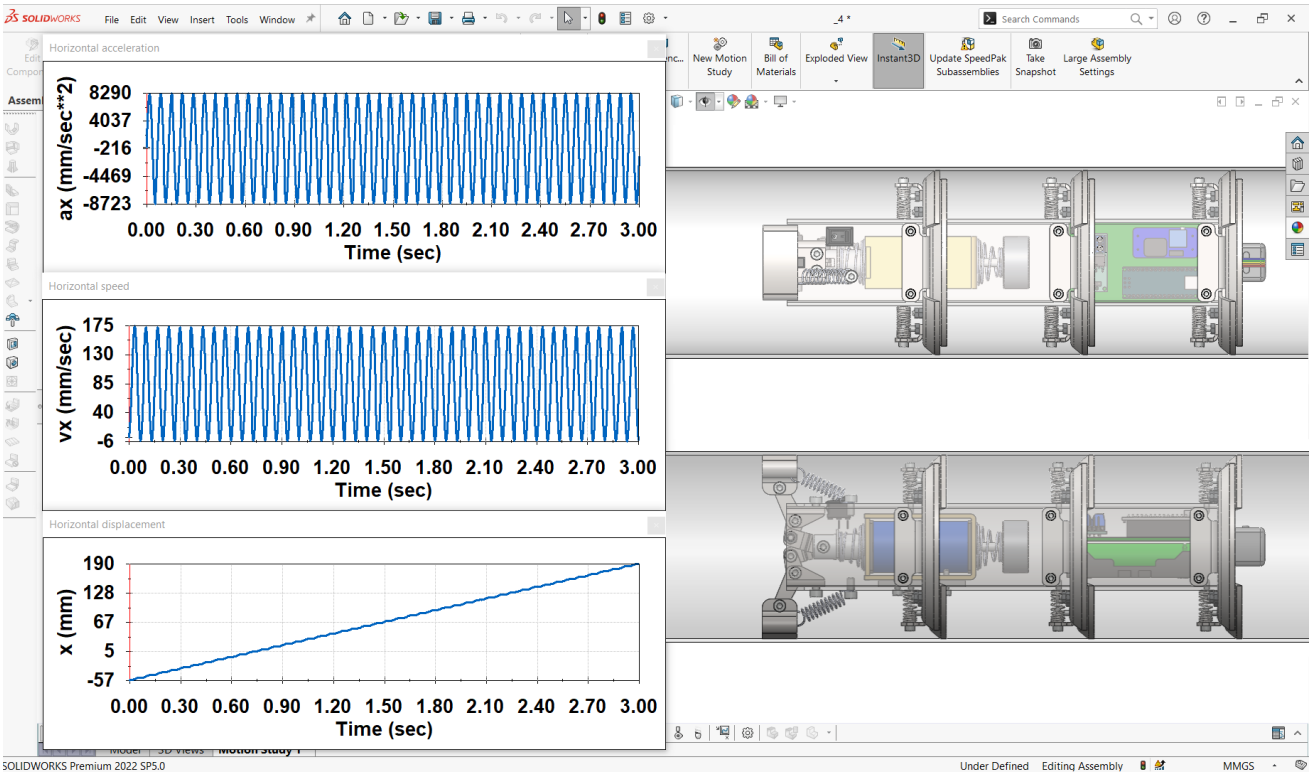


Рис. 4. Результати імітаційного моделювання руху базової версії робота

Вдосконалена модель на роликах продемонструвала значно вищі кінематичні показники (рис. 5). Завдяки заміні шкребків на ролики, робот реалізує режим кочення, де втрати енергії є суттєво нижчими. Дослідження білярезонансних режимів ($f = 10,15,20$ Гц та $F = 10,15,20$ Н) показало, що максимальна середня швидкість сягає 0.235...0.245 м/с при частоті збурення 20 Гц та силі 20 Н. Пікове значення споживаної потужності для цього режиму становить лише близько 6 Вт. Симуляція у SolidWorks підтвердила середню швидкість на рівні 235 мм/с із незначним проковзуванням гальмівного механізму у зворотному напрямку (3...4 мм/с).

Висновки. Проведено порівняльний динамічний аналіз двох конструкцій вібраційних внутрішньотрубних роботів із електромагнітним збудником та механізмом самогальмування. Встановлено, що використання режиму ковзання зі шкребками є виправданим для завдань очищення внутрішніх поверхонь труб, проте обмежує середню швидкість апарата на рівні 0.08...0.09

м/с. Перехід до режиму кочення з використанням роликових механізмів адаптації суттєво підвищує ефективність робота при виконанні відеоінспекції. Забезпечено білярезонансний режим роботи механічної системи, що дозволило збільшити середню швидкість до 0.235...0.245 м/с при частоті 20 Гц та амплітуді сили 20 Н. Напрямками подальших досліджень є створення повномасштабних експериментальних зразків для лабораторних випробувань, перевірка ефективності алгоритмів управління та валідація отриманих теоретичних даних у реальних умовах експлуатації.

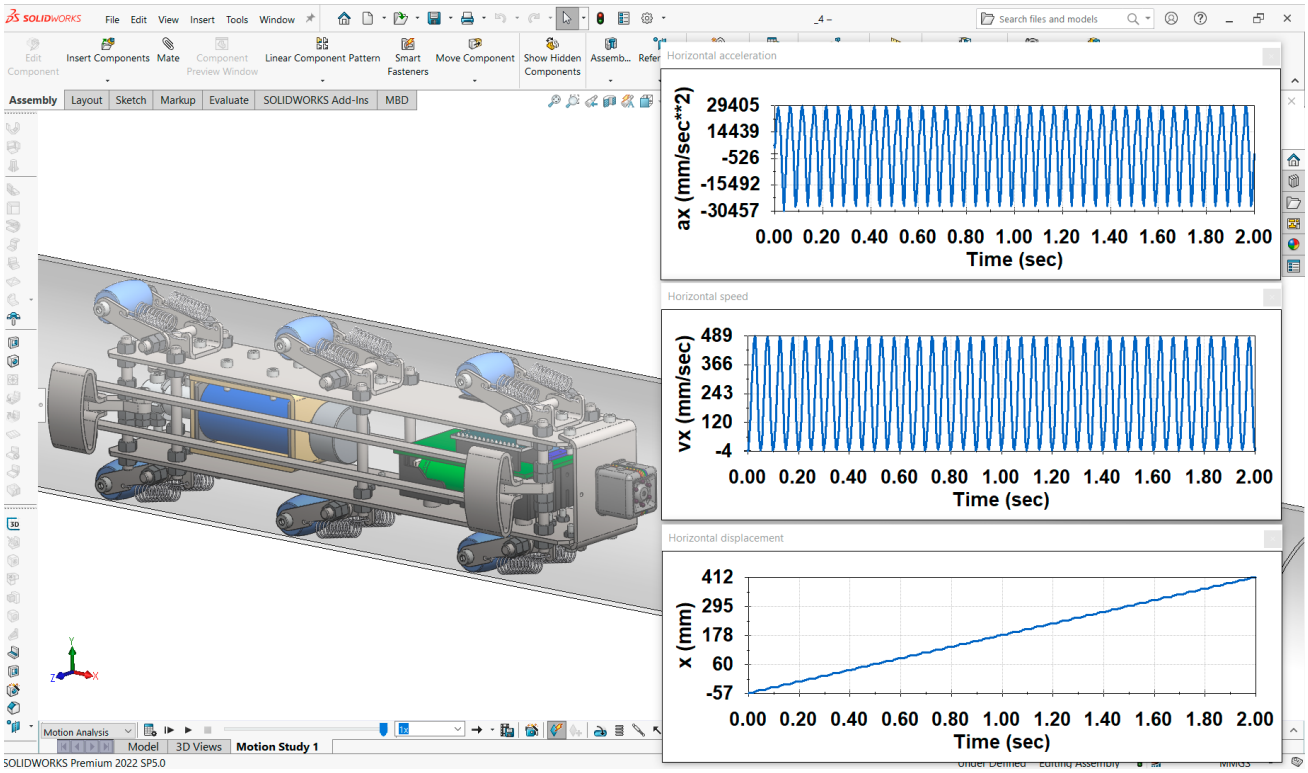


Рис. 5. Результати імітаційного моделювання руху удосконаленої моделі робота

Список використаних джерел

1. Jang, H., Lee, Y., Cho, S., & Kim, J. (2022). A review: technological trends and development direction of pipeline robot systems. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, *105*(3), 59. https://doi.org/10.1007/s10846-022-01669-2.
2. Verma, A., Kaiwart, A., Dubey, N. D., Naseer, F., & Pradhan, S. (2022). A review on various types of in-pipe inspection robot. *Materials Today: Proceedings*, *50*, 1425–1434. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.335.
3. Rusu, C., & Tatar, M. O. (2022). Adapting mechanisms for in-pipe inspection robots: a review. *Applied Sciences*, *12*(12), 6191. https://doi.org/10.3390/app12126191.
4. Xiao, L., Sattarov, R. R., Zhu, Y., & Huang, X. (2022). Optimal sliding mode control of electromagnetic worm-like locomotion systems for in-pipe robots. *International Journal of Dynamics and Control*, *11*(1), 324–337. https://doi.org/10.1007/s40435-022-00972-yc.
5. Colvalkar, A., Pawar, S. S., & Patle, B. K. (2023). In-pipe inspection robotic system for defect detection and identification using image processing. *Materials Today: Proceedings*, *72*, 1735–1742. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.476.
6. Korendiy, V., Kachur, O., Predko, R., Kotsiumbas, O., Brytkovskyi, V., & Ostashuk, M. (2023). Development and investigation of the vibration-driven in-pipe robot. *Vibroengineering Procedia*, *50*, 1–7. https://doi.org/10.21595/vp.2023.23513.
7. Korendiy, V., Kachur, O., Litvin, R., Kotsiumbas, O., & Hrytsun, O. (2024). Simulation of locomotion conditions of an enhanced vibration-driven in-pipe robot. *Vibroengineering Procedia*, *55*, 40–46. https://doi.org/10.21595/vp.2024.24442.

ANALYTICAL MODEL OF TRANSIENT AERODYNAMIC LOADING FOR ASSESSING THE STABILITY OF TOWER CRANE METAL STRUCTURES

Ievgenii Gorbatyuk, Assoc. Prof., PhD, Associate Professor [1] (ORCID: 0000-0002-8148-5323),
Oleksandr Terentiev, Prof., Dr.Sc., Professor [1] (ORCID: 0000-0001-9499-6635),
Volodymyr Sliusar, PhD, Assistant [1] (ORCID: 0000-0003-4332-3144),
[1] Kyiv National University of Construction and Architecture, 31 Povitroflotskyi Ave., 03037, Kyiv, Ukraine

Abstract. *To improve the reliability and safety of high-rise load-lifting mechanisms operating in complex aerodynamic environments, an analytical model for assessing the stability of tower crane metal structures under transient aerodynamic loading has been developed. The spatial crane metal structure is represented as an equivalent single-degree-of-freedom oscillator. Classical viscous friction models have been adapted to simultaneously describe structural hysteresis and aerodynamic damping through a single equivalent coefficient. The decay patterns of free vibrations of the crane tower following a sudden wind impulse have been established. The influence of the logarithmic decrement of damping (δ=0.16-0.18) on the amplitude of structural deflection and the system's relaxation time has been determined. It is shown that full stabilization of the metal structure occurs within 10-12 seconds after the wind impulse ceases. The obtained results enable the optimization of crane stability calculations against progressive collapse under extreme wind conditions, reducing peak calculated stresses by 14-17% compared with purely elastic models, and providing a foundation for material intensity reduction without compromising structural integrity.*

Keywords: *tower crane; metal structure; transient loading; vibration damping; viscous friction; dynamic stability; wind impulse.*

Introduction. The safe operation of tower cranes in dense urban environments requires an accurate prediction of their response to dynamic excitations. The most critical operating conditions involve transient aerodynamic loads, such as sudden squall gusts, which cause intense vibrations of the metal structure and may lead to a loss of global stability. Statistical data indicate that a significant share of tall crane accidents is directly related to unpredictable changes in wind pressure [1, 2]. Conventional calculation methods often assume constant wind excitation and treat the crane structure as a fully rigid body, failing to account for the multi-physics coupling effects and the inertial after-effects that arise following a sudden wind impulse [3]. Consequently, the system's ability to dissipate energy—its damping capacity—becomes the decisive factor in preventing resonance and progressive collapse [4].

Analysis of recent research and publications. The dynamic response of tall structures to stochastic wind loading is a highly active area of global research. Recent studies [1, 2] examine in detail the stochastic nature of wind action, highlighting the secondary excitation effects of flexible tower jib vibrations on load swing and metal structure fatigue life. Advanced active vibration control methods, such as the use of bi-directional tuned mass dampers to stabilize crane towers, are addressed in [3], demonstrating significant reductions in peak tower-top acceleration. Experimental and numerical methods for determining aerodynamic forces on lattice structures are effectively presented in [4].

The fundamental physical aspects of energy dissipation and structural hysteresis in steel materials under dynamic loading are thoroughly investigated in [5]. A significant recent contribution is the development of an analytical transient loading model specifically tailored for tower cranes in [6], which underscores the critical necessity of considering transient relaxation processes when assessing overall stability. Furthermore, applied problems of mechanical system motion under power loads, which provide the theoretical foundation for modeling extreme wind gust impacts and system dynamics, are detailed in [7–10].

Objective. The aim of this study is to develop, expand, and scientifically substantiate an analytical model of transient aerodynamic loading that establishes the precise patterns of free vibration decay in tower crane metal structures to ensure their dynamic stability and optimize material use.

Materials and methods. The study employs analytical methods of theoretical mechanics and

mathematical modeling. The three-dimensional metal structure of the tower crane is reduced to an equivalent dynamic system with a single degree of freedom (a linear oscillator). To model the dissipative processes, a viscous friction approach is utilized, wherein the resistance force is proportional to the velocity of deformation. This methodology allows both internal structural hysteresis of the steel members and external aerodynamic drag to be integrated into a single equivalent damping coefficient. The mathematical framework relies heavily on the energy parameters of vibrating mechanical systems adapted from [8, 9], tailored to account for the specific impulse-vibration effects experienced by tall, slender structures [10].

Main results. The differential equation of free damped vibrations of the crane tower tip in the absence of external excitation (immediately after the wind impulse ceases) is described by the following expression:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0. \quad (1)$$

where x is the horizontal displacement of the tip; m is the reduced equivalent mass of the system; c is the coefficient of viscous resistance accounting for combined structural and aerodynamic damping; and k is the bending stiffness of the crane tower.

Conversion to the normalized form of the equation isolates the critical damping parameter n and the natural angular frequency p:

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + p^2 x = 0, \quad (2)$$

The general solution for the case of small resistance (n < p) defines the time-dependent displacement law of the system:

$$x = Ae^{-nt}\cos(p_1 t + \alpha) \quad (3)$$

where p_1 is the angular frequency of the damped vibrations, while A (initial amplitude) and α (initial phase) are constants depending strictly on the initial deflection and velocity of the tower under the preceding wind gust.

For the steel lattice structures typical of modern tower cranes, the logarithmic decrement of damping (δ) plays a decisive role in energy dissipation. Based on fundamental research on internal friction and hysteresis in structural nodes [5], δ for such systems equals 0.16–0.18. The energy dissipation process and the exponential decay of the structural vibrations are graphically represented in Fig. 1.

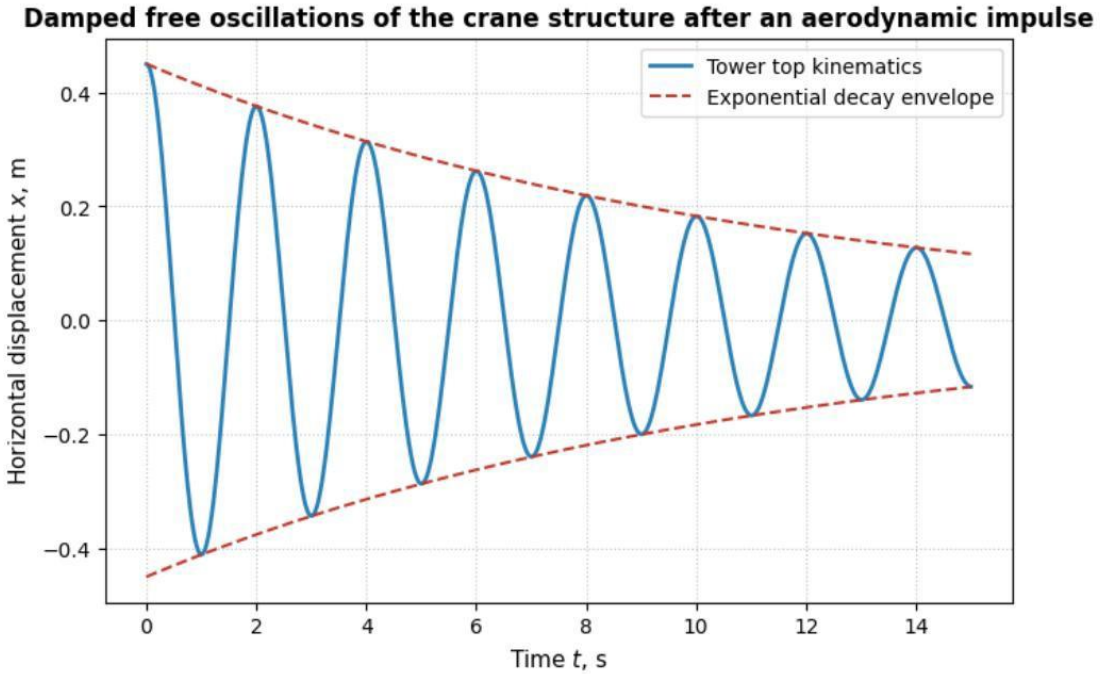


Fig. 1. The energy dissipation process in the metal structure

Discussion. Analysis of the expanded analytical model and visualization of the transient process (Fig.

1) allows the key parameters of the crane's structural dynamic stability to be clearly established. It has been analytically proven that, with normative structural damping (δ=0.16-0.18), the amplitude of the tower vibrations exponentially decreases to a safe, operable level within 10–12 seconds after the wind impulse completely ceases.

This finding confirms recent hypotheses [6] regarding the absolute necessity of accounting for relaxation time during automated stability monitoring of tall cranes under squall loads. From an engineering perspective, including these dissipative forces in accordance with the proposed differential model directly reduces the calculated peak dynamic stresses in the metal structure by 14–17% compared with conservative, purely elastic models. This provides a robust scientific basis for optimizing the material intensity (weight reduction) of the tower sections at the design stage while fully maintaining the required reliability level, aligning with modern dynamic analysis principles [7].

Conclusions. The proposed analytical model of transient aerodynamic loading, based on a second-order differential equation with equivalent viscous friction, accurately describes the kinetic energy dissipation processes in the spatial metal structures of tower cranes following squall wind gusts.

It has been mathematically demonstrated that the structural hysteresis of the lattice tower plays the predominant role in dissipating energy. The application of a logarithmic decrement of damping δ=0.16-

0.18 allows the exponential decay law of vibration amplitudes to be modeled with high fidelity.

The full stabilization (relaxation) time of a standard tower crane metal structure after an extreme aerodynamic impulse is definitively established at 10–12 seconds. Incorporating these specific dissipative properties into design calculations eliminates the overestimation of dynamic responses, reducing calculated peak stresses by 14–17%, thereby opening pathways for safe and grounded reductions in the material intensity of modern tower cranes.

References

1. Sun, Y., et al. (2026). Nonlinear swing dynamics of tower crane load subject to stochastic wind excitation: A CFD/CSD coupling approach. PLOS One, 21(4). DOI: 10.1371/journal.pone.0342197
2. Wu, J., et al. (2026). Wind-Induced Dynamic Performance and Fatigue Life of a Flat-Jib Tower Crane Across Various Operating Conditions. Buildings, 16(4), 741. DOI: 10.3390/buildings16040741
3. Yang, L., et al. (2025). Wind-induced vibration control for tower cranes based on a rear-mounted, mass-sharing bi-directional tuned mass damper. Wind Energy Science, 16(1), 907-925. DOI: 10.5194/ms-16-907-2025
4. Augustyn, M., et al. (2023). Experimental and Numerical Estimation of the Aerodynamic Forces Induced by the Wind Acting on a Fast-Erecting Crane. Applied Sciences, 13(19), 10826. DOI: 10.3390/app131910826
5. Nazarenko, I., et al. (2022). Doslidzhennia fizychnykh aspektiv rozsiiannia enerhii v materialakh pry statychnomu ta dynamichnomu yikh navantazhenni [Investigation of the physical aspects of energy dissipation in materials under their static and dynamic loading]. Mechanics and Advanced Technologies, 6(1), 70-78. DOI: 10.20535/2521-1943.2022.6.1.260945
6. Gorbatyuk, I., Bulavka, O., Terentiev, O., Borodynia, V., & Sliusar, V. (2026). Development of an analytical model of transient aerodynamic loading for assessing the stability of tower crane metal structures. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(7 (140)), 6-13. DOI: 10.15587/1729-4061.2026.356924
7. Nazarenko, I., et al. (2019). Applied Problems of Motion of Mechanical Systems Under Action of Power Loads [Monograph]. Scientific Route.
8. Nazarenko, I. I., et al. (2024). Determination of energy parameters of vibrating machines for compaction and formation of concrete products according to different power form of load. Strength of Materials and Theory of Structures, 113, 18-28. DOI: 10.32347/2410-2547.2024.113.18-28
9. Slyusar, V. S. (2023). Metodyka vyznachennia enerhii na ushchilnennia betonnoi sumishi [Methodology for determining the energy for concrete mixture compaction]. Proc. VI All-Ukrainian Sci.-Tech. Conf., Poltava, 60-61.
10. Vedmid, V. V. (2025). Rozroblennia vysokoefektyvnoho kombinovanoho impulsno-vibratsiinoho obladnannia dlia formuvannia stinovykh panelei [Development of highly efficient combined impulse-vibrating equipment for the formation of wall panels] (PhD Dissertation). Poltava National Technical Yuriy Kondratyuk University.

RESEARCH OF RELIABILITY PARAMETERS OF THE SPACER PLATE OF A JAW CRUSHER

Ivan Nazarenko professor, doctor of technical sciences, professor [1] (ORCID: 0000-0002-1888-3687),
Yevhen Mishchuk, associate professor, candidate of technical sciences, associate professor[1] (ORCID: 0000-0002-7850-0975) ,
Viktor Nechyporuk, PhD Student[1] (ORCID: 0009-0003-8091-2420),
[1] Kyiv National University of Construction and Architecture, 31 Air Force Avenue, 03037, Ukraine

ABSTRACT. *The object of the study is the spacer plate of a jaw crusher. The jaw crusher is the main machine in the crushing and sorting scheme. An unexpected failure of one of the crusher parts leads to a stop of the entire scheme. One of the important parts of the crusher is the spacer plate, which is in a complex, alternating stress state. The work investigates the reliability parameters of the spacer plate of a jaw crusher in the processes of crushing crushed stone. The calculation of the strength of the spacer plate in existing methods is carried out on the basis of the use of empirical formulas, which lead to an inaccurate reproduction of the failure pattern of machine elements. The problem can be solved by using a combined model, namely the linear damage accumulation algorithm in combination with a finite element model to which the Weibull distribution is added.*

Keywords: *jaw crusher; spacer plate; model; Weibull distribution; parameters; failure; reliability.*

Introduction. The costs of material resources for the process of manufacturing building materials by a crushing machine can generally be divided into two categories, namely for the destruction of the material to the required size and the operation of the machine [1]. Operating costs include machine maintenance, the purpose of which is to maintain the machines in good condition by repairing or replacing worn parts [2]. The destruction of the crusher structural elements can occur due to fatigue wear after some operation or suddenly due to defects in the manufacturing process of the part [3]. The reliability of the crushing machine structural parts depends on a number of factors, as a result of which the solution of such a problem is significantly difficult [4]. Unplanned failure of a part or component of a crushing machine can lead to a decrease in plant productivity, unwanted equipment downtime, which will ultimately lead to significant material costs [5]. The most loaded components of a jaw crusher include crushing plates, bearings, spacer plate, belt, eccentric shaft [6].

Analysis of recent research and publications. In [7] an approach for assessing the reliability is proposed. systems when failure data is missing. The main disadvantage of the work is that only one functional Weibull method was used to determine the reliability parameters, this can lead to inaccuracy of the model, while the shape parameter is assumed to be known in advance. In another work [8], the authors performed an analysis of the reliability of machine tools with numerical program control, where the data between the failure times of the machines are described by a two-parameter Weibull distribution. The disadvantage of the work is the limitation of the data to machines with numerical program control of full models and lack of analysis of operational factors.

Research objective. The aim of the study is to determine the reliability parameters of the jaw crusher spacer plate depending on the characteristics of the working environment and the material of manufacture. This will make it possible to optimize the material costs of operating the crusher and, at the initial design stage, rationally select the parameters of the mechanical mode of the machines depending on the physical and mechanical properties of the material being crushed.

Materials and methods. The object of the study is the spacer plate of a jaw crusher. The hypothesis is accepted in the work that the application of the Weibull functional distribution method in combination with a finite element model of the part for research makes it possible to obtain parameters of the failure durability and fatigue strength of the spacer plate, which reflect the real picture of the process of its loading. It should be noted separately that the combined model, which is indicated above, is supplemented by a physical and mechanical model of the material, which is determined by the applied force to the spacer plate. In the theoretical modeling of the loads on the spacer plate, only the case of the force acting along the axis was considered, which is a corresponding simplification.

Main part. Statistical distributions are designed to model certain behavior. The mathematical function that describes the distribution is the probability density function. The Weibull distribution function can be of three types, according to the number of parameters. Thus, the three-parameter Weibull probability density function is determined based on the dependence

$$f(t)=\frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}}, \quad (1)$$

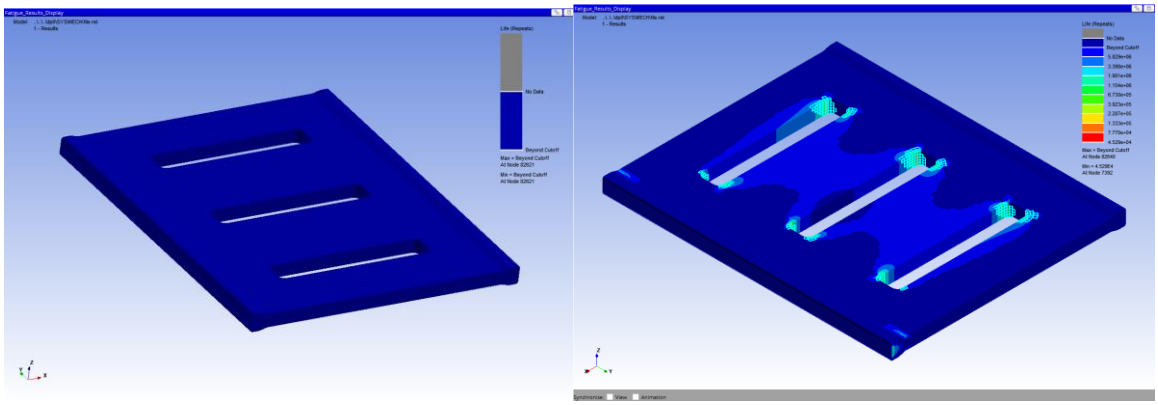
where $f(t) \geq 0$, $t \geq \gamma$, η – the scale parameter or characteristic lifetime, $\eta > 0$; β – the shape parameter (or slope), $\beta > 0$; γ – the location parameter (or failure-free lifetime), $-\infty < \gamma < \infty$.

At the first stage, a static analysis of stresses and strains that may occur in the spacer plate was performed. In [9], it is noted that the load on the spacer plate can be determined based on the dependence

$$F_{sp}=\frac{2\pi\sigma_c^2\left(D^2-d^2\right)L}{12ES_K}\cos\left(\alpha-\frac{\beta}{2}\right), \quad (2)$$

where σ_c = 80 MPa – ultimate compressive strength; E = 55000 MPa – modulus of elasticity; S_K = 0.028 m – travel of the movable jaw; L = 1.24 m – length of the crushing chamber; D = 0.8 m – average diameter of the material entering the crushing chamber; d = 0.21 m – size of the crushed product; α – 20° – angle of engagement; β = 19° – angle of installation of the spacer plate. Based on the accepted values of the calculation parameters, the force that will act on the spacer plate when crushing a material with a strength of 80 MPa will be 1580953 N.

Fig. 1 shows the durability to failure patterns. The Weibull distribution was applied to the nCode calculation model EN Constant, which in this case can assess the durability of the structure based on the change in the stress-strain state. The most dangerous zones in Fig. 1, *b* are highlighted with a grid.

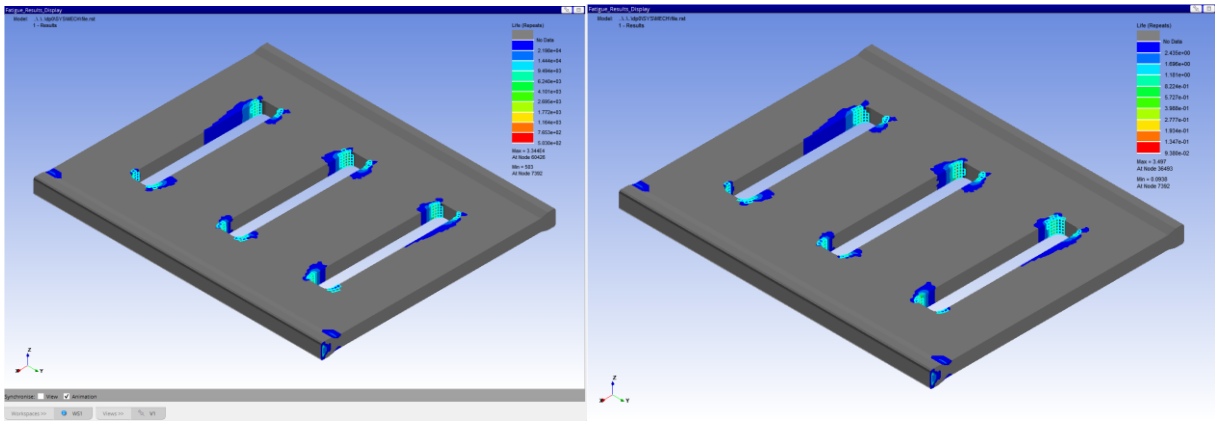


a ***b***

Fig. 1. Results of the calculation of the spacer plate for durability to failure in nCode EN Constant: *a* – SAE 1045-225-ANLD ; *b* – Gray Cast Iron BS 1452 Grade 250

NCode EN TimeSeries dialog box is slightly different from the standard one. Glyph removed Time Series Input, which only works well with data that has the extension .s3t.

Fig. 2 shows a graphical representation of the simulation results. The most dangerous zones in Fig. 2 are highlighted with a corresponding grid. Next to the model there is a scale, on which a red zone is marked, which reflects the minimum durability parameter.



a ***b***

Fig. 2. Results of the calculation of the spacer plate for durability to failure in nCode EN TimeSeries: *a* – SAE 1045-225-ANLD; *b* – Gray Cast Iron BS 1452 Grade 250

Discussion of the results. The proposed model for calculating the spacer plate in the dialog box allowed to determine the fatigue life patterns (Fig. 2). This result is one of the practical recommendations for determining the reliability of structural elements of a similar class of machines, and is implemented for specific materials. The following patterns have been established: 1) the minimum value of the Life parameter for SAE 1045-225-ANLD steel is 503, while for cast iron Grey Cast Iron BS 1452 Grade 250 this parameter is within zero according to the results shown in Fig. 2; 2) for a long service life of the spacer plate and under conditions of crushing materials, which compressive strength may exceed 80 MPa, it is better to use SAE 1045-225- ANLD steel as the spacer plate material, which follows from the previous paragraph; 3) it was determined that the most dangerous zones are the tops of technological holes, according to the results obtained in Fig. 1, 2.

Conclusions. An analysis of the influence of changes in the main parameters of the Weibull distribution on reliability is performed. From the graph of the influence of the parameter β on the probability density of the distribution, it is determined that the limit of its change from 2 and above is appropriate. At β values within 1, the maximum likelihood estimation (MLE) becomes more complicated. The optimal shape of the curve when determining the influence of the coefficient β on the failure rate is a value that does not significantly exceed 1.

References

1. Bearman, R.T. Jaw and Impact Crushers. In SME Mineral Processing and Extractive Metallurgy Handbook; Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.: Englewood, CO, USA, 2019; p. 367.
2. Mishchuk, Y. (2024). Analiz poshyrenyh geologichnyh modelej materialiv. Girnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny (Analysis of common geological models of materials. Mining, construction, road and reclamation machines), (104), 5–14. https://doi.org/10.32347/gbdmm.2024.104.0101 [in Ukrainian].
3. Korman, T., Bedeković, G., Kujundžić, T., & Kuhinek, D. (2015). Impact of physical and mechanical properties of rocks on energy consumption of jaw crusher. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, *51*(2), 461–475. https://doi.org/10.5277/ppmp150208.
4. Gladwell, G. M. L. (2005). Inverse problems in vibration. Kluwer Academic Publishers.
5. Wolny S. (2013) Dynamic behavior of a vibrating jaw crusher for disintegration of hard materials. *Archive of metallurgy and materials. Vol. 58, 3,* 1-4.
6. Fladvad, M., & Onnela, T. (2020). Influence of jaw crusher parameters on the quality of primary crushed aggregates. Minerals Engineering, 151, 106338. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106338.
7. Li, Z., Fu, H., Guo, J. (2025). Reliability Assessment of a Series System with Weibull-Distributed Components Based on Zero-Failure Data. Applied Sciences, 15 (5), 2869. https://doi.org/10.3390/app15052869 .
8. Li, H. L. (2015). A Reliability Analysis of NC Machine Tools Based on the Weibull Distribution. Applied Mechanics and Materials, 741, 763–767. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.741.763
9. Nazarenko, I. I. (1999). *Mashini dlia vyrobnytstva budivel'nykh materialiv: Pidruchnyk [Machines for the production of building materials: Textbook]*. Kyiv: KNUCA. [in Ukrainian].

МОНІТОРИНГ ВИСОТНИХ СПОРУД: ПЕРЕХІД ВІД ЯКІСНОЇ ОЦІНКИ ЗА ШКАЛОЮ MSK-64 ДО ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ PGA

Сергій Щербина, к.ф.-м.н, с.н.с., сд[1], (ORCID: 0009-0009-5866-1411),
Василь Мостовий, д. ф.-м. н., с.н.с[2]., (ORCID: 0000-0002-1759-1893),
Михайло Довбнич, д.г. н., професор[3], (ORCID: 0000-0001-9167-4630),
Вячеслав Егупов, к.т.н, н.с[4].,(ORCID:0000-0001-5093-6948),
Анаталій Фещенко, пров. інж.[1] ,

[1]Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, пр Палладіна, 32, м. Київ, Україна.
[2]Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Чоколівський бульвар, 13, м. Київ, Україна.
[3]Національний ТУ «Дніпровська політехніка», пр. Д.Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна.
[4]Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Одеса, Україна.

АНОТАЦІЯ. *Традиційна оцінка сейсмічної інтенсивності нової забудови в нашій країні за шкалою MSK-64 базується на візуальних спостереженнях, що є суб'єктивним методом. Для забезпечення безпеки об'єктів критичної інфраструктури та сучасних висотних будівель в Україні необхідно впроваджувати інструментальний метод оцінки на основі пікового прискорення ґрунту (**PGA**). Представлено результати наступної роботи– на одну добу на нову точку кожного поверху встановлювався прецизійний лазерний вимірювач вертикальної компоненти зміщення, записи якого зберігалися для подальшої математичної обробки. Після детальної аналітики структури отриманих записів по частоті, фахівцями вибиралися ті конкретні значення частот і амплітуд, які мали максимальне значення для даної області спостереження та характеристик будівлі.*

Ключові слова: *сейсмічна інтенсивність; MSK-64; пікове прискорення ґрунту.*

Вступ. В Україні в нормативні документи ДБН для оцінки безпеки будинків використовується не тільки застарілий метод MSK-64. Окрім цих проблем існує і інша — це заниженість цієї шкали в Україні для висотних будинків на 1.5–2 бали з причин домовленості комерційних організацій забудовників, яким не вигідно вкладати значну кількість грошей у захист будинків. Так, на рис. 1,2 показано стан будинків нової забудови, які вже є проблемним за властивостями власної конструкції — стіни дуже тонкі, що зроблено для мінімізації фінансових витрат.

Рис.1. Тріщини у стінах проблемних будинків, у міцність яких вкладено недостатньо ресурсів.

Рис.2. Проблемна забудова з недостатньою міцністю власної конструкції.

Зображення висотної будівлі на етапі будівництва (рис.2), де чітко видно залізобетонний каркас та відносно тонкі зовнішні стіни (заповнення прорізів). Це наочно ілюструє тезу про використання полегшених конструкцій у сучасному висотному будівництві з метою економії матеріалів. Такі конструкції мають низьку власну жорсткість, що робить їх критично залежними від точності

сейсмічних розрахунків. Саме тут перехід від описової шкали **MSK-64** до інструментальних показників **PGA** та використання волоконно-оптичного моніторингу стає вирішальним для забезпечення реальної безпеки мешканців.

Аналіз літературних джерел. В Україні також було проведено низку досліджень щодо переходу від описової шкали MSK-64 до інструментальних показників PGA. Нижче наведено перелік ключових публікацій, присвячених аналізу пріоритетності використання MSK-64 або інструментальних параметрів PGA для оцінки сейсмічної небезпеки в умовах України.

1. ***Варіації інтегрального коефіцієнта посилення ґрунтами сейсмічних коливань на території Києва*** [1]

- **Результати для Києва:** Автори зазначають, що згідно з новими змінами до ДБН В.1.1-12:2014, для висотного будівництва (класи СС2, СС3 вище 73,5 м) дозволили використовувати карту «В» замість карти «С».
- **Важливий аргумент:** Це фактично перевело Київ **із 6-бальної у 5-бальну зону** для забудовників. Стаття прямо називає використання таблиці 6.5 ДБН для перерахунку інтенсивності в PGA **«некоректним»**, оскільки прямої залежності між ними не існує.

2. ***Seismic Hazard Assessment of Ukraine*** [2]

- **Результати для Одеси:** В Одесі розрахункова інтенсивність за картами ЗСР-2004 становить **7–8 балів**. Однак у публікаціях часто піднімається питання, що реальні значення PGA (прискорення), які фіксуються інструментально від зони Вранча, можуть значно перевищувати ті, що закладені в «паперові» розрахунки за шкалою MSK-64.

3. ***Фундаментальна стаття про перехід на Єврокоди*** [3]

- **Суть:** У статті обґрунтовується, що головним недоліком сейсмічного районування України є використання інтенсивності (MSK-64) замість фізичних параметрів руху ґрунту (**PGA**, швидкість, зміщення). Це підтримує вашу ідею, що 99% робіт в Україні — це лише "малювання" балів за застарілими таблицями без реальних вимірювань.

Мета роботи. Проблема в Україні з професійним підходом до оцінки стану висотних будинків від впливів землетрусів пов’язана не тільки з використанням застарілого методу **MSK-64**. Вона також зумовлена тим, що у 99 % випадків проведення робіт за цим напрямком виконуються лише теоретичні розрахунки значень **MSK-64** для кожного поверху. Такий підхід є недостатньо науково обґрунтованим і не забезпечує експериментальної достовірності результатів.

Матеріали і методи. Для спроби вирішення цих проблем експериментальним підходом було проведено вимірювальну роботу лазерним сейсометром по фіскації значень **MSK-64** у 16-ти поверховому будинку Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України (Рис. 3) Робота проводилась наступним чином – на одну добу на нову точку кожного поверху встановлювався лазерний вимірювач вертикальної компоненти зміщення, записи якого зберігалися. Після аналітики структури записів по частоті вибиралися ті значення частот і амплітуд, які мали максимальне значення для данної області спостереження Треба також відмітити, що при роботі на 11-му поверсі було зафіксовано значний землетрус, який стався в Іспанії. Це є важливим фактом доказу зростання чутливості кожної точки спостережень з її висотою відносно базової токи в районі фундаменту будинку.

Рис.3. Фото 16-ти поверхового будинку Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України

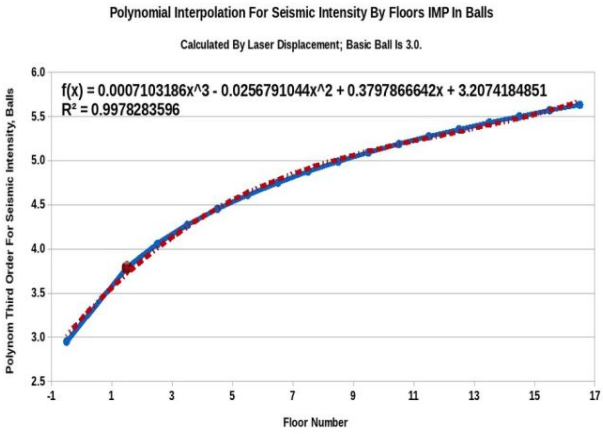


Рис.4. Експериментальні значення MSK-64 по обробці даних з лазерного вертикального сейсмометра

Виклад основного матеріалу. Далі представлено таблицю розрахунків **PGA** по реальним вимірювальним даним, які були отримані на кожному поверсі будинку Інститут металофізики на протязі одного місяця, бо на вимірювання втарачалась як мінімум, одна доба.

Таблиця 1

Значення реальних MSK-64 та розрахованих PGA, які були отримані в процесі моніторингу будинку Інституту металофізики (рис.3)

Поверх	Інтенсивність (MSK-64), бали	PGA (частки g)	PGA (см/с²)	Занижений теорет. PGA (см/с²) (ДБН / Забудовник)	Відношення (Реал / Теорет)	Рівень небезпеки / Похибка
0 (основа)	3.21	0.012	12.0	25.0	0.48	Запас міцності (основа)
1	3.56	0.013	13.5	25.0	0.54	Запас міцності
2	3.85	0.015	15.0	25.0	0.60	Запас міцності
3	4.09	0.018	18.0	25.0	0.72	Запас міцності
4	4.28	0.020	20.0	25.0	0.80	Запас міцності
5	4.45	0.021	21.0	25.0	0.84	Запас міцності
6	4.61	0.022	22.0	25.0	0.88	Запас міцності
7	4.75	0.023	23.0	25.0	0.92	Наближення до межі
8	4.89	0.024	24.0	25.0	0.96	Передкритичний стан
9	5.01	0.025	25.0	**25.0**	**1.00**	**Точка перетину (МЕЖА)**
10	5.12	0.027	27.0	25.0	**1.08**	**Перевищення на 8%**
11	5.22	0.029	29.0	25.0	**1.16**	**Перевищення на 16%**
12	5.32	0.031	31.0	25.0	**1.24**	**Перевищення на 24%**
13	5.41	0.034	34.0	25.0	**1.36**	**Перевищення на 36%**
14	5.49	0.036	36.0	25.0	**1.44**	**Перевищення на 44%**
15	5.57	0.038	38.0	25.0	**1.52**	**Перевищення на 52%**
16	5.64	0.041	41.0	25.0	**1.64**	**НЕБЕЗПЕКА (+64%)**

Обговорення. Абсурдність «константи» значення прискорення по кожному поверху: теоретичний розрахунок цього значення PGA ігнорує динаміку будівлі, вважаючи, що прискорення на 16-му поверсі таке саме, як і на 1-му. ***Це суперечить законам фізики та інженерної механіки.***

- **Зона ризику:** Починаючи з **9-го поверху**, будівля виходить за межі розрахункової безпеки. На 16-му поверсі навантаження стає на **64% вищим**, ніж передбачено проектом забудовника по існуючим нормам ДБН.
- **Необхідність PGA:** Таблиця доводить, що оцінка за шкалою MSK-64 «взагалі для міста» не працює для висоток. Потрібен лише інструментальний PGA на кожному поверсі.

Висновки. Проведена робота показала, що інструментальні поверхові сейсмологічні спостереження дозволяють оцінити коефіцієнти підсилення спектральних частот у спектрах відгуку, у тому числі і посилення PGA. Це важливий крок у комплексі з чисельними розрахунками будівель на сейсмостійкість, але для визначення абсолютних значень PGA для певних періодів повторюваності землетрусів, потрібна інформація о нормативній сейсмічності майданчика не в балах за шкалою MSK-64, а параметрах прискорення руху грунту (PGA) – міжнародно прийнятої характеристики. Це одна з причин побудови у найближчому майбутньому національних карт загального сейсмічного районування України у PGA. Проведені дослідження показують, що використання параметрів **PGA** у поєднанні з волоконно-оптичним моніторингом забезпечує об'єктивну діагностику технічного стану сучасних споруд. Це дозволяє оперативно оцінювати ризики після сейсмічних подій або техногенних впливів без суттєвих фінансових витрат, що є критично важливим для відновлення інфраструктури України.

Список використаних джерел

1. Kendzera, O. V., & Semenova, Yu. V. (2021). Variatsii intehralnoho koefitsiienta usylennia gruntamy seismichnykh kolyvan na terytorii Kyieva [Variations of the integral coefficient of amplification of seismic vibrations by soils in Kyiv]. Geofizicheskii Zhurnal, 43(1), 114–135. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225543 [in Ukrainian].
2. Yegupov, V., Kendzera, O., Egupov, K., & Semenova, Y. (2014). Seismic hazard assessment of Ukraine. Journal of Earth Science and Geotechnical Engineering, 4(3), 53–64.
3. Kendzera, O. V., Nemchynov, Yu. I., Yehupov, V. K., & Bambura, A. M. (2012). Perspektyvy perekhodu na yevropeiski standarty — osoblyvosti Yevrokodu-8 [Prospects for transition to European standards: Features of Eurocode 8]. Budivelni konstruktsii, 76, 14–22. [in Ukrainian].

ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ АЛГОРИТМІВ В СИСТЕМАХ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Богдан Трощинський, к.т.н., доцент, доцент[1] (ORCID: 0000-0002-7421-7312),
Вадим Луценко, к.т.н., доцент, доцент [1] (ORCID: 0000-0002-9727-5574),
Ольга Бондарчук, к.т.н., доцент, доцент[1] (ORCID: 0000-0003-1893-1893),
Микола Самойленко, асистент[1] (ORCID: 0000-0001-9410-6962),
[1]Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

Анотація. *З метою підвищення достовірності діагностики стану електричних машин та скорочення часу на її проведення було проведено аналіз нейромережевих алгоритмів та розроблено на їх основі автоматизовану систему з можливостями предиктивної діагностики. Об'єктом дослідження є електричні машини змінного струму, технічний стан яких оцінюється за електричними діагностичними сигналами. Для формування інформативного вектора діагностичних ознак використано статистичні та спектральні характеристики фазних струмів. Класифікація технічних станів електричних машин здійснюється за допомогою багатошарової штучної нейронної мережі. Ефективність запропонованого підходу підтверджується результатами моделювання та аналізом експериментальних даних. Показано, що використання нейромережевого алгоритму дозволяє автоматизувати процес діагностики, зменшити вплив людського фактора та підвищити достовірність визначення технічного стану електричних машин. Отримані результати можуть бути використані при створенні інтелектуальних систем моніторингу та діагностики в автоматизованих електромеханічних і електроенергетичних установках.*

Ключові слова: *автоматизована діагностика; електричні машини; нейронні мережі; спектральний аналіз; технічний стан; автоматизація.*

Вступ. Електричні машини є ключовими елементами сучасних електромеханічних та електроенергетичних систем. Їх надійна робота визначає ефективність виробничих процесів та безпеку експлуатації обладнання. У зв'язку з цим особливого значення набуває своєчасна

діагностика технічного стану машин, яка дозволяє запобігти аварійним відмовам і зменшити витрати на ремонт.

Традиційні методи діагностики ґрунтуються на аналізі електричних, механічних і теплових параметрів, однак у більшості випадків їх реалізація передбачає участь експерта, що знижує об'єктивність отриманих результатів. Відзначимо, що сучасні тенденції автоматизації вимагають переходу до інтелектуальних систем діагностики, здатних працювати в реальному часі без участі людини.

Перспективним напрямом є використання нейромережевих алгоритмів, які дозволяють ефективно аналізувати складні багатовимірні дані та автоматично класифікувати технічні стани електричних машин.

Аналіз літературних джерел. Сучасні методи діагностики електричних машин можна умовно поділити на кілька груп: струмові, вібраційні та теплові.[1]

Струмові методи базуються на аналізі фазних струмів і є найбільш зручними для практичного застосування, оскільки не потребують втручання в конструкцію машини. Проте їх ефективність залежить від режиму роботи, а інтерпретація результатів часто є складною та неоднозначною.

Вібраційні методи характеризуються високою чутливістю до механічних дефектів, однак потребують встановлення додаткових датчиків та складної обробки сигналів. Теплові методи дозволяють виявляти перевантаження та дефекти ізоляції, але мають значну інерційність і не забезпечують ранньої діагностики.

У ряді досліджень [1,2] показано, що класичні підходи мають обмежені можливості автоматизації та не враховують нелінійні зв'язки між параметрами. Крім того, в багатьох випадках у прийнятті діагностичного рішення передбачається етап експертного аналізу. Це обґрунтовує доцільність застосування методів штучного інтелекту, зокрема нейронних мереж, які здатні адаптуватися до умов експлуатації та забезпечувати високу точність класифікації.

Мета роботи полягає у розробці автоматизованої систем діагностики електричних машин змінного струму на основі нейромережевого підходу із використанням статистичних і спектральних характеристик фазних струмів.

Виклад основного матеріалу.

Практична ідея роботи полягає у створенні автоматизованої системи діагностики технічного стану електричних машин, у якій прийняття діагностичного рішення здійснюється на основі нейромережевої обробки вимірювальних даних без безпосередньої участі оператора чи експерта. Запропонований підхід орієнтований на практичне застосування в системах автоматизації та моніторингу електромеханічного обладнання.

В якості діагностичних сигналів пропонується використати фазні струми електричної машини, що містять інформацію про наявність як електричних, так і механічних дефектів, а їх вимірювання не потребує втручання в конструкцію обладнання. Функціонування діагностичної системи можна представити як сукупність ряду етапів, що виконуються послідовно.

На першому етапі здійснюється автоматичний збір даних з використанням датчиків струму та аналого-цифрового перетворювача. Отримані цифрові сигнали піддаються фільтрації та нормалізації з метою зменшення впливу шумів і завад.

На наступному етапі виконується обчислення інформативних діагностичних ознак, до яких належать.

- Середньоквадратичне значення фазного струму:

$$I_{RMs} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)dt}\ , \qquad (1)$$

де T – період сигналу.

Зростання значення $\boldsymbol{I_{RMs}}$ може свідчити про перевантаження електричної машини, міжвиткові замикання або порушення механічного стану.

- Спектральні діагностичні ознаки. Амплітудний спектр фазного струму отримується із застосуванням швидкого перетворення Фур'є (FFT) [3]:

$$I_k = \left| \sum_{n=0}^{N-1} i(n) e^{-\frac{j2\pi m}{N}} \right|, \quad (2)$$

На основі спектрального аналізу вводиться коефіцієнт гармонічних спотворень:

$$K_h = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{N} I_k^2}}{I_1}. \quad (3)$$

Даний коефіцієнт характеризує рівень нелінійних спотворень сигналу і є чутливим до дефектів обмоток, ексцентриситету та несправностей підшипників.

Для узагальненої оцінки розподілу енергії сигналу у спектральній області використовується енергетичний показник:

$$E_s = \sum_{k=1}^{N} I_k^2, \quad (4)$$

Зміна значення цього показника відносно номінального режиму дозволяє виявляти відхилення режимів роботи та розвиток дефектів у ранній стадії.

На основі наведених параметрів формується узагальнений вектор діагностичних ознак:

$$x = [I_{RMs}, K_h, E_s, I_2, ..., I_n], \quad (5)$$

який використовується як вхідний сигнал нейромережевого алгоритму діагностики. Вибір запропонованого набору ознак забезпечує компроміс між інформативністю та обчислювальною складністю, що є важливим для реалізації системи в реальному часі.

Сформований вектор діагностичних ознак подається на вхід штучної нейронної мережі, яка виконує класифікацію технічного стану електричної машини. Навчання нейронної мережі проводиться на наборах даних, що відповідають різним режимам роботи, зокрема справному стану та характерним видам дефектів. Результатом роботи нейромережевого алгоритму є автоматичне віднесення поточного стану машини до одного з заздалегідь визначених класів.

Особливістю запропонованої практичної ідеї є те, що всі етапи - від збору діагностичної інформації до формування кінцевого висновку – виконуються в автоматизованому режимі, що дозволяє зменшити вплив людського фактора та підвищити оперативність діагностики. Такий підхід створює передумови для реалізації систем предиктивного технічного обслуговування, а також інтеграції діагностичного модуля до складу автоматизованих систем керування технологічними процесами.

Як базову модель для розв’язання задачі діагностики обрано багатошарову нейронну мережу прямого поширення сигналу (MLP), що є достатньо універсальною та ефективною для задач класифікації технічних станів[3, 4].

Архітектура мережі включає:

- вхідний шар, кількість нейронів якого відповідає розмірності вектора діагностичних ознак;
- один прихований шар;
- вихідний шар, що відповідає кількості класів технічного стану.

Вихідний шар нейронної мережі формує вектор:

$$y = [y_1, y_2, ..., y_m], \quad (6)$$

де $\boldsymbol{m}$ - кількість класів технічного стану.

Кожен компонент $\boldsymbol{y_i}$ інтерпретується як міра належності поточного стану електричної машини до відповідного класу, наприклад: справний стан; початкова стадія дефекту; аварійний стан. Кінцеве діагностичне рішення визначається за принципом максимального вихідного значення.

Навчання нейромережевого алгоритму здійснюється з використанням методу зворотного поширення похибки. Як функцію втрат застосовано середньоквадратичну похибку [3, 4].

Слід зазначити, що у задачах діагностики електричних машин навчання нейромережі має низку особливостей: наявність шуму у вхідних даних; нелінійна залежність між діагностичними ознаками та технічним станом; нерівномірність даних, що проявляється у різній кількості прикладів для різних класів дефектів. На підставі зазначених факторів для даної задачі було обрано

Adam-оптимізатор, що характеризується високою стійкістю до шумів. Обчислення виконуються на компактному цифровому модулі з апаратною підтримкою операцій з плаваючою комою (наприклад, мікроконтролер класу STM32F4), що забезпечує можливість реалізації алгоритму безпосередньо в експериментальній установці.

Висновки. Отримані результати підтверджують доцільність використання нейромережевих алгоритмів у задачах автоматизованої діагностики електричних машин. Поєднання спектрального аналізу фазних струмів із багатошаровою штучною нейронною мережею дозволяє ефективно виявляти як електричні, так і механічні дефекти на ранніх стадіях розвитку.

Запропонований підхід є універсальним та може бути адаптований до різних типів електричних машин шляхом зміни складу діагностичних ознак або параметрів нейронної мережі. Реалізація алгоритму в режимі реального часу створює передумови для впровадження систем предиктивного технічного обслуговування.

Список використаних джерел

1. Vasyliev, V. M. (2018). Diahnostyka elektrychnykh mashyn [Diagnostics of electrical machines]. Tekhnika. [in Ukrainian].
2. Tavner, P. (2008). Condition monitoring of rotating electrical machines. IET.
3. Haykin, S. (2009). Neural networks and learning machines. Pearson.
4. Bishop, C. M. (1995). Neural networks for pattern recognition. Oxford University Press.

ДОСЛІДЖЕННЯ ШУМОВОГО ВПЛИВУ У ВИМІРЮВАЛЬНОМУ КАНАЛІ НА ЯКІСТЬ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В СУШИЛЬНІЙ ШАФІ

Сергій Іносов, к.т.н., доцент, доцент[1] (ORCID: 0000-0001-8305-5514),
Вадим Луценко, к.т.н., доцент, доцент[1] (ORCID: 0000-0002-9727-5574),
Андрій Запривода, к.т.н., доцент, доцент[1] (ORCID: 0000-0001-9171-9325),
Олександр Гаврюков, д.т.н., професор, професор[1] (ORCID: 0000-0002-6377-4180),
[1]Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

Анотація. *Основною задачею більшості систем автоматичного регулювання є автоматичне підтримування заданої температури за рахунок керування нагрівом. Як правило, використовується принцип регулювання за відхиленням від завдання з контуром негативного зворотного зв'язку. Якість регулювання оцінюється за динамічними критеріями. Основним є час регулювання, який необхідно мінімізувати за рахунок правильного вибору алгоритму регулювання і налаштування його параметрів. Перевірялась можливість зниження рівня зашумленості керуючого впливу (потужності нагріву) за рахунок згладжування шуму в каналі вимірювання температури. В якості згладжуючого фільтру був вибраний алгоритм експоненційного згладжування (аперіодичний блок першого порядку). Дослідження проводилось експериментально. Спроби зменшити зашумленість керуючого впливу шляхом згладжування сигналу в каналі вимірювання температури виявились невдалими. Таким чином, використання додаткового згладжування сигналу в каналі вимірювання температури для систем автоматичного регулювання з ПІД алгоритмом не рекомендується. При необхідності, зменшити зашумленість керуючого впливу можна, тільки збільшивши сталу часу основного згладжування в диференціюючому каналі ПІД регулятора, але з неминучим погіршення якості регулювання*

Ключові слова: *автоматичне регулювання; ПІД регулятор; температура; похибка; вимірювання; керуючий вплив; зашумленість; згладжування.*

Вступ. Більшість систем автоматичного регулювання використовуються в теплових технологічних процесах [1, 2]. Основною задачею автоматики в цьому випадку є автоматичне підтримування заданої температури за рахунок керування нагрівом. Якість регулювання оцінюється

за динамічними критеріями. Основним є час регулювання, який треба мінімізувати за рахунок правильного вибору алгоритму регулювання і налаштування його параметрів.

В регулюючих контролерах зазвичай використовується пропорційно-інтегрально-диференціюючий (ПІД) алгоритм регулювання, тому що він близький до теоретично досяжного ідеалу для реальних теплових об'єктів [2].

Наявність в ПІД-регуляторі диференціюючого каналу, який підсилює високочастотні завади (в тому числі, похибки вимірювання регульованої величини), призводить до сильного зашумлення керуючого впливу [3], що ускладнює нормальну роботу виконавчого механізму і регулюючого органу і збільшує їх знос. Вказана проблема досліджується в даній роботі експериментально, на лабораторній системі автоматичного програмного регулювання температури сушильної шафи.

Мета роботи полягає у дослідження шумового впливу, що виникає у вимірювальному каналі, на якість регулювання температури в сушильній шафі.

Виклад основного матеріалу. Контур регулювання включає об'єкт регулювання з передаточною функцією W0(p) і регулятор з передаточною функцією W1(p). [2] Передаточні функції на базі перетворення Лапласа є математичними моделями, якими традиційно описують динамічні властивості лінійних інерційних стаціонарних об'єктів [1].

Типова передаточна функція теплового об'єкту має вигляд [2, 3]:

$$W_0(p) = \frac{K \cdot e^{-p \cdot T_3}}{(T_1 p + 1) \cdot (T_2 p + 1)} \tag{1}$$

де К – статичний коефіцієнт передачі об'єкту, T_3 – час запізнення, T_1, T_2 – перша і друга сталі часу об'єкту, р – комплексний аргумент.

Для лабораторної експериментальної установки чисельні значення отримані з допомогою процедури ідентифікації динамичних параметрів объекту регулювання за результатами експерименту: К = 1.1 град./%, Т1 = 1,02 час, Т2 = 0.064 час, Т3 = 0.036 час. [4].

Передаточна функція традиційного ПІД-алгоритму регулювання, що зв'язує розугодження з керуючим впливом має виглад:

$$W_1(p) = K_p \cdot \left(\frac{T_d \cdot p}{\tau \cdot p + 1} + 1 + \frac{1}{T_i p} \right) \tag{2}$$

Основні параметри налаштування ПІД-регулятора: K_p – коефіцієнт пропорційності, T_i – стала часу інтегрування, T_d– стала часу диференціювання визначаються з умови максимальної швидкодії за наступними формулами: [3]

$$K_p = 0.5 \frac{T_1 + T_2}{K \cdot T_3} \quad (3), \qquad T_d = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 + T_2} \quad (4), \qquad T_i = T_1 + T_2 \quad (5)$$

Формули (3)-(5) отримані з умови максимальної швидкодії (мінімальності часу регулювання).

Четвертий параметр τ визначається допустимим коефіцієнтом підсилення високочастотних шумів диференціюючим каналом N = Td/τ. [3] Для слабо зашумлених об'єктів регулювання значення N інколи можна доводити до 10. Для об'єктів з підвищеним рівнем зашумленості значення N доводиться знижувати, інколи аж до одиниці. В останньому випадку диференціюючий канал стає недіючим і використовується ПІ алгоритм регулювання (без диференціюючого каналу). Але при цьому суттєво зменшується швидкодія автоматичного регулювання. Для експериментальної установки розрахунок за вищенаведеними формулами дає наступні чисельні значення параметрів настроювання ПІД регулятора: K_p = 13.5 град.%, T_i = 1.03 год., T_d = 0.06 год., τ = 0.01 год. (N = 6).

У ході проведеного дослідження перевірялась можливість зменшення рівня зашумленості керуючого впливу за рахунок додаткового згладжування шуму у вимірювальному каналі температури [4]. В якості згладжуючого фільтру вибраний алгоритм експоненційного згладжування (аперіодичний блок першого порядку) з передаточною функцією:

$$W_1(p) = \frac{1}{\theta \cdot p + 1} \tag{6}$$

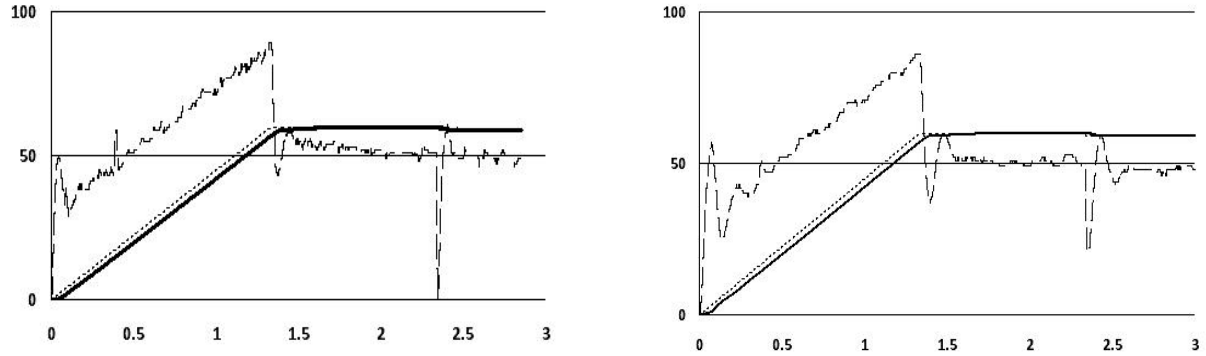
де θ - стала часу згладжування.

Алгоритм експоненційного згладжування, не дивлячись на простоту, найкраще підходить для згладжування шуму в контурі негативного зворотнього зв'язку, бо забезпечує мінімальне запізнення корисного сигналу і мінімальне погіршення якості регулювання.

Дослідження проводилось експериментально, з використанням лабораторної системи програмного автоматичного регулювання температури.

Об'єктом регулювання є лабораторна сушильна шафа з електронагрівом В-151. Вимірювання температури виконується з періодом 1с. В якості датчика температури використано цифровий термометр DS18B20, що забезпечує діапазон вимірювання -55..+125^{0}С. Крок квантування за рівнем аналого-цифрового перетворювача складає 0.06 градуса, що пов'язано, в значній мірі, з випадковою похибкою вимірювання. З метрологічної точки зору таку точність вимірювання можна вважати достатньою.

Рис. 1 ілюструє динаміку програмного регулювання температури ПІД алгоритмом без додаткового згладжування в каналі вимірювання температури (θ = 0) та з додатковим згладжуванням (θ = 40с). Графік зміни заданої температури (в градусах) показано точковою лінією. Час (по горизонталі) відкладено в годинах. За 1.3 години задана температура рівномірно піднімається на 60 градусів, а потім залишається незмінною. Суцільною лінією показано графік зміни регульованої температури (в градусах). Він практично точно повторює графік зміни завдання, але з запізненням 4 хвилини. Це запізнення теоретично неможливо усунути. Температура зовнішнього середовища прийнята за нуль відрахунку.



а) б)

Рис.1. Динаміка програмного регулювання температури ПІД: а) алгоритмом без додаткового згладжування (θ = 0); б) алгоритмом з додатковим згладжуванням (θ = 40 сек.)

З порівняння рис. 1-а і 1-б очевидно, що навіть при максимально можливому згладжуванні (θ = 40с), зашумленість керуючого впливу не зменшилась, просто шум став більш низькочастотним. Виявлене явище, коли обробка шуму згладжуючим фільтром не зменшує його середньоквадратичного відхилення, відоме в метрології [1]. Класичним прикладом є дрейф нуля електронного підсилювача. Подальше збільшення θ не має сенсу. По-перше, тоді стала часу додаткового згладжування θ перевищить сталу часу основного згладжування τ в диференціюючому каналі ПІД регулятора (0.01 год. або 36с) і сама стане основною, тобто порушиться оптимальний набір базових параметрів регулятора. По-друге, навіть при θ = 40с, вже помітний негативний вплив додаткового згладжування на динаміку регулювання (зросла коливальність в перехідних режимах).

Висновки. ПІД алгоритм регулювання з оптимальною настройкою придатний тільки для об'єктів з дуже малим рівнем зашумленості. Диференціюючий канал регулятора різко підсилює вхідний шум і він стає помітним і заважаючим фактором на виході, посилюючи знос і порушуючи нормальну роботу виконавчого механізму і регулюючого органу.

Теоретичні висновки підтверджені експериментально, з використанням лабораторної системи програмного автоматичного регулювання температури сушильної шафи.

Спроби зменшити зашумленість керуючого впливу шляхом додаткового згладжування сигналу в каналі вимірювання температури виявилися невдалими. Середньоквадратичне значення шуму на виході регулятора практично не зменшується, просто шум стає більш низькочастотним.

Використання додаткового згладжування сигналу в каналі вимірювання температури для систем автоматичного регулювання з ПІД алгоритмом не рекомендується.

При необхідності, зменшити зашумленість керуючого впливу можна, збільшивши сталу часу основного згладжування в диференціюючому каналі ПІД регулятора. Але ціною цього буде погіршення якості регулювання.

Список використаних джерел

1. Popovych, M. H., & Kovalchuk, O. V. (2007). Teoriia avtomatychnoho keruvannia: Pidruchnyk [Theory of automatic control: Textbook]. Lybid. [in Ukrainian].
2. Trushakov, D., & Kozlovskyi, O. (2021). Avtomatyzovana systema filtratsii zavad pid chas vymiriuvannia temperatury sushylnoi shafy [Automated interference filtering system during temperature measurement of a drying cabinet]. Electronics and Information Technologies, 15, 80–89. [in Ukrainian].
3. Inosov, S. V., & Bondarchuk, O. V. (2018). Zviazok pokhybok vymiriuvannia temperatury z dynamikoiu rehuliuvannia teplovoho obiekta [Relationship between temperature measurement errors and the dynamics of thermal object control]. Upravlinnia rozvytkom skladnykh system, 35, 162–166. [in Ukrainian].
4. Inosov, S. V., & Bondarchuk, O. V. (2023). Analiz mozhlyvykh prychyn pomylkovoi identyfikatsii dynamichnykh parametriv teplovoho obiekta rehuliuvannia [Analysis of possible causes of erroneous identification of dynamic parameters of a thermal control object]. Upravlinnia rozvytkom skladnykh system, 54, 132–137. [in Ukrainian].

МОДЕЛЮВАННЯ ЛОКАЛІЗАЦІЇ АВАРІЙ У РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ МЕТОДОМ TW/TDOA

Антон Васильченко, аспірант [1] (ORCID: 0009-0001-5995-6336),
Вячеслав Гетьман, аспірант [1] (ORCID: 0009-0004-3592-3689),
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна.

***АНОТАЦІЯ**. У роботі досліджено метод локалізації аварій у розподільчих електричних мережах на основі двобічного визначення часу приходу хвиль TW/TDOA. Розглянуто особливості моделювання аварійних режимів у мережах 6–10 кВ у середовищі MATLAB/Simulink. Додатково досліджено вплив параметрів кабельної лінії та частоти дискретизації сигналів на точність локалізації пошкоджень. Запропоновано алгоритм автоматизованого визначення місця пошкодження із застосуванням вейвлет-аналізу для реєстрації моменту приходу перехідної хвилі. Проведено порівняння імпедансного методу та методу локалізації аварій за перехідними хвилями. Отримані результати підтверджують, що використання TW/TDOA забезпечує підвищення точності визначення місця короткого замикання та скорочення часу локалізації аварій. Встановлено, що використання цифрової обробки сигналів дозволяє підвищити ефективність автоматизованої діагностики аварійних режимів у розподільчих електричних мережах. Запропонований підхід може бути інтегрований у сучасні системи моніторингу та Smart Grid.*

***Ключові слова:** розподільчі електричні мережі; TW/TDOA; локалізація аварій; вейвлет-аналіз; MATLAB/Simulink; коротке замикання.*

Вступ. Зростання кількості аварій у розподільчих електричних мережах вимагає використання сучасних методів моніторингу та локалізації пошкоджень. Традиційні імпедансні алгоритми мають значну похибку у складних режимах роботи мережі, тому актуальним є застосування хвильових методів.

Аналіз літературних джерел. Сучасні системи контролю аварій базуються на імпедансних, часових та інтелектуальних методах. Найбільшу точність демонструють методи перехідних хвиль, які використовують аналіз перехідних процесів і високошвидкісну реєстрацію сигналів.

Мета роботи. Метою роботи є моделювання локалізації аварій у розподільчих електричних мережах методом TW/TDOA та оцінка його точності у порівнянні з класичними алгоритмами.

Виклад основного матеріалу. Моделювання виконано у середовищі MATLAB/Simulink для кабельної лінії напругою 10 кВ. Метод TW/TDOA базується на визначенні різниці часу приходу хвиль до кінців лінії. Відстань до місця пошкодження визначається за формулою:

$$x = (L - v\Delta t)/2 \quad (1)$$

де x – відстань до місця аварії; L – довжина лінії; v – швидкість поширення хвилі; Δt – різниця часу приходу сигналів.

$$Z = U/I \quad (2)$$

де Z – аварійний імпеданс; U – фазна напруга; I – струм короткого замикання.

$$\delta = |x_{real} - x_{calc}|/x_{real} * 100\% \quad (3)$$

де δ – відносна похибка локалізації аварії.

$$v = 1/\sqrt{LC} \quad (4)$$

де v – швидкість поширення електромагнітної хвилі; L – індуктивність лінії; C – ємність лінії.

$$\Delta t = t_B - t_A \quad (5)$$

де Δt – різниця часу приходу хвиль до кінців лінії; tA та tB – моменти реєстрації сигналів.

Таблиця 1

Результати моделювання локалізації аварій

Фактична відстань, км	Розрахована відстань, км	Похибка, %
5	5.1	2
8	7.9	1.3
12	12.1	0.8

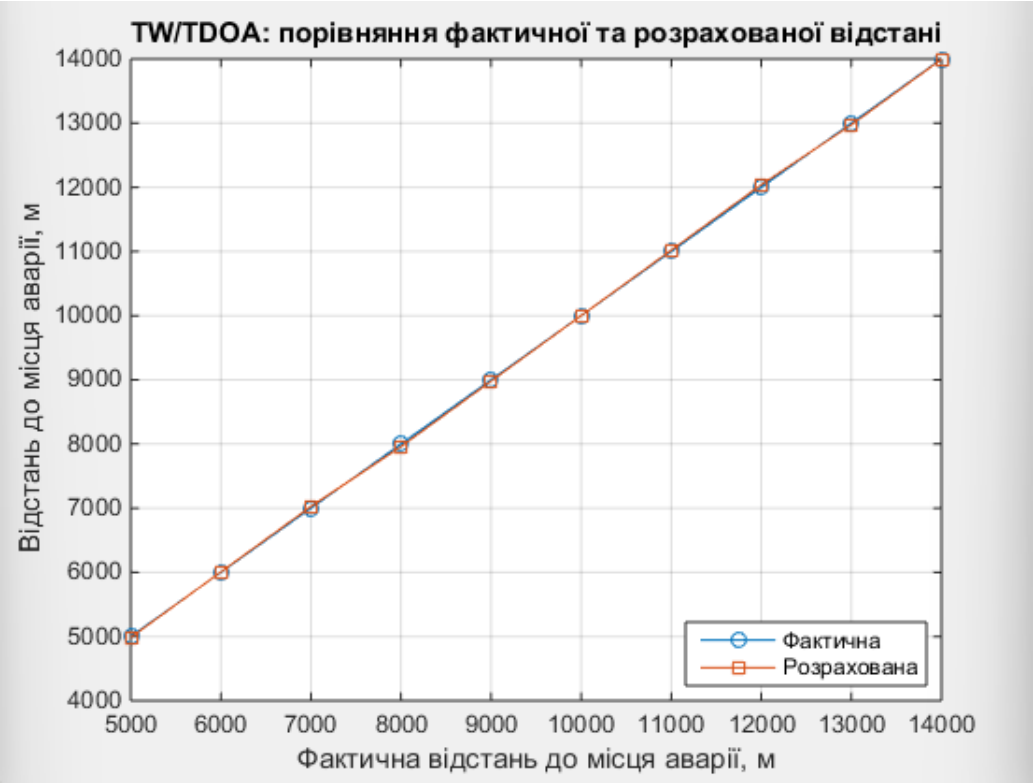


Рис.1. Порівняння фактичної та розрахованої відстані локалізації аварії методом TW/TDOA

У процесі моделювання було сформовано аварійний імпульс, який імітує коротке замикання у кабельній лінії. Для визначення часу приходу хвиль використовувався алгоритм вейвлет-аналізу, що дозволяє виділити високочастотні складові перехідного процесу навіть за наявності перешкод та шумів. Отримані сигнали реєструвалися на двох кінцях лінії, після чого обчислювалася різниця

часу приходу хвилі. Результати дослідження показали, що при зміні місця короткого замикання похибка локалізації не перевищує 1–2 % від довжини лінії. Також встановлено, що точність методу залежить від частоти дискретизації вимірювальної системи та параметрів кабельної лінії. Порівняння із класичним імпедансним методом показало, що хвильовий підхід забезпечує кращу швидкодію та стабільність результатів у складних аварійних режимах. Отримані результати підтверджують перспективність використання TW/TDOA для побудови сучасних систем автоматизованого моніторингу та діагностики технічних об'єктів електроенергетики. Запропонований алгоритм може бути інтегрований у системи SCADA та цифрові підстанції Smart Grid для оперативного реагування на аварійні ситуації.

Практичне значення запропонованого підходу полягає у можливості його використання в автоматизованих системах диспетчерського контролю електричних мереж. Використання алгоритмів TW/TDOA дозволяє зменшити час пошуку місця аварії, скоротити тривалість відключення споживачів та підвищити рівень надійності електропостачання. Крім того, використання сучасних методів аналізу сигналів створює передумови для подальшої інтеграції систем моніторингу з технологіями цифрових підстанцій та Smart Grid.

У ході моделювання розглянуто декілька типових аварійних режимів: однофазне коротке замикання на землю, двофазне пошкодження та трифазне коротке замикання. Для кожного режиму визначено часові характеристики сигналів та проведено аналіз похибки локалізації. Результати показали, що найбільша точність досягається при використанні високочастотних компонентів сигналу.

Додатково було досліджено вплив параметрів кабельної лінії на точність локалізації аварій. Зі збільшенням довжини лінії зростає значення часової затримки між сигналами, що позитивно впливає на точність обчислення координати пошкодження. Водночас збільшення перехідного опору у місці короткого замикання може спричиняти спотворення форми хвилі та ускладнювати визначення моменту її реєстрації.

Дослідження показало, що використання хвильових методів локалізації аварій є особливо ефективним для кабельних ліній середньої напруги, де важливо забезпечити швидке визначення місця пошкодження та мінімізувати час відключення споживачів. У процесі моделювання враховувалися параметри індуктивності, ємності та активного опору лінії, які впливають на швидкість поширення електромагнітних хвиль і форму перехідного процесу. Отримані результати підтвердили, що алгоритм TW/TDOA забезпечує стабільну роботу навіть при зміні параметрів мережі та різних типах коротких замикань. Крім того, застосування цифрової обробки сигналів і вейвлет-аналізу дозволяє підвищити точність реєстрації моменту приходу хвилі та зменшити вплив високочастотних перешкод. Це створює передумови для впровадження запропонованого методу у сучасних автоматизованих системах моніторингу розподільчих електричних мереж.

Висновки. У результаті дослідження встановлено, що метод TW/TDOA забезпечує високу точність локалізації аварій у розподільчих електричних мережах. Використання вейвлет-аналізу дозволяє підвищити точність визначення моменту приходу хвилі та скоротити час локалізації пошкодження.

Список використаних джерел

1. He, Z., Fu, L., Lin, S., & Bo, Z. (2010). Fault detection and classification in EHV transmission line based on wavelet singular entropy. IEEE Transactions on Power Delivery, 25(4), 2156–2163. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2053723
2. Tabatabaei, A., Mosavi, M.-R., & Rahmati, A. (2012). Fault location techniques in power system based on traveling wave using wavelet analysis and GPS timing. Przegląd Elektrotechniczny, 88(6), 347–350.
3. Schweitzer, E. O., & Guzmán, A. (2019). Modern power system protection. Pullman: SEL Publishing. 350 p.
4. MathWorks. (2024). MATLAB Simulink User's Guide. Available from: https://www.mathworks.com/products/simulink.html
5. Дяченко О. В. (2025). Передача інформації в електроенергетиці: засоби, протоколи, стандарти, кібербезпека : навчальний посібник. Харків : НТУ «ХПІ». 256 с. [in Ukrainian].
6. Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики : матеріали XXII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених і студентів. (2025). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського. [in Ukrainian].

ФОРМАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБКИ ПРИНЦИПОВИХ СХЕМ ТА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ СЛІДКУЮЧОГО ТИПУ

Олександр Узунов[1]
[1]НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

АНОТАЦІЯ. *Робота спрямована на поглиблення розуміння будови технічних систем слідкуючого типу. В основу покладену класичну структуру слідкуючої системи, аналіз якої показав, що її узагальнений характер створює певні стереотипи сприйняття та обмежує розвиток процедур проектування. Деталізація представлення класичної структури створила умови для часткової формалізації розробки принципових схем та математичних моделей. Представлено підхід, який дозволяє формувати принципові схеми технічних систем слідкуючого типу та трансформувати їх у математичні моделі. Розглянуті приклади ілюструють практичне застосування підходу для побудови схем і моделей слідкуючого приводу на основі гідромеханічних компонентів та приводу на основі електронних і гідромеханічних компонентів, а також ефект, який можна прогнозувати.*

Ключові слова: *проектування; слідкуючі системи; принципова схема; математична модель; формалізація.*

Задача проектування технічних систем слідкуючого типу є достатньо складною. Це обумовлено значною кількістю фізично різнорідних елементів і зв'язків, з яких утворюють такі системи, та складністю налаштування робочих процесів, які мають виводити систему на комплект потрібних динамічних характеристик.

Серед етапів проектування найбільш складними є концептуальний, схемний та модельний. Представлена робота стосується схемного та модельного етапів. Відома значна кількість підходів до розробки систем вказаного типу. Умовно їх можна класифікувати на: класичний підхід, який представлено в теорії автоматичного керування; прямий підхід, універсальний підхід; об'єктно-орієнтований підхід; FBS (функція, поведінка, стан) підхід та циклічно модульний підхід. Вказані підходи було розглянуто з точки зору представлення в них саме схемного та модельного етапів. Найбільш розвинене представлення надано в класичному підході, але його застосування обмежується базовою концепцією – автоматичні системи будуються на основі типових функціональних елементів, однак вибір елементів ґрунтується також на їх динамічних характеристиках [1,2]. Це мало б привести безпосередньо до отримання технічної системи з потрібними характеристиками, однак, складання систем таким чином призводить до конфлікту на схемному рівні. Подолання конфлікту досягається шляхом коригування схемного рішення введенням додаткових елементів. Прямий та універсальний підходи практично не розглядають схемний етап проектування систем і зосереджуються саме на модельному етапі [3,4]. При цьому, маючи початкову інформацію у вигляді принципової схеми певною мірою стають її заручниками. Об'єктно - орієнтований та FBS підходи потенційно створюють умови для системного вирішення задачі проектування, однак не надають детальних засобів розробки принципових схем і моделей [5-10]. Циклічно модульний підхід має потенціал для розроблення принципових схем технічних систем і їх трансформації в математичні моделі, однак його застосування до систем слідкуючого типу не знайшло достатнього представлення [11]..

Метою роботи є скорочення часу розробки технічних систем слідкуючого типу шляхом поглиблення розуміння причинно-наслідкових зв'язків при побудові принципових схем і математичних моделей та часткової формалізації цього процесу.

За приклад було вибрано задачу розроблення принципової схеми і математичної моделі слідкуючої системи. Додатковою вимогою до системи була робота системи у двотактному режимі. Для розробки такої системи за основу взято класичну функціональну схему (рис.1/) [1,2]. Гіпотеза була такою: якщо є функціонально достатня схема, яка визначає типові функції і зв'язки між ними, побудова на її основі принципової схеми має зводитись до простої заміни окремих функцій відповідними принципами засобів їх реалізації зі збереженням потрібних зв'язків. Однак, спроба побудувати принципову схему виявила проблему у забезпеченні потрібних тактів в роботі системи.

Причина, на наш погляд, полягає в узагальненості функціональної схеми - вона не розкриває структури систем двотактної дії.

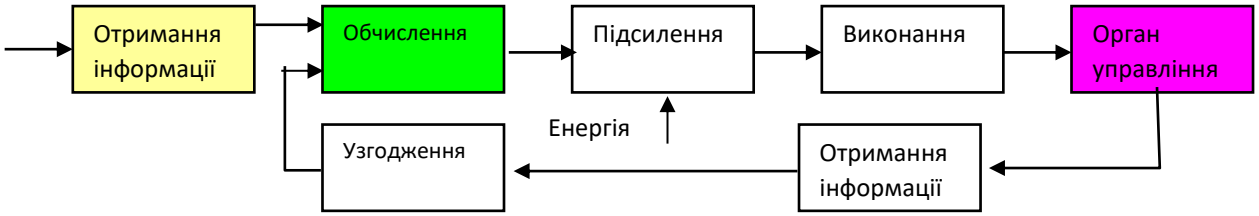


Рис.1. Класична функціональна схема технічної системи слідкуючого типу [1,2]

Наслідком є необхідність розробляти принципову схему системи без однозначного зв'язку з базовою функціональною схемою. Цим можна пояснити традиційний спосіб побудови принципових схем - інтуїтивний з використанням кваліфікації і досвіду розробників. Встановлена причина також має додаткові наслідки: - відсутність формального каркасу, призводить до побудови неструктурованих принципових схем систем і створює складності у виконанні наступного етапу – побудові математичної моделі.

Смисловий розрив між принциповою схемою та математичним описом процесу її функціонування подолано завдяки деталізації базової функціональної схеми технічної системи слідкуючого типу. Розроблена деталізована схема (рис.2) враховує базові вимоги до систем слідкуючого типу та вимогу їх роботи у двох режимах: прямому та зворотному.

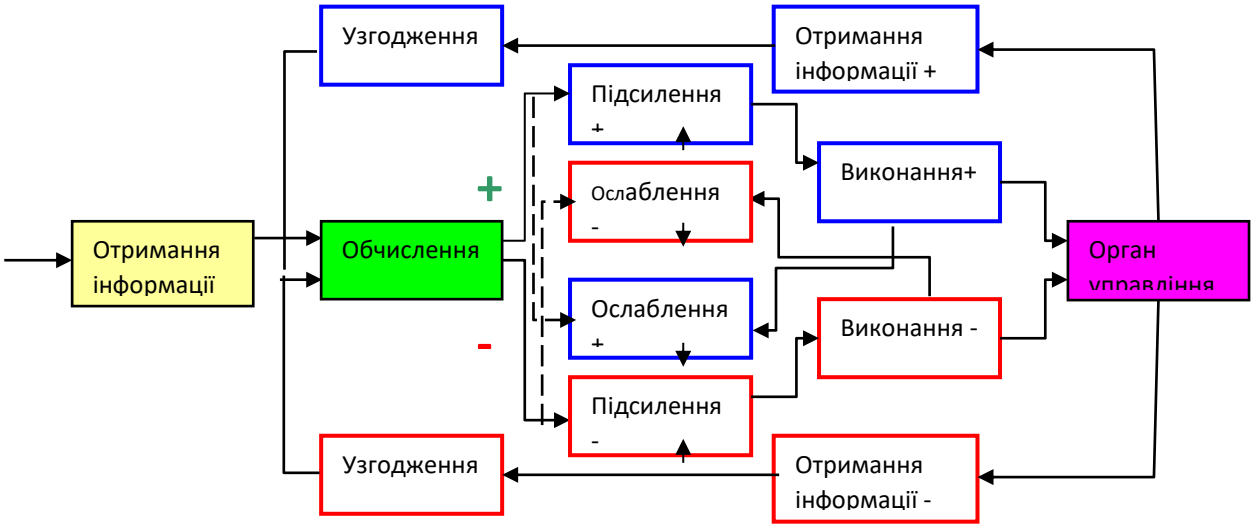


Рис.2. Деталізована функціональна схема технічної системи слідкуючого типу

Схема дозволяє формувати структуру системи відповідно до заданого комплекту вимог та мати можливість застосовування різних принципів для засобів виконання потрібних дій. Заміна функцій (дій) в деталізованій схемі системи графічними символами вибраних принципів для засобів їх виконання, наприклад, (рис.3,а,б), призводить до отримання принципової схеми технічної системи. Заміна принципів виконання елементарних дій їх математичними описами (рис.3,а,б), які враховують параметри вибраних засобів, та представлення зв'язків в математичній формі призводить до отримання математичного опису процесу функціонування системи. Практичні приклади розроблення принципових схем і математичних моделей слідкуючого приводу на основі гідромеханічних компонентів і приводу на основі електронних та гідромеханічних компонентів підтвердили ефективність розробленого підходу.

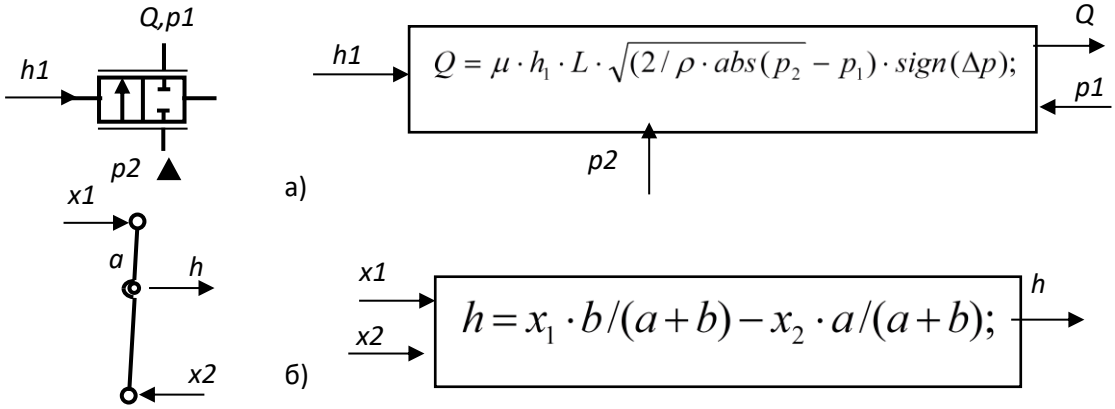


Рис.3. Графічні символи (ліворуч), що позначають принцип дії засобу виконання підсилення (а), принцип дії засобу виконання обчислень (б) та відповідні їм математичні описи (праворуч), які враховують параметри вказаних засобів

Висновки. Розроблена деталізована функціональна схема технічної системи слідкуючого типу слугує основою для частково формальної розробки принципових схем та математичних моделей. Це дозволяє за рахунок цілеспрямованих дій та використання проміжних перевірок зменшити кількість ітерацій, і, як наслідок, скорочує час на проектування.

Список використаної літератури

1. Popovych, M. H., & Kovalchuk, O. V. (2007). Teoriia avtomatychnoho keruvannia: Pidruchnyk [Theory of automatic control: Textbook] (2nd ed., rev. and expanded). Lybid. http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/Popovich_2007_656.pdf [in Ukrainian].
2. Korchemnyi, M. O., Klendii, P. B., & Potapenko, M. V. (2011). Teoretychni osnovy avtomatyky: Navchalnyi posibnyk [Theoretical foundations of automation: Textbook]. [in Ukrainian].
3. Buriennikov, Yu. A., Nemyrovskyi, I. A., & Kozlov, L. H. (2013). Hidravlika, hidro- ta pnevmopryvody: Navchalnyi posibnyk [Hydraulics, hydraulic and pneumatic drives: Textbook]. VNTU. [in Ukrainian].
4. Karnopp, D. C., Margolis, D. L., & Rosenberg, R. C. (1990). System dynamics: A unified approach. John Wiley & Sons.
5. Booch, G. (1991). Object-oriented design with applications. Benjamin/Cummings Publishing Company.
6. Miatliuk, K., Holewa, K., & Nawrocka, A. (2014, May 28–30). Conceptual design of BCI in the formal basis of hierarchical system. In Proceedings of the IEEE 15th International Carpathian Control Conference. Velke Karlovice, Czech Republic.
7. Gero, J. S. (1990). Design prototypes: A knowledge representation schema for design. *AI Magazine*, *11*(4), 26–36.
8. Gero, J. S., & Kannengiesser, U. (2004). The situated function-behaviour-structure framework. Design Studies, 25(4), 373–391. https://doi.org/10.1016/j.destud.2003.10.010
9. Umeda, Y., Takeda, H., Tomiyama, T., & Yoshikawa, H. (1990). Function, behavior, and structure. In J. S. Gero (Ed.), Applications of artificial intelligence in engineering: Proceedings of the Fifth International Conference (Vol. 1, pp. 177–193). Springer.
10. Ying-Chieh, & Chakrabarti, A. (2013). Physical realizations: Transforming into physical embodiments of concepts in the design of mechanical movements. Advances in Mechanical Engineering, 2013, Article 318173.
11. Gubarev, A. P., & Uzunov, A. V. (1997). Structurally definite model or how to build an imitation model of a hydraulic drive. National Technical University of Ukraine “KPI”. Series: Mechanical Engineering, 32, 76–88. [in Russian].

INNOVATIVE APPROACHES TO DYNAMIC MONITORING OF BUILDING STRUCTURE USING POST-TENSIONED ROPES

Dmytro Savchuk, Postgraduate[1] (ORCID: 0009-0006-0366-0532),
Volodymyr Vynokur, Postgraduate[1] (ORCID: 0009-0002-3218-5620),
[1] Kyiv National University of Construction and Architecture, Povitryanykh syl avenue 31, 03037, Ukraine

ABSTRACT. *The study examines innovative approaches to dynamic control of building structures reinforced with post-tensioned ropes. The main focus is on monitoring resonance phenomena, the effect of damping, and rope tension control to ensure the reliability and durability of structures. Analytical models are used to determine natural frequencies, vibration amplitudes, and stress distributions, supplemented by numerical simulation and comparative analysis of monitoring methods. The results show that increasing damping reduces the amplitude of resonance peaks, while even small elongations create significant internal forces that require precise control. A comparison of vibration analysis, optical sensors, triboelectric sensors, and IoT systems revealed their advantages and limitations, and integrated solutions proved to be the most effective. The findings emphasize the importance of combining classical mechanics with modern sensor technologies to improve safety and extend the service life of both modern infrastructure facilities and architectural monuments.*

Keywords: *dynamic monitoring; frequency analysis; monitoring of building structures; reinforcement; prestressing; post-tension; ropes.*

Introduction. The modern development of civil engineering is increasingly focused on creating structures that can withstand significant loads and maintain operational reliability for a long time. A special place in this process is occupied by systems for strengthening structures using post-tensioned channels. They provide additional rigidity, increase resistance to dynamic influences and cannot effectively use materials, reducing the mass of the structure.

The relevance of the topic is due not only to the needs of modern construction, but also to ensuring the preservation of architectural monuments, which often require reinforcement without significant involvement in their authentic structure. Post-tensioned rope systems make it possible to implement such a task, increasing engineering efficiency with the requirements of restoration practice.

Dynamic control in this context is a key tool. It allows not only to assess the current state of the structure, but also to predict their behavior under the influence of variable loads - transport, wind, seismic. The use of mathematical models, sensor technologies and computer analysis systems create conditions for the transition from periodic inspections to continuous monitoring.

An important feature of modern research is the integration of classical methods of mechanics with innovative technologies - fiber optic sensors, computer vision systems, Internet of Things platforms. This opens up new opportunities for precise measurement of parameters, localization of defects and prediction of the remaining life of structures.

Analysis of recent research and publications. The development of dynamic control systems for building structures using post-tensioned ropes has a multi-level history, encompassing both classical methods and modern innovative technologies.

The first fundamental works in the field of Structural Health Monitoring were aimed at vibration diagnostics and modal analysis. They laid the foundation for understanding how changes in the dynamic characteristics of structures can signal the presence of damage. These approaches became the starting point for further research that expanded the possibilities of monitoring and made it more accurate and comprehensive [1].

Methods for identifying damage based on vibration analysis were further developed. The results of numerous experiments were summarized, which confirmed the effectiveness of vibration methods in practical conditions. They allowed to form a systematic approach to assessing the condition of structures, which is still used as a basic tool in diagnostics [2].

An important step was the use of fiber-optic sensors. Studies have shown that the spiral arrangement of sensors on seven-wire steel ropes provides high accuracy in measuring deformations. This allows you to monitor the tension in the ropes in real time and timely detect changes that can lead to loss of bearing

capacity [3].

A separate direction is the work devoted to the assessment of internal forces in ropes. A method of hierarchical model updating was proposed, which allows you to more accurately determine the tension in the internal elements of post-tensioned systems. This approach increases the accuracy of diagnostics and allows you to predict the durability of structures [4].

Research in the field of damage localization has proven that even local defects in steel ropes can be detected and quantified. This is of practical importance for bridge structures, where timely detection of damage is critical for operational safety [5].

Modern computer vision technologies have opened up new opportunities for monitoring. The use of drones allows you to assess the tension of ropes in urban bridges even in difficult background conditions. This provides non-contact control in hard-to-reach places and reduces the need for manual inspections [6]. The generalization of machine vision methodologies has confirmed their effectiveness in non-contact measurement of structural parameters, which makes them promising for use in architectural monuments [7].

Significant progress has been made in the application of distributed fiber-optic sensors. They allow for long-term monitoring of large structures, detect even minor changes in the state of structures, and provide real-time control. This opens up prospects for bridges, high-rise buildings, and other complex engineering objects [8].

No less promising is the implementation of Internet of Things technologies in monitoring systems. The integration of sensor networks with digital platforms allows for the prediction of the development of defects and the assessment of the remaining life of structures. This creates the basis for the transition from reactive to proactive management of the technical condition of structures [9].

An important contribution to the development of the industry has been made by seismic instrumentation programs for buildings. They showed how monitoring systems can be used to assess the behavior of structures during earthquakes, which is important for improving safety in seismically active regions [9].

Recent studies confirm the relevance of numerical modeling of failures of structures based on dynamic monitoring [10], as well as the features of modeling elements in dynamic control tasks [11].

Research objective. The main objective of the work is to form a scientifically based concept of dynamic control of building structures reinforced with post-tensioned rope systems. Such control should ensure timely detection of changes in the technical condition of structures, prediction of their behavior under the influence of variable loads and determination of the residual resource.

The task of the research is to create a comprehensive methodology that combines classical engineering calculations with innovative technologies of sensor measurement, computer analysis and digital modeling. Particular attention is paid to the development of approaches to assessing the dynamic characteristics of the system, determining the influence of damping and stiffness on resonance phenomena, as well as modeling the behavior of structures under various operating conditions.

The research is aimed at the practical application of the obtained results in two key areas: in modern construction, where post-tensioned rope systems are used to strengthen bridges and high-rise buildings, and in the field of architectural heritage preservation, where they can provide additional stability of monuments without significant interference with their authentic structure.

Main part. The study of the dynamic behavior of post-tensioned rope systems showed that the key parameter for assessing their condition is the natural frequency of oscillations. It is determined by the ratio between the stiffness and mass of the structure and can be calculated by the formula:

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

where f_n is the natural frequency, k is the stiffness, and m is the mass.

For a system with a stiffness of 1*10 6 N/m and a mass of 1000 kg, a value of about 5.03 Hz was obtained. This means that at loads with a frequency close to this value, there is a risk of resonance.

The amplitude of oscillations under the action of a harmonic load is determined by the formula:

$$x(\omega) = \frac{F_0}{\sqrt{(k-m\omega^2)^2+(c\omega)^2}} \quad (2)$$

where F_0 is the amplitude of the force,

c is the damping coefficient.

Calculations showed that at a frequency of ω ≈ 32 rad/s the amplitude reaches a maximum, confirming the presence of a resonant peak. The graph (fig. 1) of amplitude versus frequency clearly shows a sharp increase in the resonance zone, after which the amplitude decreases with increasing frequency.

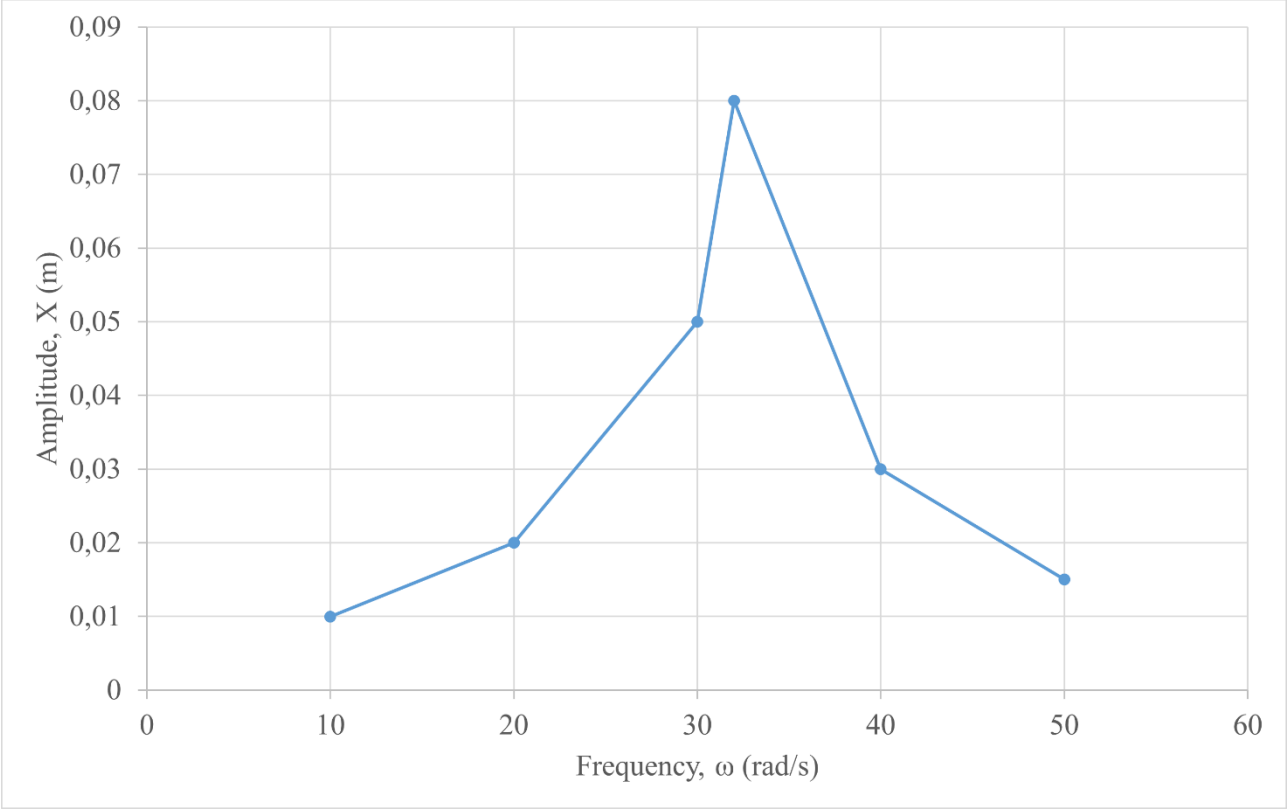


Fig.1. Dependence of the amplitude of oscillations on the load frequency

Damping is an important factor. As the coefficient c increases, the amplitude of the resonant peak decreases, which indicates the effectiveness of the use of damping elements to reduce the risk of emergency deformations. On the contrary, with low damping, the system becomes more sensitive to dynamic influences. This is clearly visible in the graph (fig. 2), which shows the dependence of the amplitude on the damping coefficient.

The effect of the mass of the system was considered separately. An increase in mass leads to a shift of the resonant frequency towards lower values. This is important to consider when designing structures that are subject to transport or seismic loads. Thus, the mass of the structure is one of the parameters that determines its resistance to dynamic effects.

To estimate the tension in the ropes, the classical formula was used:

$$T = EA\frac{\Delta L}{L} \quad (3)$$

where E is the modulus of elasticity,

A is the cross-sectional area,

ΔL is the elongation,

L is the initial length.

With the parameters E = 2 * 10^{11} Pa, A = 0.0005 m^2, L = 10 m, ΔL = 0.002 m the value T = 2*10^7 N was obtained. This demonstrates that even a small elongation creates significant internal forces that must be controlled. To summarize the various control methods, a comparative table of criteria for evaluating vibration monitoring platforms was compiled:

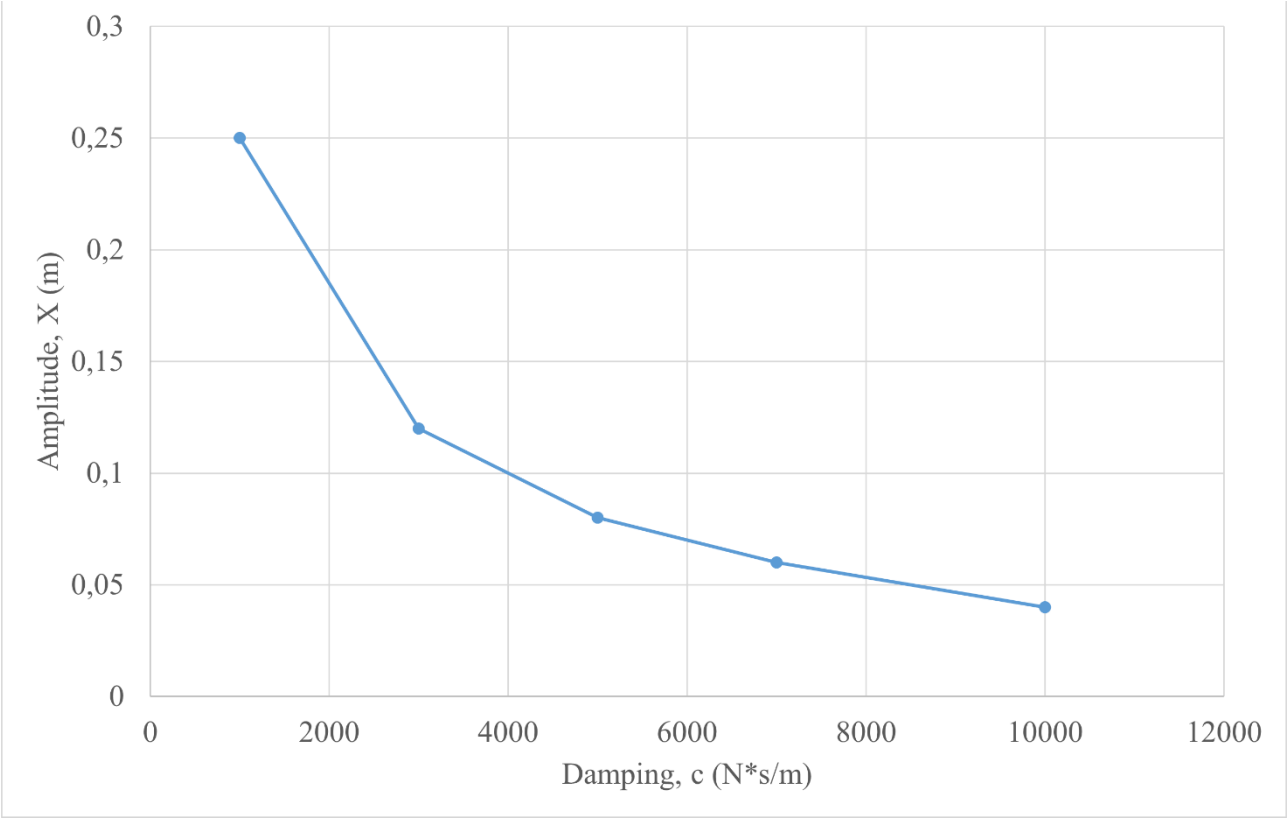


Fig.2. Effect of damping coefficient on amplitude

Table 1

Numerical values of criteria for evaluation of frame vibrating platforms

Method	Advantages	Disadvantages
Vibration analysis	Simplicity, basic control	Does not localize defects
Optical sensors	High accuracy	Sensitivity to lighting conditions
Triboelectric sensors	Contactless	Need for standardization
IoT systems	Continuous monitoring	Dependence on power and network

This table demonstrates that each method has its advantages and limitations. Vibration analysis provides simplicity, but does not allow for fault localization. Optical sensors provide high accuracy, but are dependent on lighting conditions. Triboelectric sensors operate non-contact, but require standardization. IoT-based systems provide continuous monitoring, but are dependent on power supply and network infrastructure.

The modeling results and comparative analysis confirm the critical role of dynamic control in ensuring the reliability of post-tensioned rope systems. Formulas, graphs, and a table allow for a clear demonstration of dependencies and conclusions regarding the safety and durability of structures.

Conclusions. The conducted study confirmed the effectiveness of post-tensioned rope systems as a means of strengthening building structures capable of withstanding significant dynamic loads. The natural frequency and amplitude of vibrations are key parameters that determine the stability of structures, and their control allows for timely detection of dangerous operating modes.

The analysis showed that damping plays a decisive role in reducing the amplitude of resonant peaks. An increase in the damping coefficient makes the system more stable, while its decrease leads to increased sensitivity to external influences. This confirms the need to use special vibration damping elements in design and operation practice.

Calculations of rope tension have proven that even minor elongations create significant internal forces. This requires precise control of tension parameters, since exceeding the permissible values can lead to loss of the load-bearing capacity of the structure.

A comparative analysis of monitoring methods has shown that each of them has its advantages and

limitations. Vibration analysis provides simplicity, but does not allow for localizing defects. Optical sensors provide high accuracy, but are dependent on lighting conditions. Triboelectric sensors operate contactlessly, but require standardization. IoT-based systems provide continuous monitoring, but are dependent on power supply and network infrastructure.

A comprehensive combination of classical engineering methods with modern technologies of sensory control, computer analysis and digital modeling creates the basis for innovative dynamic monitoring systems. This allows to ensure the reliability and durability of both new infrastructure facilities and architectural monuments that require special attention in the preservation process.

References

1. Farrar, C. R., & Worden, K. (2012). Structural health monitoring: A machine learning perspective. Wiley. http://doi.org/10.1002/9781118443118
2. Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B., & Shevitz, D. W. (1998). Damage identification and health monitoring of structures. Los Alamos National Laboratory. http://doi.org/10.2172/249299
3. Zhu, Y., & Chen, G. (2022). Spiral deployment of optical fiber sensors for distributed strain measurement in seven-wire twisted steel cables, post-tensioned against precast concrete bars. Sensors, 22(19), 7636. https://doi.org/10.3390/s22197636
4. Xu, J., Ma, Q., & Han, Q. (2023). Force evaluation of internal cable of prestressed grids based on field monitoring and hierarchical objective model updating. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 13, 709–727. https://doi.org/10.1007/s13349-023-00673-w
5. Mazzatura, I., & Salvatore, W. (2023). Damage detection, localization, and quantification for steel cables of post-tensioned bridge decks. Structures, 57, 105314. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105314
6. Zhang, C., Tian, Y., & Zhang, J. (2021). Complex image background segmentation for cable force estimation of urban bridges with drone-captured video and deep learning. Structural Control and Health Monitoring, 28(10), e2910. https://doi.org/10.1002/stc.2910
7. Ye, X. W., Dong, C. Z., & Liu, T. (2016). A review of machine vision-based structural health monitoring: Methodologies and applications. Sensors, 16(5), 710. http://doi.org/10.1155/2016/7103039
8. Inaudi, D., & Glisic, B. (2010). Long-range distributed fiber optic sensing for monitoring of civil structures. Sensors, 10(1), 112–140. http://doi.org/10.1115/1.3062942
9. Celebi, M. (2002). Seismic instrumentation of buildings (with emphasis on federal buildings). U.S. Geological Survey Open-File Report 00-157. https://doi.org/10.3133/ofr00157
10. Vabishchevych, M. O., Dedov, O. P., & Savchuk, D. O. (2024). The current state of the problem of numerical investigation of metal structure refusal based on dynamic monitoring. Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles, (112), 52–57. https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.112.52-57
11. Vabishchevych, M. O., Dedov, O. P., Savchuk, D. O., & Kara, I. D. (2025). Features of modeling bolted joints of thin-walled steel elements in dynamic monitoring tasks. Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles, (115), 63–68. https://doi.org/10.32347/2410-2547.2025.115.63-68

СТРУКТУРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ДЕМПФУВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ ГРАФІВ ЗВ'ЯЗКІВ

Валерій Яковенко, професор, д.т.н., професор [1] (ORCID: 0000-0002-8759-8652),
Сергій Орищенко, доцент, к.т.н., доцент [1] (ORCID: 0000-0002-5359-5285),
Євген Міщук доцент, к.т.н., доцент [1] (ORCID: 0000-0002-1888-3687),
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. *Потреба виконувати віброізоляцію або віброзахист систем виникає повсякчас в технологічному обладнанні різних типів. Для цього використовуються механічні, електронні, термічні і гідравлічні методи перетворення енергії, що виконуються на одному об'єкті. Через це поняття стану вимагає розширення й уживання множини змінних станів, щоб його елементи були універсально пристосовані до вживання в різноманітних випадках. В основу цього підходу покладені топологічні подання про безперервність зміни й перетворення енергії. Ця концепція найбільш сучасна й покладена в основу спеціальної мови моделювання методами графів зв'язку. Роль адаптивних демпферів, які можуть змінювати свої характеристики є значною в сучасному машинобудуванні та будівництві. Така модель графів дозволяє швидко змінювати структуру демпферу та досліджувати вплив параметрів на динаміку системи. В роботі розглянуто моделювання системи віброзахисту, які мають динамічний гасник(демпфер) коливань.*

Ключові слова: *графи зв'язку; вібрація; демпфер; оптимізація; динамічний; рівняння стану.*

Вступ. Побудова та аналіз рівнянь системи керування у просторі вектора станів x називається методом простору станів [1]. Сучасна теорія систем віброзахисту базується на концепції простору станів. Простір станів – це множина x, що складається з елементів x(t), які визначаються вектором $[x_i]$, причому =1, 2 ,..., n для конкретної системи. Для динамічних систем механіки стан визначається парою змінних: координатою x та швидкістю v або переміщенням x, а також імпульсом q, які утворюють так званий простір станів або фазовий простір [3]. У системах віброзахисту використовуються не лише механічні, але й інші електронні, теплові та гідравлічні методи перетворення енергії, а такі перетворення майже завжди здійснюються на одному об'єкті [5]. Роль адаптивних демпферів, які можуть змінювати свої характеристики є значною в сучасному машинобудуванні[5]. Через ці обставини концепція стану вимагає розширення та використання такого набору змінних станів, щоб його елементи були універсально адаптовані для використання в різних випадках [4].

Аналіз літературних джерел. Одним із методів моделювання технічних систем є метод функціонально скінченних елементів [6]. При використанні цього методу в системі виділяються окремі елементарні матеріальні елементи, які розглядаються як носії певних фізичних властивостей [7]. Крім того, система включає моделі джерел енергії та перетворювачів параметрів потоку енергії [8]. Один із напрямків розвитку теорії графів зв'язків представлений методом, який генерує графи зв'язків з функції Лагранжа. Він створює коректні, але складні структури зв'язків, використовуючи складні формули та інерційні члени для трансформаторних та гіраторних модулів [9]. Крім того, він може бути використаний з дискретною схемою скінченних елементів для моделювання широкого кола задач динаміки твердого суцільного середовища [10]. У [11] досліджується динамічний демпфер коливань, представлений у вигляді пружної консольної балки з системою зосереджених мас. Коливання системи описуються крайовою задачею з дискретною правою частиною.

Мета роботи. Метою роботи є моделювання системи віброзахисту, що має динамічний демпфер вібрацій і містить спеціальний тип рідинного елемента, встановленого на опорному тілі. Побудова моделі системи віброзахисту з використанням методу мови графів зв'язків у лінійній та нелінійній постановці задачі.

Матеріали і методи. Моделювання складає головну частину сучасних наукових досліджень, зокрема в галузі розвитку енергозберігаючих технологій. Системні моделі складаються з трьох множин: множина причин (входів), множина стану, множина наслідків (виходів). Побудова таких

моделей базується на декомпозиції тобто розділенню цілого на частини і визначенню зв'язків між ними за допомогою принципа причинності.

Метод мови графів зв'язку дозволяє отримати матричні рівняння систем віброзахисту в просторі станів, у вигляді рівнянь стану та спостереження. Такий підхід дозволяє розглядати багато різних типів систем віброзахисту з динамічним демпфером, у тому числі в нелінійній постановці, а також з керованими характеристиками рідинного елемента. Це підхід швидко дозволяє змінювати структуру демпферів та вивчати вплив параметрів на динаміку системи.

Виклад основного матеріалу. Динамічний демпфер має герметичну камеру, яка заповнена в'язкою нестисливою рідиною. Усередині камери на пружному підвісі розміщено спеціальний тип твердого тіла, яке здатне здійснювати поступальні коливання вздовж камери. Ці коливання передаються рідині, пружному підвісу, опорному тілу та забезпечують віброзахист.

Коли динамічний демпфер рухається в рідині, він відчуває опір, який зумовлений в'язкістю рідини R_2 та її інерцією I_a. У більшості випадків, якщо не враховувати можливість відриву I_2 від рідини, тобто кавітація відсутня не тільки на стінках камери, але й на самому тілі динамічного демпфера, то можна підсумувати інертні властивості твердого тіла динамічного демпфера та рідини $I_2 + I_a = I_{2a}$. Вищезазначені припущення забезпечують лінійне формулювання задачі, враховуючи їх, можна побудувати найпростішу модель системи віброзахисту, рис. 1.

Для моделі прийнято такі основні позначення: $I_1 : m_1$ - інерція (маса) опорного тіла; $I_2 : m_2$ - інерція (маса) твердого тіла; $I_3 : m_3$ - інерція (маса) рідини динамічного демпфера; $I_a : m_a$ - інерція (маса, що задіяна) рідини; $R_1 : k_1$ - опір (в'язкість) підвісу опорного тіла; $R_2 : k_2$ - опір (в'язкість) підвісу динамічного демпфера; $C_I : c_I$ - пружність (податливість) підвіски несучого тіла; $C_3 : c_3$ - пружність (податливість) динамічної демпферної підвіски.

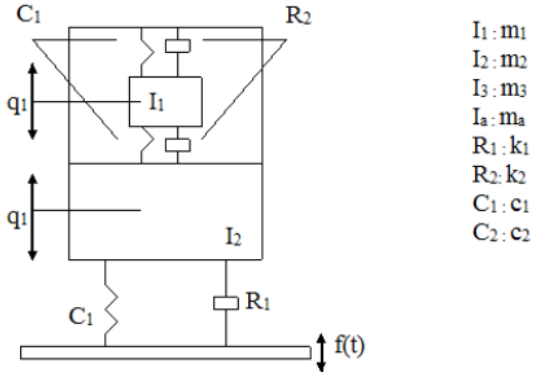


Рис.1. Об'єкт віброзахисту з демпфером вібрацій

Граф зв'язку, що відповідає лінійній постановці задачі. Слід зазначити, що така постановка задачі значно спрощена та не враховує складну динаміку внутрішнього руху рідини та вплив цього руху на ефект віброзахисту. Для подолання цих труднощів у рамках методу мови графів зв'язку можна ввести нелінійні функції інерції та опору, що забезпечить можливість моделювання описаних особливостей внутрішнього руху рідини в динамічному демпфері. Ці міркування відображені в графі зв'язку для нелінійної постановки задачі на рис. 2.

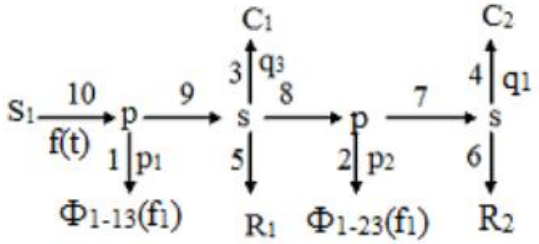


Рис. 2. Граф зв'язку для нелінійної постановки задачі

Для моделювання нелінійних характеристик інерції рідини та її опору введені нелінійні функції: $\Phi_{I13}(f_1)$ - моделюють взаємодію камери, рідини, твердого тіла динамічного демпфера; $\Phi_{I23}(f_1)$ - моделюють нелінійності, що виникають під час руху твердого тіла, динамічного демпфера

та рідини.

Складемо, на основі графіка зв'язку, рівняння стану. Позначимо цифрами компоненти графіків зв'язку: імпульс від інерції p_1, p_2 та переміщення від пружності q_3, q_4; вхідний вектор джерела змінної потоку f_{10}. Стан системи визначається вектором: (p_1, p_2, q_3, q_4).

Рівняння стану системи віброзахисту з динамічним демпфером у загальному вигляді у просторі станів мають вигляд:

$$p_1 = e_1;\ p_2 = e_2;\ q_3 = f_3;\ q_4 = f_4 \tag{1}$$

Використовуючи граф зв'язків та співвідношення структури перехідного вузла, побудуємо визначальне рівняння для перехідних структур p, s:

$$p:\begin{vmatrix} e_9 = e_1 = e_{10} \\ f_{10} = f_1 + f_9 \end{vmatrix};\ s:\begin{vmatrix} f_9 = f_3 = f_5 = f_8 \\ e_0 = e_3 + e_5 + e_9 \end{vmatrix};\quad p:\begin{vmatrix} e_3 = e_2 = e_7 \\ f_8 = f_2 + f_7 \end{vmatrix};\ s:\begin{vmatrix} f_7 = f_4 = f_6 \\ e_7 = e_4 + e_6 \end{vmatrix}. \tag{2}$$

Застосовуючи співвідношення для перехідних структур та вирази для елементів I, R, C графів зв'язків, підставляючи їх у рівняння станів (для лінійної задачі) після перетворень, отримуємо:

$$\begin{aligned} \dot{p}_1 &= -(R_1 + R_2)I_{13}^{-1}P_1 - R_2 I_{20}^{-1} p_2 + C_1^{-1} q_6 + C_2^{-1} q_4 + (R_1 + R_2) f_{10}; \\ \dot{p}_2 &= -R_2 I_{13}^{-1} p_1 - R_2 I_{20}^{-1} p_2 + C_2^{-1} q_4 + R_2 f_{10}; \\ \dot{q}_3 &= -I_{13}^{-1} p_1 + f_{10}; \\ \dot{q}_4 &= -I_{13}^{-1} C_1 - I_{20}^{-1} C_2 + f_{10}. \end{aligned} \tag{3}$$

Для нелінійної задачі рівняння стану систем віброзахисту з динамічним демпфером:

$$\begin{aligned} \dot{p}_1 &= -(R_1 + R_2)\Phi_{I_{13}}^{-1}(p_1) - R_2\Phi_{I_{20}}^{-1}(p_2) + C_1^{-1} q_3 + C_2^{-1} q_4 + (R_1 + R_2) f_{10}; \\ \dot{p}_2 &= -R_2\Phi_{I_{13}}^{-1}(p_1) - R_2\Phi_{I_{20}}^{-1}(p_2) + C_2^{-1} q_4 + R_2 f_{10}; \\ \dot{q}_3 &= -\Phi_{I_{13}}^{-1}(p_1) + f_{10}; \\ \dot{q}_4 &= -\Phi_{I_{13}}^{-1}(p_1) - \Phi_{I_{20}}^{-1}(p_2) + f_{10}. \end{aligned} \tag{4}$$

Система рівнянь у матричній формі має такий вигляд:

$$\begin{vmatrix} \dot{p}_1 \\ \dot{p}_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -(R_1 + R_2)I_{13}^{-1} & -R_2 I_{20}^{-1} & C_1^{-1} & C_1^{-1} \\ -R_2 I_{13}^{-1} p_1 & -R_2 I_{20}^{-1} & 0 & C_2^{-1} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} p_1 \\ p_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} R_1 + R_2 \\ R_2 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -I_{13}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ -I_{13}^{-1} & -I_{20}^{-1} & 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} q_3 \\ q_4 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \end{vmatrix} \tag{5}$$

Таким чином, на основі моделі системи віброзахисту з динамічним демпфером, представленої у вигляді графів зв'язків, побудовано систему диференціальних рівнянь у просторі станів виду *x`* = *Ax* + *Bu*, де:

$$\mathrm{x} = \begin{vmatrix} \dot{p}_1 \\ \dot{p}_2 \end{vmatrix} \mathrm{A} = \begin{vmatrix} -(R_1 + R_2)I_{13}^{-1} & -R_2 I_{20}^{-1} & C_1^{-1} & C_2^{-1} \\ -R_2 I_{13}^{-1} p_1 & -R_2 I_{20}^{-1} & 0 & C_2^{-1} \end{vmatrix}$$

$$\mathrm{x} = \begin{vmatrix} \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \end{vmatrix} \mathrm{A} = \begin{vmatrix} -I_{13}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ -I_{13}^{-1} & -I_{20}^{-1} & 0 & 0 \end{vmatrix} \tag{6}$$

Система рівнянь у матричній формі представлена так:

$$\begin{aligned} \dot{p}_1 &= -(R_1 + R_2)\Phi_{I_{13}}^{-1}(p_1) - R_2\Phi_{I_{20}}^{-1}(p_2) + C_1^{-1} q_3 + C_2^{-1} q_4 + (R_1 + R_2) f_{10}; \\ \dot{p}_2 &= -R_2\Phi_{I_{13}}^{-1}(p_1) - R_2\Phi_{I_{20}}^{-1}(p_2) + C_2^{-1} q_4 + R_2 f_{10}; \\ \dot{q}_3 &= -\Phi_{I_{13}}^{-1}(p_1) + f_{10}; \\ \dot{q}_4 &= -\Phi_{I_{13}}^{-1}(p_1) - \Phi_{I_{20}}^{-1}(p_2) + f_{10}. \end{aligned} \tag{7}$$

Систему рівнянь можна записати у такому вигляді: *x`* = *F(x)* + *Bu*, де:

$$\begin{aligned} \dot{p}_1 &= -(R_1 + R_2)I_{13}^{-1} p_1 - R_2 I_{20}^{-1} p_2 + C_1^{-1} q_3 + C_2^{-1} q_4 + (R_1 + R_2) f_{10}; \\ \dot{p}_2 &= -R_2 I_{13}^{-1} p_1 - R_2 I_{20}^{-1} p_2 + C_2^{-1} q_4 + R_2 f_{10}; \end{aligned} \tag{8}$$

$$\dot{q}_3 = -I_{13}^{-1}p_1 + f_{10};$$
$$\dot{q}_4 = -I_{13}^{-1}C_1 - I_{20}^{-1}C_2 + f_{10}.$$

Окрім рівнянь стану досліджуваної системи, для її повного опису необхідні рівняння спостереження, які пов'язують стан зі спостережуваним вихідним параметром системи. Щоб знайти ці рівняння, необхідно вказати, який параметр є виходом системи. У розглянутому випадку це може бути зміщення маси I_{13} з рівноважної суперпозиції q_1 або швидкість f_4. Вважаючи, що вектор стану x відомий, отримуємо рівняння спостереження:

Якщо $y=q_1$, то для лінійної задачі:

$$q_1 = \left[-\int_{13}^{-1} dt \right] x \tag{9}$$

А для лінійної задачі:

$$q_1 = \left[-\int_{13}^{-1} \Phi dt \right] x \tag{10}$$

Висновки. Отримані рівняння систем віброзахисту з динамічним демпфером описують її поведінку в просторі станів. Основним методом вирішення цих задач є розв'язання системи лінійних та нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку, заданих у нормальних формах. Наразі розроблено різні пакети прикладного програмного забезпечення, які надають можливість швидко аналізувати якісну та кількісну поведінку системи, отримувати її амплітудно-частотні характеристики та оптимізувати параметри.

Список використаних джерел

1. Yakovenko V. B. (1996). Nelineyni zadachi dynamiky mekhanichnykh system [Nonlinear problems of mechanical system dynamics]. Naukova Dumka.
2. Ogata K. (2010). Modern control engineering (5th ed.). Prentice Hall.
3. McBride R.T. (2005). System analysis through bond graph modeling (Doctoral dissertation). The University of Arizona.
4. Hroncová D., Šarga P., & Gmiterko A. (2012). Simulation of mechanical system with two degrees of freedom with bond graphs and MATLAB/Simulink. Procedia Engineering, 48, 223–232. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.123
5. Borutzky, W. (2010). Bond graph methodology: Development and analysis of multidisciplinary dynamic system models (Vol. XXII). 662 p.
6. Flores P., Ambrosio J., Pimenta Claro J.C., & Lankarani H.M. (2008). Kinematics and dynamics of multibody systems with imperfect joints: Models and case studies. Springer.
7. Sage A.P., & Rouse W.B. (2011). Systems engineering and analysis (5th ed.). Wiley.
8. Kurtulus M., & Ozturk H. (2011). Cybernetics: Theory and applications. Springer.
9. Rosenbety R.C., & Karnopp D.C. (1983). Introduction to physical system dynamics. McGraw-Hill.
10. Karnopp D.C., Margoila D.L., & Rosenberg R.C. (1990). System dynamics: A unified approach. Wiley.
11. Parashchuk D.L., Zirkevych V.M., & Hrubel M.H. (2021). Modeling the dynamics of a frequency-controlled vibration damper. Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine, 31(1), 105–109. https://doi.org/10.36930/40310117 .

АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ЦЕМЕНТОБЕТОННИХ ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ ЗАСОБАМИ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ ТА ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ВІДПОВІДНО ДО МІЖНАРОДНИХ СТАНДАРТІВ

Іван НАЗАРЕНКО, професор, д.т.н., професор [1] (ORCID: 0000-0002-1888-3687),
Микола КУЗЬМІНЕЦЬ професор, д.т.н., завідувач кафедрою [2] (ORCID: 0009-0001-1841-694X),
Артур ОНИЩЕНКО професор, д.т.н., завідувач кафедрою [2] (ORCID: 0000-0002-1040-4530),
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна
[2] Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, 01010, Київ, Україна

АНОТАЦІЯ. *Розглянуто сучасний підхід до автоматизованого контролю якості цементобетонних дорожніх покриттів на основі інтеграції засобів комп'ютерного зору, мультисенсорних вимірювальних систем та алгоритмів штучного інтелекту. Запропоновано трирівневу архітектуру сенсорно-аналітичної платформи, яка поєднує збір даних, їх інтелектуальну обробку та автоматичну нормативну верифікацію. Для детекції, сегментації та класифікації дефектів використано нейронні мережі YOLOv8, U-Net++ і Vision Transformer. Система забезпечує контроль геометричних параметрів, рівності поверхні, стану швів і тріщин відповідно до вимог ASTM, EN та ДСТУ. Впровадження технології дозволяє перейти від вибіркового до суцільного контролю 100 % площі покриття, підвищити достовірність виявлення дефектів і знизити витрати на експлуатаційне утримання дорожньої інфраструктури.*

Ключові слова: *комп'ютерний зір; штучний інтелект; цементобетонне покриття; контроль якості; нейронні мережі; дорожні стандарти; детекція дефектів; IRI.*

Вступ. Якість цементобетонних покриттів автомобільних доріг безпосередньо визначає безпеку руху, довговічність конструкції та сукупну вартість життєвого циклу дороги [1]. Традиційний контроль якості ґрунтується на вибіркових лабораторних випробуваннях та ручному візуальному огляді, що унеможливлює виявлення дефектів у режимі реального часу та охоплення 100% площі покриття. За даними PIARC, понад 35% передчасних руйнувань бетонних покриттів спричинені порушеннями технологічного регламенту, які не були виявлені під час будівництва [2]. Впровадження систем комп'ютерного зору та штучного інтелекту дозволяє перейти до суцільного автоматизованого контролю з верифікацією за міжнародними стандартами ASTM, EN та ДСТУ в режимі реального часу.

Мета та завдання. Розробка методології та алгоритмічного забезпечення системи автоматизованого контролю якості укладання цементобетонних покриттів на основі комп'ютерного зору та ШІ з верифікацією параметрів відповідно до вимог міжнародних стандартів. Для досягнення мети вирішуються такі завдання: формування мультимодальної сенсорної платформи для збору даних про стан покриття; розробка архітектури нейронних мереж для класифікації дефектів та оцінки геометричних параметрів; створення модуля автоматичної верифікації результатів вимірювань за базою нормативних вимог ASTM C39, EN 13877, ДСТУ Б В.2.7-214.

Архітектура системи контролю. Система реалізована на трьох функціональних рівнях [3]. Сенсорний рівень включає стереоскопічні камери високої роздільної здатності (не менше 20 Мп) для тривимірної реконструкції поверхні, лінійні лазерні профілографи з точністю ±0,1 мм, тепловізійні камери для контролю рівномірності гідратації цементу та ультразвукові давачі для вимірювання товщини шару без руйнування конструкції. Рівень обробки даних формується на основі згорткових нейронних мереж архітектури YOLOv8 для детекції тріщин, раковин, виколів та нерівностей у режимі реального часу з частотою обробки кадрів не менше 30 fps при переміщенні вимірювального комплексу зі швидкістю до 15 км/год. Рівень верифікації здійснює автоматичне зіставлення виміряних параметрів з вимогами відповідних стандартів і формує протокол відповідності або припис на усунення дефектів.

Контрольовані параметри та стандарти. Система забезпечує вимірювання та верифікацію таких показників: рівність поверхні за міжнародним індексом нерівності IRI (норма ≤ 1,5 м/км

згідно з EN 13036-5); коефіцієнт поздовжнього зчеплення ($\mu \geq 0{,}45$ за ASTM E1911); ширина розкриття тріщин (допуск ≤ 0,2 мм за EN 1992); геометрія деформаційних швів — прямолінійність та глибина нарізання (ДСТУ Б В.2.7-214); текстура поверхні за показником MPD (mean profile depth ≥ 0,6 мм за EN ISO 13473-1); відхилення від проєктних позначок (допуск ±5 мм за ДБН В.2.3-4).

Методи машинного навчання. Детекція дефектів реалізується ансамблевим підходом: сегментаційна мережа U-Net++ забезпечує попіксельну класифікацію дефектів з точністю IoU ≥ 0,91; трансформерна архітектура Vision Transformer (ViT) використовується для класифікації типів руйнувань за таксономією SHRP Distress Identification Manual [4]; регресійні моделі на основі градієнтного бустингу XGBoost прогнозують розвиток дефектів протягом наступних 12–24 місяців з точністю прогнозу $R^2 \geq 0{,}87$ на тестовій вибірці.

Результати. Впровадження системи забезпечує: охоплення суцільним контролем 100% площі покриття замість 3–5% при вибірковому методі [5]; скорочення тривалості контрольних операцій у 4–6 разів порівняно з ручними методами; підвищення достовірності виявлення дефектів до 96–98% при хибнопозитивному рівні не більше 2%; автоматичне формування цифрового паспорта ділянки покриття з геопросторовою прив'язкою кожного дефекту; зниження витрат на гарантійний ремонт на 40–55% завдяки своєчасному виявленню технологічних порушень.

Висновки. Запропонована система автоматизованого контролю якості на основі комп'ютерного зору та ШІ забезпечує перехід від вибіркового до суцільного нормативного контролю цементобетонних покриттів. Інтеграція мультисенсорної платформи з базою міжнародних стандартів і методами глибокого навчання створює підґрунтя для об'єктивної, відтворюваної та документованої верифікації якості дорожнього будівництва відповідно до найкращих світових практик.

Список використаних джерел

1. ДП «УкрНДНЦ». (2015). ДСТУ Б В.2.3-4:2015. Споруди транспорту. Автомобільні дороги. Норми проєктування. ДП «УкрНДНЦ».
2. PIARC Technical Committee. (2021). *Pavement surface characteristics: A synthesis and guide*. World Road Association
3. Redmon, J., & Farhadi, A. (2018). Yolov3: An incremental improvement. *arXiv preprint arXiv:1804.02767*. https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.02767
4. Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., Dehghani, M., Minderer, M., Heigold, G., Gelly, S., Uszkoreit, J., & Houlsby, N. (2021). An image is worth 16×16 words: Transformers for image recognition at scale. International Conference on Learning Representations (ICLR).
5. Liu, J., Yang, X., Lau, S., Wang, X., Luo, S., Lee, V. C. S., & Ding, L. (2020). Automated pavement crack detection and segmentation based on two-step convolutional neural network. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, *35*(11), 1291-1305.

BIM-ТЕХНОЛОГІЇ ЯК ІНСТРУМЕНТ ІНТЕГРОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ЕНЕРГООЩАДНИХ МАШИН БУДІВЕЛЬНОЇ ІНДУСТРІЇ: МЕТОДОЛОГІЯ ТА ПРАКТИКА ВПРОВАДЖЕННЯ

Микола КУЗЬМІНЕЦЬ професор, д.т.н., завідувач кафедрою [1] (ORCID: 0009-0001-1841-694X),
Артур ОНИЩЕНКО професор, д.т.н., завідувач кафедрою [1] (ORCID: 0000-0002-1040-4530),
Сергій КОЛОТИНСЬКИЙ здобувач [1],
Роман ЯКОБЧУК аспірант [1],
[1] Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, 01010, Київ, Україна

АНОТАЦІЯ. *Досліджено методологічні засади використання BIM-технологій у процесі інтегрованого проєктування машин будівельної індустрії з підвищеними вимогами до енергоефективності, функціональної надійності та цифрової сумісності. Запропоновано чотирирівневу архітектуру інформаційного середовища, що охоплює геометричне моделювання, інженерний аналіз, виробничу підготовку та управління життєвим циклом виробу. Особливу увагу приділено інтеграції цифрових моделей машин із BIM-моделями будівельних об'єктів на основі стандарту IFC, що забезпечує перевірку колізій, моделювання технологічних процесів та оптимізацію експлуатаційних параметрів. Результати апробації підтверджують скорочення кількості конструктивних колізій, зменшення строків проєктування та підвищення ефективності прийняття інженерних рішень протягом усього життєвого циклу технічної системи.*

Ключові слова: *BIM-технології; промислове проектування; будівельні машини; IFC; параметричне моделювання; життєвий цикл виробу; цифрова модель; PLM; колізії.*

Вступ. Проектування сучасних машин будівельної індустрії супроводжується зростаючою конструктивною складністю, скороченням циклів розробки та жорсткими вимогами до міжгалузевої сумісності з будівельними об'єктами [1]. Традиційна CAD-парадигма забезпечує лише геометричне моделювання і не інтегрує інженерний аналіз, виробничу логістику та управління життєвим циклом виробу в єдиному інформаційному середовищі. Методологія Building Information Modeling, утвердившись у будівельному проектуванні, набуває принципово нового значення при застосуванні до машин будівельної індустрії — як інструмент синхронізації цифрових моделей техніки з цифровими моделями будівельних об'єктів [2].

Мета та завдання. Розробка методологічних засад і практичних рекомендацій щодо застосування BIM-технологій на етапах промислового проектування машин будівельної індустрії. Для досягнення мети вирішуються такі завдання: аналіз чинних міжнародних стандартів BIM-проектування (ISO 19650, IFC 4.3) в контексті їх адаптації до машинобудівної галузі; формування архітектури інтегрованого BIM-середовища для машинобудівного підприємства; оцінка ефективності BIM-підходу за критеріями скорочення кількості конструктивних колізій, строків проектування та витрат на дослідні зразки.

Архітектура BIM-середовища. Запропонована архітектура реалізує принцип наскрізної інформаційної моделі виробу на чотирьох рівнях [3]. Рівень геометричного моделювання формується в середовищі Autodesk Inventor або CATIA V6 з автоматичним експортом у формат IFC 4.3 для забезпечення сумісності з будівельними BIM-платформами Revit та ArchiCAD. Рівень інженерного аналізу інтегрує FEM-розрахунки міцності вузлів (ANSYS Mechanical), динамічне моделювання робочих процесів (MSC Adams) та CFD-аналіз теплових режимів гідравлічних систем. Рівень виробничої підготовки включає автоматичне формування специфікацій та програм для верстатів з ЧПК на основі параметричної BIM-моделі. Рівень управління життєвим циклом реалізується через PLM-систему Siemens Teamcenter.

Інтеграція з BIM будівельних об'єктів. Забезпечення семантичної сумісності моделі машини з BIM-моделлю будівельного об'єкта дозволяє в середовищі Autodesk Navisworks виконувати автоматичну перевірку колізій між габаритами машини та просторовими обмеженнями будівельного майданчика, моделювати кінематику робочих рухів крана або екскаватора у

тривимірному середовищі об'єкта [4], а також формувати технологічні карти виконання робіт з автоматичним розрахунком часових і ресурсних параметрів.

Параметричне моделювання та стандартизація. Впровадження параметричного BIM-моделювання уможливлює створення конфігурованих сімейств машин, де зміна базового параметра автоматично перераховує всі залежні конструктивні елементи, оновлює специфікації та перевіряє відповідність нормативним вимогам EN 13001 (крани), ISO 6165 (будівельне обладнання) та ДСТУ відповідних груп машин [5]. Це скорочує час адаптації базової моделі до нових типорозмірів на 55–70% порівняно з традиційним перепроектуванням.

Результати. Апробація BIM-підходу засвідчує: скорочення кількості конструктивних колізій, виявлених на етапі виготовлення дослідного зразка, на 65–78%; зменшення тривалості циклу проектування на 30–40%; зниження витрат на фізичне прототипування на 25–35%; підвищення точності кошторисів на виготовлення до ±3% завдяки автоматичному формуванню специфікацій; скорочення часу технічного обслуговування машини в експлуатації на 20% завдяки інтерактивним сервісним моделям на основі BIM.

Висновки. Застосування BIM-технологій у промисловому проектуванні машин будівельної індустрії формує інтегроване інформаційне середовище, що охоплює весь життєвий цикл виробу. Синхронізація цифрових моделей машин із BIM-моделями будівельних об'єктів забезпечує якісно новий рівень координації між машинобудівниками, будівельниками та замовниками інфраструктурних проектів.

Список використаних джерел

1. International Organization for Standardization. (2018). ISO 19650-1:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM)—Part 1: Concepts and principles. ISO.
2. Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2018). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers* (3rd ed.). Wiley.
3. Succar, B. (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. Automation in Construction, 18(3), 357–375. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003
4. Бібік, М. В., & Назаренко, І. І. (2022). Цифрові технології в проєктуванні будівельних машин. Національний транспортний університет.
5. European Committee for Standardization. (2015). EN 13001-1:2015. Crane safety—General design. CEN.

ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ НА ОСНОВІ ШІ ДЛЯ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ МАШИН ДЛЯ БУДІВНИЦТВА ДОРІГ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

Микола КУЗЬМІНЕЦЬ професор, д.т.н., завідувач кафедрою [1] (ORCID: 0009-0001-1841-694X),
Артур ОНИЩЕНКО професор, д.т.н., завідувач кафедрою [1] (ORCID: 0000-0002-1040-4530),
Сергій КОЛОТИНСЬКИЙ здобувач [1],
[1] Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, 01010, Київ, Україна

АНОТАЦІЯ. *Запропоновано концепцію цифрового двійника дорожньо-будівельних машин, орієнтовану на забезпечення багатопараметричного моніторингу, прогнозування технічного стану та адаптивної оптимізації технологічних процесів у реальному часі. Архітектура системи поєднує мережу IoT-датчиків, цифрову модель фізичного об'єкта та модулі штучного інтелекту для аналізу та керування виробничими процесами. Для підвищення ефективності функціонування комплексу «асфальтоукладальник – коток – контроль якості» використано алгоритми LSTM для прогнозування зміни технологічних параметрів, методи навчання з підкріпленням для адаптивного керування режимами роботи машин і байєсівські підходи до підтримки прийняття рішень. Запропонований підхід забезпечує синхронізацію роботи технічних засобів, підвищення якості дорожнього покриття, зниження експлуатаційних витрат та створює передумови для переходу до інтелектуального управління дорожньо-будівельним виробництвом.*

Ключові слова: *цифровий двійник; штучний інтелект; дорожні машини; оптимізація в реальному часі; асфальтоукладання; IoT; предиктивна діагностика.*

Вступ. Сучасне дорожнє будівництво характеризується зростаючими вимогами до якості покриттів, скорочення термінів та зниження собівартості робіт [1]. Традиційні методи контролю технологічних параметрів ґрунтуються на дискретних вимірюваннях і не забезпечують оперативного реагування на відхилення в роботі машин. Впровадження цифрових двійників на основі штучного інтелекту відкриває принципово новий підхід до управління будівельно-технологічними процесами, забезпечуючи безперервний моніторинг, прогнозування відмов та автоматичну оптимізацію параметрів у замкнутому контурі керування [2].

Мета та завдання. Розробка концептуальної архітектури та методологічних засад системи цифрового двійника для комплексу дорожньо-будівельних машин. Для досягнення мети вирішуються такі завдання: формування математичної моделі взаємодії машин у технологічному ланцюжку «асфальтоукладальник — коток — контроль якості»; розробка алгоритмів машинного навчання для динамічної корекції параметрів; оцінка економічної ефективності впровадження системи.

Архітектура системи. Запропонована система включає три взаємопов'язані рівні [3]. На рівні збору даних встановлюються датчики IoT на вузлах машин (температура суміші, частота вібрації котків, швидкість укладання, товщина шару), GPS-модулі для просторової прив'язки та георадарні сканери GPR для неруйнівного контролю. Рівень цифрового двійника реалізує цифровий аналог фізичного об'єкта на основі диференційних рівнянь теплообміну та механіки деформування асфальтобетону з частотою оновлення стану 10–50 Гц. Рівень ШІ-оптимізації включає ансамбль алгоритмів: нейронні мережі LSTM для прогнозування термічних втрат суміші, алгоритми reinforcement learning для адаптивного управління швидкістю та вібрацією, а також байєсівські методи для планування маршрутів вантажівок з мінімізацією простоїв.

Ключові параметри моніторингу. Система здійснює безперервний контроль таких показників: температура укладання (оптимальний діапазон 140–160°C); ступінь ущільнення (не менше 92% від максимальної густини); рівність покриття за показником IRI (не більше 2,0 м/км); товщина конструктивного шару (допуск ±5 мм); витрата паливно-мастильних матеріалів та завантаженість двигунів машин [4].

Результати. Чисельне моделювання та дані апробації систем-аналогів свідчать про такі ефекти: підвищення продуктивності комплексу машин на 10–15% завдяки синхронізації робочих

ритмів; зниження витрати паливно-мастильних матеріалів на 7–12% через оптимізацію режимів роботи двигунів; підвищення відповідності покриттів нормативним вимогам з 88% до 96–98%; скорочення кількості рекламаційних ділянок на 60–70%; зменшення позапланових простоїв завдяки предиктивній діагностиці вузлів машин [5].

Висновки. Застосування цифрових двійників на основі ШІ є перспективним напрямом підвищення ефективності дорожньо-будівельного виробництва. Запропонована архітектура забезпечує перехід від реактивного управління до проактивної оптимізації, що є критично важливим для виконання сучасних вимог щодо якості автомобільних доріг і раціонального використання ресурсів.

Список використаних джерел

1. Міністерство регіонального розвитку України. (2015). ДБН В.2.3-4:2015. Споруди транспорту. Автомобільні дороги. Мінрегіон України.
2. Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In Transdisciplinary perspectives on complex systems (pp. 85–113). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
3. Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 15(4), 2405–2415. https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186
4. Назаренко, І. І., & Кузьмінець, М. П. (2023). Моделювання технологічних процесів дорожньо-будівельних машин. Національний транспортний університет.
5. Hochreiter, S., Schmidhuber, J. Long Short-Term Memory. Neural Computation, 1997, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780. https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735

ОПТИМІЗАЦІЯ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ НА ОСНОВІ АЛГОРИТМІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ТА МАСИВУ ДАНИХ

Микола КУЗЬМІНЕЦЬ професор, д.т.н., завідувач кафедрою [1] (ORCID: 0009-0001-1841-694X),
Андрій ДУДКО здобувач [1],
Юрій ДУБОВЕНКО доцент, к.ф-м.н., доцент [1] (ORCID: 0000-0002-8128-5989),
[1] Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, 01010, Київ, Україна

АНОТАЦІЯ. *Розроблено методологічний підхід до підвищення ефективності логістичних процесів експлуатації технологічних транспортних засобів шляхом інтеграції алгоритмів машинного навчання та технологій аналізу великих даних. Запропонована аналітична платформа передбачає безперервний збір телематичної інформації з бортових систем, її обробку в режимі реального часу та формування рекомендацій для прийняття управлінських рішень. Для динамічної маршрутизації транспортних потоків використано алгоритм глибокого навчання з підкріпленням PPO, для прогнозування попиту на перевезення – рекурентні нейронні мережі LSTM, а для організації предиктивного технічного обслуговування – ансамблеві моделі Random Forest та XGBoost. Практична реалізація запропонованого підходу сприяє скороченню холостого пробігу, підвищенню коефіцієнта технічної готовності рухомого складу, зниженню експлуатаційних витрат і забезпечує комплексну цифрову трансформацію транспортно-логістичних систем.*

Ключові слова: *машинне навчання; масив даних; логістика; маршрутизація; предиктивне технічне обслуговування; транспортні засоби; оптимізація; LSTM; коефіцієнт технічної готовності.*

Вступ. Транспортно-логістична галузь генерує щороку понад 2,5 екзабайти операційних даних, однак більшість підприємств використовує менше 10% цього масиву для прийняття управлінських рішень. Традиційні детерміновані моделі маршрутизації та планування технічного обслуговування не враховують динамічної природи транспортних систем. За оцінками McKinsey

Global Institute, впровадження методів машинного навчання в логістику дозволяє скоротити операційні витрати на 15–20% та підвищити коефіцієнт використання парку на 12–18% [1].

Мета та завдання. Розробка методологічного підходу до оптимізації логістичних процесів транспортного підприємства на основі інтеграції алгоритмів машинного навчання з аналізом великих даних. Для досягнення мети вирішуються такі завдання: систематизація джерел операційних даних та формування уніфікованої платформи їх збору й обробки; розробка моделей машинного навчання для маршрутизації, прогнозування попиту та предиктивного технічного обслуговування; кількісна оцінка ефекту оптимізації за показниками пробігу, витрати палива та коефіцієнта технічної готовності парку.

Архітектура аналітичної платформи. Запропонована платформа формується на трьох рівнях [2]. Рівень збору даних інтегрує телематичні системи бортових контролерів (CAN-шина), GPS-трекери, дані систем управління складом WMS, зовнішні джерела — дорожній трафік, метеодані, паливні індекси — через уніфіковані API. Рівень обробки реалізує ETL-конвеєр на платформі Apache Kafka з обробкою потоків у реальному часі та пакетним аналізом в Apache Spark для роботи з ретроспективними масивами обсягом понад 10 ТБ. Рівень прийняття рішень формує рекомендаційні модулі для диспетчерів і автоматичні команди керування парком через інтеграцію з ERP-системою підприємства.

Алгоритмічне забезпечення. Задача динамічної маршрутизації вирішується на основі алгоритму глибокого навчання з підкріпленням Proximal Policy Optimization, що перевищує класичне вирішення задачі комівояжера на 8–14% [3]. Прогнозування попиту реалізується моделлю LSTM із горизонтом планування 7–30 діб і точністю MAPE $\leq$ 6,2% на тестовій вибірці. Предиктивне технічне обслуговування базується на ансамблі Random Forest та градієнтного бустингу XGBoost для прогнозування залишкового ресурсу агрегатів за параметрами вібрації, температури та тиску оливи з точністю класифікації відмов F1-score = 0,93 [4].

Результати. Апробація методології на вибірці з багатьох транспортних підприємств демонструє такі результати: скорочення холостого пробігу на 18–24%; зниження питомої витрати паливно-мастильних матеріалів на 9–13%; підвищення коефіцієнта технічної готовності парку з 0,82 до 0,91–0,94 через перехід до предиктивного обслуговування; скорочення середнього часу простою на 31%; зростання коефіцієнта використання вантажопідйомності з 0,71 до 0,86.

Висновки. Інтеграція алгоритмів машинного навчання з аналізом великих даних формує якісно новий рівень управління логістичними процесами транспортного підприємства. Запропонований підхід забезпечує системний ефект оптимізації, що перевищує результати локальних рішень завдяки врахуванню взаємозв'язків між маршрутизацією, технічним станом парку та динамікою попиту в єдиному аналітичному контурі.

Список використаних джерел

1. McKinsey Global Institute. (2022). The age of analytics: Competing in a data-driven world. McKinsey & Company
2. Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., Rusu, A. A., Veness, J., Bellemare, M. G., Graves, A., Riedmiller, M., Fidjeland, A. K., Ostrovski, G., Petersen, S., Beattie, C., Sadik, A., Antonoglou, I., King, H., Kumaran, D., Wierstra, D., Legg, S., & Hassabis, D. (2015). Human-level control through deep reinforcement learning. Nature, 518, 529–533. https://doi.org/10.1038/nature14236
3. Schulman, J., Wolski, F., Dhariwal, P., Radford, A., & Klimov, O. (2017). Proximal policy optimization algorithms. arXiv. https://arxiv.org/abs/1707.06347
4. Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. In Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (pp. 785–794). https://doi.org/10.1145/2939672.2939785

МЕТРОЛОГІЧНЕ ТА НОРМАТИВНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ ТРАНСПОРТУВАННЯ ВОДИ В УМОВАХ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ

Олена Фостащенко, доцент, к.т.н., доцент [1] (ORCID: 0000-0003-4287-2838),
Оксана Добровольська, доцент, к.т.н., доцент [1] (ORCID: 0000-0002-1337-7216),
[1] Запорізький національний університет, проспект Соборний, 226, Запоріжжя, 69006, Україна

АНОТАЦІЯ. *У роботі досліджено метрологічне та нормативне забезпечення систем транспортування і поверхневого водовідведення в умовах міської забудови. Розглянуто основні проблеми функціонування водопровідних і водовідвідних мереж, пов'язані з урбанізацією, зростанням навантажень на інфраструктуру, зменшенням інфільтраційної здатності територій та підвищенням ризиків підтоплення. Проаналізовано сучасні нормативно-технічні вимоги до контролю параметрів роботи систем, а також можливості застосування засобів вимірювання, моніторингу та автоматизованого управління. Обґрунтовано доцільність впровадження інтегрованих підходів, що поєднують традиційні інженерні рішення з природоорієнтованими технологіями. Показано, що використання інформаційних систем, моделей прогнозування та моніторингу в режимі реального часу сприяє підвищенню надійності, ефективності й екологічної безпеки міської водогосподарської інфраструктури.*

Ключові слова: *міська інфраструктура; природоорієнтовані технології; моніторинг водовідведення; автоматизоване управління; поверхневий стік.*

Вступ. Системи поверхневого водовідведення є невід'ємною складовою міської інженерної інфраструктури, що забезпечує відведення дощових і талих вод, запобігання підтопленням та підтримання екологічної рівноваги урбанізованих територій. В умовах інтенсивної урбанізації та кліматичних змін зростає необхідність підвищення ефективності їх функціонування шляхом впровадження інноваційних та інтегрованих підходів [1].

Аналіз літературних джерел. Аналіз сучасного стану систем водовідведення свідчить про наявність низки проблем: невідповідність існуючих мереж сучасним навантаженням, зниження інфільтраційної здатності територій через збільшення площ водонепроникних покриттів, забруднення поверхневого стоку та недостатній рівень автоматизації управління системами [2].

Мета роботи. Метою роботи є дослідження метрологічного та нормативного забезпечення систем транспортування води в умовах міської забудови, аналіз сучасних вимог до контролю параметрів функціонування водопровідних мереж, а також обґрунтування застосування сучасних засобів вимірювання, моніторингу та нормативно-технічних підходів для підвищення надійності, ефективності й безпеки систем водопостачання.

Матеріали і методи. У роботі використано нормативно-технічну документацію у сфері водопостачання, метрології та стандартизації, наукові публікації, сучасні методики моніторингу й контролю параметрів систем транспортування води.

Виклад основного матеріалу. Системи поверхневого водовідведення виконують важливі функції у структурі міста, зокрема забезпечують захист будівель, транспортної інфраструктури та інженерних мереж від негативного впливу надлишкових вод, а також сприяють підвищенню стійкості міських територій до екстремальних гідрометеорологічних явищ [3].

Сучасні підходи до організації водовідведення передбачають перехід від традиційних інженерних рішень до інтегрованих систем, що поєднують «сірі» інфраструктурні елементи з природоорієнтованими технологіями. Такий підхід охоплює не лише дренаж, а й управління якістю води, екологічний баланс, рекреаційний потенціал та благоустрій територій [4].

Особливого значення набуває впровадження концепцій інтегрованого управління зливовими водами, які базуються на збереженні природного водного циклу, зменшенні пікових навантажень на мережі та локальному управлінні стоком. Контроль «першого змиву» та регулювання обсягів стоку на джерелі його утворення дозволяє суттєво знизити рівень забруднення та навантаження на каналізаційні системи [4].

Інтеграція сучасних технологій, зокрема систем моніторингу, автоматизованого управління потоками води та програмного моделювання, забезпечує підвищення ефективності функціонування водовідвідних систем, оперативне реагування на надзвичайні ситуації та оптимізацію експлуатаційних витрат [6].

Системи поверхневого водовідведення є ключовим елементом забезпечення технічної, екологічної та соціальної стійкості міст. Перехід до інтегрованих моделей управління стоком із використанням сучасних технологій та нормативного забезпечення дозволяє підвищити ефективність функціонування інфраструктури, зменшити екологічне навантаження та покращити якість міського середовища.

Обговорення. Застосування інтегрованих підходів до управління зливовими водами, що поєднують інженерні та природоорієнтовані рішення, потребує впровадження систем моніторингу в режимі реального часу, що забезпечують підвищення точності контролю та прогнозування роботи мереж.

Висновки. Використання сучасних інформаційних технологій і моделей дозволяє оптимізувати режими функціонування систем та мінімізувати ризики підтоплень.

Обґрунтовано доцільність впровадження інтегрованих інформаційних технологій і сучасних методів контролю для оптимізації режимів роботи систем транспортування води та підвищення якості комунальних послуг у міському середовищі.

Список використаних джерел

1. Grigg, N. S. (2024). Управління зливовими водами: комплексний підхід до підтримки здорових, комфортних для життя та екологічних міст. Urban Science, 8(3), 89.
2. ДП «УкрНДНЦ». (2016). ДСТУ 8691:2016. Стічні води. Настанови щодо встановлення технологічних нормативів відведення дощових стічних вод у водні об'єкти.
3. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. (2014). ДСТУ-Н Б В.2.5-71:2013. Споруди для очищення поверхневих стічних вод. Настанова з проектування.
4. Grigg, N. S. (2025). Stormwater systems and their potential to transform cities. Hydrology, 12(12), 336. https://doi.org/10.3390/hydrology12120336
5. World Economic Forum. (2025). Transformation of cities. https://www.weforum.org/stories/urban-transformation/ .

СЕКЦІЯ 4
«ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТА ЕНЕРГООЩАДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ПРОЦЕСАХ ОБРОБКИ ТА СТВОРЕННЯ МАТЕРІАЛІВ»

УДОСКОНАЛЕННЯ ЗБУДНИКІВ ДВОЧАСТОТНИХ ВІБРАЦІЙ З ВЯЗКИМ ТЕРТЯМ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ НА ЕФЕКТІ ЗОМЕРФЕЛЬДА

Яцун Володимир, доцент, д.т.н., професор[1],
Філімоніхін Геннадій, професор, д.т.н., завідувач кафедри деталей машин та прикладної механіки[1],
Гозбенко Єгор, аспірант[1],
[1]Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, просп. Університетський 8, 25006, Україна

АНОТАЦІЯ. *Експериментально виявлені недоліки кульових, роликових і маятникових віброзбудників, що працюють на ефекті Зомерфельда, пов'язані з витіканням мастила з корпусу віброзбудника, відривом тіл кочення від бігової доріжки при інтенсивних вібраціях, а також із небажаним ковзанням тіл кочення по доріжках замість повноцінного кочення, що знижує ефективність роботи та прискорює зношування елементів. Удосконалення конструкцій показало, що застосування спеціальних бортиків у корпусі віброзбудника дозволяє суттєво зменшити втрати мастильного матеріалу під час експлуатації та підвищити надійність роботи пристрою. Крім того, запропоновані нові конструкції маятникових віброзбудників забезпечують стабільніший рух робочих елементів, мінімізують відрив тіл кочення та усувають зазначені недоліки, підвищуючи довговічність і ефективність системи.*

Ключові слова: *резонансна вібромашина; двочастотна вібромашина; ефект Зомерфельда, грохот, вібросито, відцентровий сепаратор*

Вступ. Перспективними є двочастотні резонансні віброзбудники, які працюють на ефекті Зомерфельда. В таких пристроях вантаж у вигляді кулі, ролика чи маятника рухається усередині порожнини корпусу віброзбудника. Їх розганяють сили в'язкого опору, утворені мастилом усередині корпусу. Через ефект Зомерфельда вантаж не може розігнатися до швидкості обертання корпусу і застрягає на білярезонансній частоті чим збуджує інтенсивні навколорезонансні вібрації. Дебалансна маса на корпусі віброзбудника обертається з частотою обертання корпусу, чим збуджує швидкі вібрації. Поліпшення конструкцій таких пристроїв є актуальною задачею.

Аналіз літературних джерел. Аналіз конструкцій двочастотних (полічастотних) і резонансних вібраційних машин показав, що поєднання низько- та високочастотних коливань підвищує інтенсивність технологічних процесів, а використання резонансних режимів забезпечує високу енергоефективність роботи [1]. Серед двочастотних збудників вібрацій найбільш прості у конструкції і надійні у роботі інерційні віброзбудники [2-7]. Такі пристрої збуджують коливання завдяки рухомих мас. Віброзбудники у вигляді планетарних механізмів [2,3] збуджують зв'язані по частоті двочастотні вібрації і для їх налаштування під резонансну частоту вібромашини треба використовувати активне керування швидкістю обертання механізму. Найбільш просту конструкцію збудників резонансних двочастотних вібрацій мають пристрої, що працюють на ефекті Зомерфельда [4-7]. В них дебалансна маса розганяється двигуном не на пряму, а силами в'язкого тертя, через гідравлічну муфту [4], чи мастилом усередині корпусу віброзбудника [5-7]. В них частоти повільних і швидких коливань не зв'язані, а підлаштування під резонансну частоту коливань вібромашини відбувається автоматично завдяки ефекту Зомерфельда. Маятникові, кульові і роликові віброзбудники, що працюють на ефекті Зомерфельда [5-7], на відміну від технічних рішень роботи [4], мають найпростішу конструкцію і є готовими пристроями, що не потребую уведення в свою конструкцію інших пристроїв, зокрема, гідравлічної муфти.

Мета роботи. Виявити недоліки у роботі двочастотних віброзбудників, що працюють на ефекті Зомерфельда, та поліпшити їх конструкції.

Виклад основного матеріалу. На стенді для дослідження ефекту Зомерфельда [7] з кульовим віброзбудником (рис.1) було встановлено наступне:

1) без змащування бігової доріжки не можливо істотно наблизити частоту застрягання кулі до резонансної частоти вібромашини і тому амплітуда повільних навколорезонансних коливань незначна;

2) змащування доріжки мастилом дещо збільшує амплітуду повільних навколорезонансних коливань, але кардинально не поліпшує роботу пристрою;

3) при повному заповнені мастилом корпусу віброзбудника:

- значно збільшуються амплітуди повільних коливань;
- кулі легко розігнати до резонансної частоти коливань вібромашини;
- виникає витік мастила з корпусу віброзбудника через великі відцентрові сили, що діють на мастило;
- при значних вібраціях кулі відриваються від бігової доріжки, ковзають (а не котяться), що знижує стабільність навколорезонансних вібрацій.

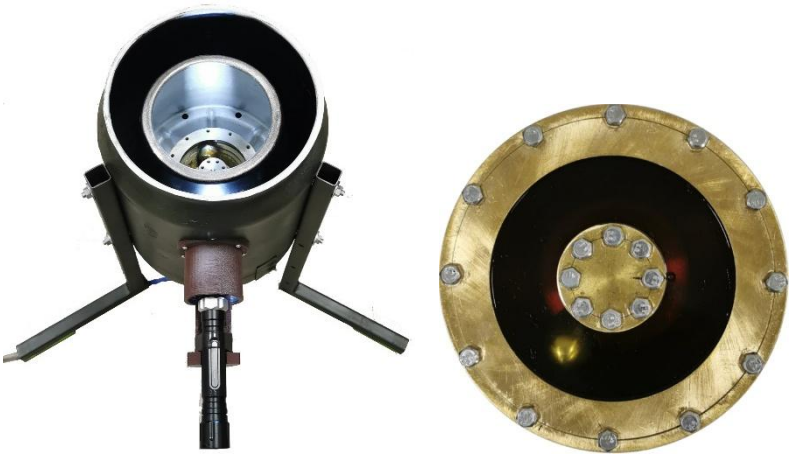
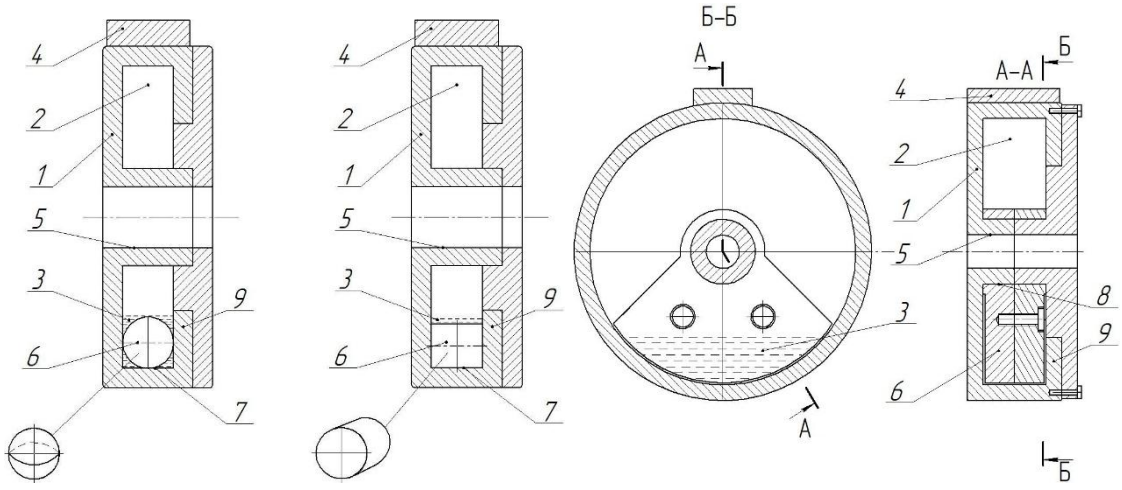


Рис.1. Стенд для дослідження ефекту Зомерфельда з кульовим віброзбудником [7]

Були запропоновані нові конструкції віброзбудників, що усувають витік мастила з корпусу віброзбудника. На рис. 2 представлені ескізи нових конструкцій віброзбудників.



а б в

Рис. 2. Віброзбудники з бортиками у корпусі:
а – кульовий; б – роликовий, в – маятниковий

Запропоновані збудники двочастотних вібрацій (рис. 2) складаються з корпусу 1, що має кільцеву порожнину 2, частково заповненою мастилом 3, дебалансну масу 4. В корпусі є отвір 5 для встановлення на вал вібромашини чи електродвигуна. Усередині порожнини розміщений вантаж 6 (куля, ролик чи маятник), встановлений з можливістю руху. У кульовому (рис. 2, а) чи роликовому (рис. 2, б) віброзбуднику вантажі котяться по кільцевим біговим доріжкам 7. У маятниковому віброзбуднику (рис. 2, в) маятник обертається навколо втулки 8. Для запобіганню витіканню мастила корпус виконується з бортиком 9. На ескізах віброзбудників видно, як забезпечується можливість встановлення вантажів у корпус з бортиком.

Пристрої працюватимуть наступним чином. Після пуску вібромашини вал починає обертати корпус віброзбудника. Завдяки мастилу вантаж поступово захоплюється в рух, відстає від корпусу. Коли вал з корпусом набирають робочої частоти обертання ω, вантаж, через ефект Зомерфельда, застряє на частоті Ω, дещо меншій за резонансну частоту коливань вібромашини, чим створює інтенсивні повільні вібрації з навколорезонансною частотою Ω. Дебаланс на корпусі збуджує швидкі вібрації вібромашини з частотою обертання корпусу (валу) ω. Зміною робочої частоти обертання валу можна змінювати швидкі вібрації, та збільшувати інтенсивність навколорезонансних коливань через наближення частоти застрягання вантажу до резонансної частоти вібромашини. Під дією відцентрових сил мастило розтікається по кільцевій порожнині. Через те, що виконано бортик у корпусі, мастило утримується цим бортиком усередині кільцевої порожнини, що усуває витікання мастила з корпусу під час роботи пристрою. Незалежно від завантаження вібромашини маятник буде автоматично підстроюватися під поточну резонансну частоту коливань вібромашини через ефект Зомерфельда.

Висновки. Запропоновані пристрої усувають витік мастила за рахунок бортиків, введених у конструкцію пристроїв. Конструкції кульового і роликового віброзбудників найпростіші, але при великих вібраціях тіла кочення можуть підстрибувати на біговій доріжці чи ковзати по неї, що знижує стабільність навколорезонансних вібрацій. Маятниковий віброзбудник немає такого недоліку, але його конструкція, зокрема, система підвісу маятнику, дещо складніша.

Список використаних джерел

1. Gurskyi, V. M., & Kuzio, I. V. (2015). Ratsionalnyi syntez dvochastotnykh rezonansnykh vibratsiinykh mashyn [Rational synthesis of two-frequency resonant vibration machines]. Avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsesiv u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni, 49, 8–17. https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/3428/avtomatyzac2015494.pdf [in Ukrainian].
2. Korendiy, V., Kuzio, I., Nikipchuk, S., Kotsiumbas, O., & Dmyterko, P. (2022). On the dynamic behavior of an asymmetric self-regulated planetary-type vibration exciter. Vibroengineering Procedia, 42, 7–13. http://dx.doi.org/10.21595/vp.2022.22580
3. Gurskyi, V., Korendiy, V., Krot, P., Zimroz, R., Kachur, O., & Maherus, N. (2023). On the dynamics of an enhanced coaxial inertial exciter for vibratory machines. Machines, 11, Article 97. https://doi.org/10.3390/machines11010097
4. Kapalo, O., Lanets, O., Vambol, I., & Derevenko, I. (2025). Parameter development and analysis of the oscillatory system of a two-mass resonant vibrating table with an inertial drive. Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science, 11(4), 36–49. https://doi.org/10.23939/ujmems2025.04.036
5. Filimonikhin, H. B., & Yatsun, V. V. (2014). Zastosuvannia pasyvnoho avtobalansyra yak zbudnyka kruhovykh dvochastotnykh vibratsii [Application of a passive auto-balancer as an exciter of circular two-frequency vibrations] (Patent of Ukraine for utility model No. 92337). [in Ukrainian].
6. Filimonikhin, H. B., & Yatsun, V. V. (2015). Sposob vozbuzhdeniia dvukhchastotnykh vibratsii passivnymi avtobalansirami [Method of excitation of two-frequency vibrations by passive auto-balancers]. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(7[76]), 9–14. http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2015.47116 [in Russian].
7. Filimonikhin, G., Yatsun, V., Matsui, A., Olijnichenko, L., & Pukalov, V. (2022). Determining experimentally the patterns of the manifestation of the Sommerfeld effect in a ball auto-balancer. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(7[119]), 96–104. http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265578

КУЛЬОВІ І РОЛИКОВІ ДВОЧАСТОТНІ ВІБРОЗБУДНИКИ, У ЯКИХ ТІЛА КОЧЕННЯ РОЗГАНЯЮТЬСЯ СИЛАМИ ОПОРУ КОЧЕННЮ

Володимир Пирогов, доцент, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри деталей машин та прикладної механіки[1],
Андрій Гречка, доцент, кандидат технічних наук, завідувач кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки[1],
Денис Герасимович, студент кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки[1],
[1]Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8, 25006, Україна

АНОТАЦІЯ. *Запропоновано у кульових і роликових двочастотних віброзбудниках, що працюють на ефекті Зомерфельда розганяти тіла кочення збільшеними силами опору коченню. Такі сили істотно наближають частоту застрягання тіл кочення до резонансної частоти вібромашини, чим підвищують інтенсивність повільних навколорезонансних коливань. Перевагами нових віброзбудників є інтенсивність і стабільність навколорезонансних вібрацій, їх незалежність від частоти обертання корпусу віброзбудника. Це надає можливість незалежно змінювати швидкі коливання шляхом зміни частоти обертання корпусу віброзбудника з прикріпленою до нього дебалансною масою. Нові пристрої застосовні у одно- і багатомасових вібромашинах з різною кінематикою руху віброплатформ при створенні нових універсальних, високопродуктивних і енергоощадних вібромашин.*

Ключові слова: *вібраційна машина, ефект Зомерфельда, явище синхронізації, інерційний віброзбудник, контактна теорія Герца*

Вступ. У будівельній, машинобудівній, видобувній, сільськогосподарський галузях виробництва широко застосовуються вібраційні машини. Ефективність їх роботи значною мірою визначається характеристиками віброзбудників. Перспективними є двочастотні інерційні віброзбудники, що працюють на ефекті Зомерфельда. Модернізацією їх конструкцій можна розробити віброзбудники з новими динамічними характеристиками. Це потрібно для створення нових універсальних, високопродуктивних і енергоощадних вібромашин.

Аналіз літературних джерел. Найбільш простий спосіб збудження резонансних коливань заснований на ефекті Зомерфельда [1]. Так, при обертанні дебалансного маятника двигуном недостатньої потужності маятник не може розігнатися і застрягає на навколорезонансній частоті коливань віброплатформи. Цим збуджуються інтенсивні навколорезонансні вібрації, але перевантажується двигун. Для подолання перевантаження пропонувалося розганяти маятник не безпосередньо, а через повітря [2], гідродинамічну муфту [3], мастилом у герметичному корпусі віброзбудника, де маятник вільно насаджений на втулку [4]. Всі варіанти дозволяють створювати керовані резонансні віброзбудники, бо зі збільшенням швидкості обертання приводного валу збільшується сила, що розганяє маятник чим коливання віброплатформи наближаються до резонансних. У віброзбудниках, запропонованих в [4] кулі, ролики чи маятники знаходяться у порожнині корпусу, заповненій мастилом, а сам корпус насаджується на приводний вал. Маятник вільно обертається навколо втулки. Кулі чи ролики можуть котитися по кільцевій біговій доріжці. На корпус кріпиться дебалансна маса. При застряганні вантажів збуджуються повільні навколорезонансні вібрації. Дебалансна маса на корпусі збуджує швидкі вібрації з частотою обертання корпусу. Отже, це двочастотні інерційні віброзбудники, що працюють на ефекті Зомерфельда. В [5] побудована загальна теорія таких віброзбудників у випадку, коли вантажі розганяються силами в'язкого опору, утвореними мастилом. Такі віброзбудники дозволяють створювати універсальні вібромашини широкого призначення. Наприклад, один вібростол можна використовувати як для ущільнення будівельних сумішей (малоінтенсивні вібрації), так і для сепарації, класифікації, просіювання (інтенсивні вібрації із створенням киплячого шару) [6].

Для розгону куль і роликів можна використовувати сили опору коченню. В роботах [7-9] запропоновані аналітичні залежності для визначення коефіцієнта опору кочення при коченні кулі і циліндра по різним поверхням, проаналізовані фактори, що впливають на величину сил опору

кочення. Новий механізм розгону тіл кочення дозволить створювати двочастотні віброзбудники і вібромашини з новими динамічними характеристиками.

Мета роботи. Розробка конструкцій кульових і роликових збудників двочастотних вібрацій, в яких тіла кочення розганяються збільшеними силами опору коченню.

Основний зміст. Сили опору коченню не залежать від того, наскільки корпус при обертанні випереджає тіло кочення. При будь-якій швидкості обертання корпусу рушійний момент, що розганяє кулю чи ролик дорівнює:

$$M = \delta N, \quad (1)$$

де δ – коефіцієнт опору коченню, N – нормальна реакція бігової доріжки.

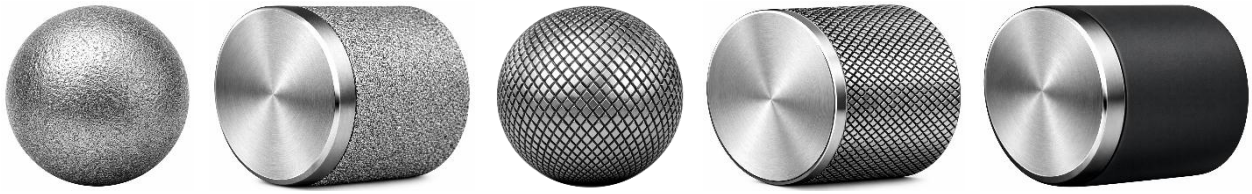
Коли рух вібромашини встановиться, середнє значення нормальної реакції бігової доріжки буде сталим і визначатиметься за формулою:

$$N = \Omega^2 R, \quad (2)$$

де Ω – навколорезонансна кутова швидкість, на який застрягла куля чи ролик, R – відстань від подовжньої осі вала до центра тіла кочення. Тому середнє значення рушійного моменту буде сталим і незалежно від швидкості обертання корпусу тіло кочення застрягатиме на певній навколорезонансній частоті, чим буде збуджувати стабільні відповідні вібрації.

Отже, в нових віброзбудниках можна керувати швидкими вібраціями без впливу на повільні. Це корисно для створення універсальних вібромашин широкого призначення.

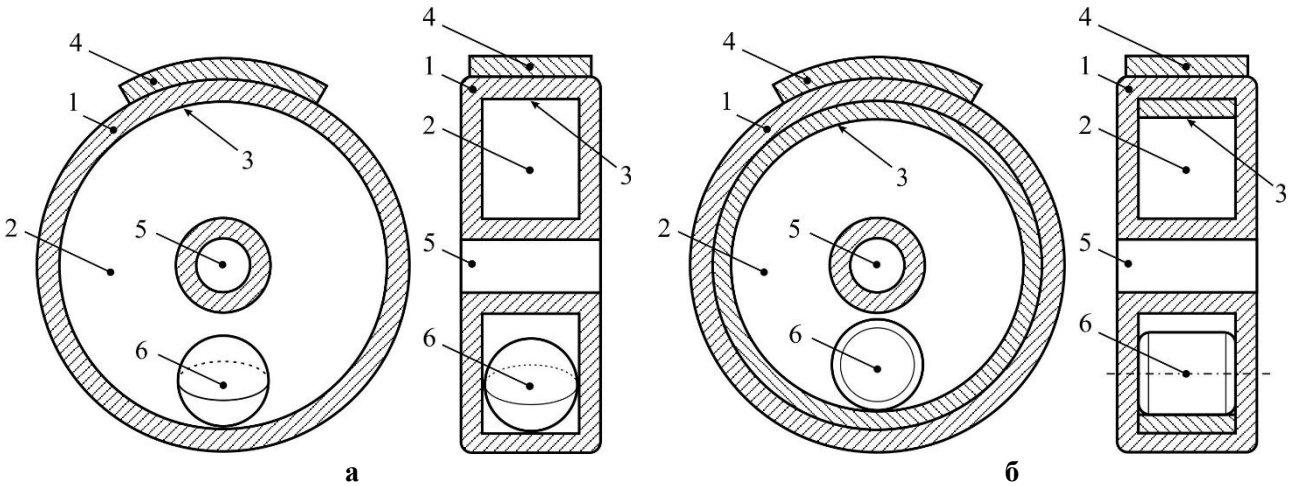
Запропоновані тіла кочення з підвищеним коефіцієнтом опору коченню (рис. 1).



а б в г д

Рис. 1. Тіла кочення: а – шорстка куля; б - шорсткий ролик; в – рифлена куля; в - рифлений ролик; г – ролик у гільзі з в'язко-пружного матеріалу

На рис. 2 представлені ескізи нових віброзбудників з запропонованими тілами кочення.



а б

Рис. 2. Варіанти двочастотних віброзбудників: а – кульового; б – роликового

Віброзбудники мають корпус 1, який має кільцеву порожнину 2 з біговою доріжкою 3, дебалансну масу 4, отвір для насадження на вал 5, тіло кочення 6, установлене у порожнині з можливістю кочення по біговій доріжці. Бігова доріжка може бути частиною корпусу (рис. 2, а), або бути виконана окремо у вигляді вкладки з більш м'якого матеріалу (рис. 2, б).

На рис. 3 зображено збудник двочастотних вібрацій 1 насаджений на вал 7 двигуна 8. Двигун встановлений опорами 9 на платформу 10. Платформу підтримують пружно-в'язкі опори 11, а напрямні 12 дозволяють платформі коливатися поступально вертикально.

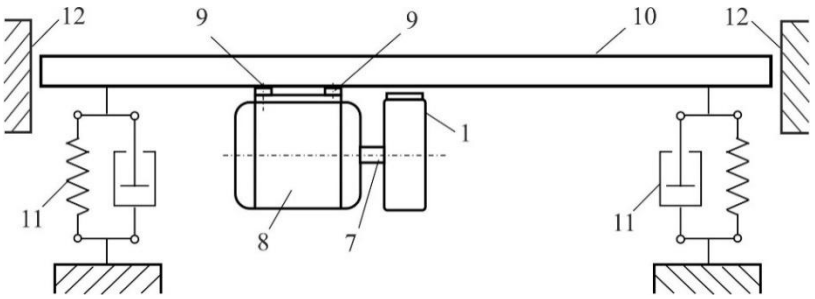


Рис. 3. Одномасова вібромашина з прямолінійним поступальним рухом платформи

Збудник двочастотних вібрацій може встановлюватися і на багатомасові вібромашини з різною кінематикою руху платформ. Незалежно від завантаження вібромашини тіло кочення буде автоматично підстроюватися під поточну резонансну частоту вібромашини.

Висновки. Запропоновані пристрої створюють інтенсивні, стабільні повільні навколорезонансні вібрації, що не залежать від швидкості обертання корпусу віброзбудника. Це дає можливість окремо керувати швидкими вібраціями шляхом зміни швидкості обертання корпусу (разом з приєднаним дебалансом), що надає можливість створювати вібромашини з новими динамічними характеристиками.

Список використаних джерел

1. Sommerfeld, A. (1904). Beitrage zum dinamischen Ausbay der Festigkeislehre. Zeitschriff des Vereins Deutsher Jngeniere, 48(18), 631–636.
2. Kuzio, I. V., Lanets, O. V., & Gurskyi, V. M. (2012). Formuvannia ta analiz matematychnoi modeli vibratsiinoi mashyny z aeroinertsiinym zburenniam [Formation and analysis of a mathematical model of a vibration machine with aeroinertial excitation]. Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohii, 2(66), 50–58. http://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/5316.pdf [in Ukrainian].
3. Kapalo, O., Lanets, O., Vambol, I., & Derevenko, I. (2025). Parameter development and analysis of the oscillatory system of a two-mass resonant vibrating table with an inertial drive. Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science, 11(4), 36–49. https://doi.org/10.23939/ujmems2025.04.036
4. Filimonikhin, H. B., & Yatsun, V. V. (2014). Zastosuvannia pasyvnoho avtobalansyra yak zbudnyka kruhovykh dvochastotnykh vibratsii [Application of a passive auto-balancer as an exciter of circular two-frequency vibrations] (Patent of Ukraine for utility model No. 92337). [in Ukrainian].
5. Yatsun, V. V. (2024). Dynamika dvochastotnykh rezonansnykh vibromashyn, shcho pratsiuiut na efekti Zomerfelda [Dynamics of two-frequency resonant vibration machines operating on the Sommerfeld effect] (Doctoral dissertation, Central Ukrainian National Technical University). https://ena.lpnu.ua/items/e49c1f95-5d4b-4651-97ad-def20fe2de57 [in Ukrainian].
6. Yatsun, V. (2020). Experimental study of resonance vibrations of the vibratory machine excited by a ball auto-balancer. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(1[104]), 32–40. http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2020.201105
7. Bondarenko, L. M., Domin, H. K., Buratynskyi, A. P., & Dorofieieva, V. S. (2019). Opir kochenniu v mekhanizmakh z tochkovymy ta liniinymy skhemamy dotyku [Rolling resistance in mechanisms with point and linear contact schemes]. Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury, 5(257–258). https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.221019.19.517 [in Ukrainian].
8. Beshun, O. A., & Melanchenko, Ya. V. (2018). Analiz faktoriv, yaki vplyvaiut na sylu i koefitsiient oporu kochenniu kolesa [Analysis of factors affecting the force and coefficient of rolling resistance of a wheel]. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research, 9(4), 123–131. https://doi.org/10.31548/me2018.04.123 [in Ukrainian].
9. Krol, R. M., & Bondarenko, L. M. (2014). Porivniannia oporu kochenniu kulky i tsylindra pry riznykh skhemakh kontaktu [Comparison of rolling resistance of a ball and a cylinder under different contact schemes]. Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury, 10, 31–36. http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/11550 [in Ukrainian].

БЕТОНИ З ЗНИЖЕНИМИ ЕНЕРГОВИТРАТАМИ ТА ВИКОРИСТАННЯМ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ФОРМУВАЛЬНИХ СУМІШЕЙ

Тетяна Дехта, доцент, к.т.н., доцент[1] (ORCID: 0000-0001-5023-3070),
Сергій Бондаренко, доцент, к.т.н., доцент[1] (ORCID: 0000-0001-9947-721X),
Світлана Василенко, асистент[1] (ORCID: 0000-0001-8687-4726),
Олександр Морозевич, студент[1],
[1] Український державний університет науки і технологій ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», м. Дніпро, вул. Архітектора Олега Петрова, 24а, 49128, Україна

АНОТАЦІЯ. *Металургійними і машинобудівними підприємствами накопичені великі об'єми відпрацьованих формувальних сумішей (ВФС). Проведені дослідження показали, що вібровакуумування є більш ефективним методом ущільнення золошлакових бетонів та бетонів на основі відпрацьованих формувальних сумішей у порівнянні з традиційним методом вібраційного ущільнення. Ущільнення бетонних сумішей за допомогою вібраційного вакууму надає можливість значно збільшити густину, міцність, морозостійкість та інші властивості бетонів. У бетонах з однаковою міцністю можливо зменшити витрати цементу. При цьому можливо провести негайну розпалубку, а також значно скоротити тривалість термічної обробки. Запропонований метод формування не вимагає значних капітальних витрат на впровадження, оскільки при цьому застосовується стандартне обладнання, що широко використовується в будівельній галузі.*

Ключові слова: *відпрацьована формувальна суміш; вібраційне ущільнення; бетонна суміш; вібрація; вакуум*

Вступ. Найбільш об'єктивну оцінку підвищення міцності та фізико-механічних властивостей бетону з використанням вторинних мінеральних ресурсів, ущільненого вібраційним вакуумом, можливо отримати тільки у виробничих умовах, на підприємствах з виготовлення залізобетонних конструкцій.

Оцінка найбільш широко використовуваних в технології відпрацьованих формувальних сумішей (ВФС) і їх шкоди для навколишнього середовища представлена в роботі [1-2]. Але у цій роботі наведені тільки виміри викидів газів, шкідливих і небезпечних речовин (наприклад, бензолу). Не вказано спосіб використання ВФС в технології бетонів та будівельних розчинів. Актуальністю роботи є розробка і дослідження технології вібровакуумної обробки бетонних сумішей з використанням вторинних мінеральних ресурсів, що дозволяє отримувати бетони з підвищеною густиною, міцністю та іншими властивостями.

Аналіз літературних джерел. Приклад використання вакуумної технології ущільнення бетону наведено в роботі [3-6]. Однак був використаний легкий бетон. Він має тенденцію ламатися через високий тиск вакуумування. Тому подальші дослідження використання вторинних мінеральних ресурсів базуються на важких бетонах.

Метою дослідження було вдосконалення технології бетонів на основі вторинних мінеральних ресурсів. На практиці при цьому використовується оптимізація складу бетону за допомогою введення ВФС в якості традиційних заповнювачів для бетону. А також використання вібраційної вакуумної обробки бетонних сумішей.

Виклад основного матеріалу. Накопичені формувальні суміші містять понад 90 % кварцового піску. Це дозволяє використовувати їх у якості дрібного заповнювача для бетону [7]. Хімічний склад відпрацьованих формувальних сумішей наведено в таблиці 1.

Використання вторинних ресурсів у виробництві будівельних матеріалів пов'язане з обов'язковим повним і ретельним хімічним аналізом цих відходів з метою запобігання потраплянню шкідливих речовин у будівельні матеріали [8].

Таблиця 1

Хімічний склад відпрацьованих сумішей

Відпрацьовані суміші	**SiO_2**	**Fe_2O_3**	**Al_2O_3**	**CaO**	**MgO**	**SO_3**	**N_2O**	**Залишок**
Сталеплавильне виробництво	91,32	0,83	2,12	1,79	1,23	–	1,09	0,89
Чавунне виробництво	79,3	1,50	5,64	1,07	0,98	0,74	1,93	9,34

Підвищення вимог до надійності будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, що виготовляються з використанням вторинної сировини, пов'язане з необхідністю їх повної безпеки для здоров'я людей. У таблиці 2 [9] наведено вміст шкідливих домішок (важких металів) у відпрацьованих формувальних сумішах.

Таблиця 2

Вміст важких металів у відпрацьованих сумішах

Середня кількість важких металів у відходах	**Концентрація, мг/кг**						
	Pb	Cd	Zn	Mn	Cu	Cr	Ni
	<0,001	<0,004	5,7	0,017	<0,001	<0,001	<0,001

Враховуючи дані таблиці 2, відпрацьовані формувальні суміші класифікуються як малонебезпечні (IV клас токсичності) [12]. Це дає можливість використовувати їх у дорожньому та транспортному будівництві.

Визначено зерновий склад вторинних мінеральних ресурсів. Відповідно до класифікації пісків за розмірами відходи сумішей, що розглядаються, належать до групи дуже дрібних пісків.

На основі досліджень [12–13], а також з урахуванням токсичності (IV клас), було запропоновано виготовляти плитку і бруківку для дорожнього будівництва на основі відпрацьованих формувальних сумішей.

Основне обладнання технології: піддон-вакуумщіт зі зйомним бортовим оснащенням, віброплатформа, вакуумний насос з ресивером і водозбірником, мостовий або козловий кран.

Технологія зводиться до наступного. На піддон-вакуумщіт розміщується фільтр з перфорованої полімерної плівки, після чого встановлюється бортове оснащення, що дозволяє одночасно формувати 80 виробів. Потім пластичну бетонну суміш укладають з короткочасною вібрацією (5...10 с), вакуумщіт підключають до вакуумного насоса (через водозбірник і ресивер), вакуумують і відкривають бічне оснащення. Свіжосформовані вироби на вакуумному піддоні доставляються на пост твердіння в звичайних умовах. Через добу вакуумованні вироби мають транспортабельну міцність і тому надходять на склад готової продукції для подальшого твердіння, де через 7 діб вони набувають відпускної міцності.

Технологія була випробувана в лабораторних умовах. Водночас бруківку формували із дрібнозернистого бетону складу 1:3 (Ц:ВФС) та зі звичайного бетону складу 1:6 (табл. 3), в якому дрібним заповнювачем був ВФС. У дослідженнях використовувались: шлакопортландцемент М400 (м. Кривий Ріг); щебінь Рибальського кар'єру в м. Дніпро, фракція 20...40 мм; – вода питна.

Рухливість бетонної суміші характеризувалася ОК = 3...5 см. Бруківку формували як вібраційним методом (тривалість 30 с), так і вібровакуумуванням (тривалість 6 хв).

Таблиця 3

Склади дрібнозернистого і звичайного бетонів

Матеріали	Одиниця виміру	Дрібнозернистий бетон	Звичайний бетон
Цемент	кг	413	320
ВФС	кг	1267	663
Щебінь (фракції 10...20 мм)	кг	–	1280
Вода	л	290	210

Відформовані зразки (бруківка 150×150 мм, висота 130 мм) тверднули в звичайних умовах. Зразки випробували у віці одна доба та 28 діб. Результати наведені в таблицях 4, 5.

Таблиця 4

Щільність і міцність віброущільненого та вібровакуумованого дрібнозернистого бетону на основі ВФС

Вік випробуваних зразків	Віброущільнений бетон		Вібровакуумований бетон	
	щільність, кг/м^3	міцність, МПа	щільність, кг/м^3	міцність, МПа
1 доба	1993,0	1,6	2218,0	4,8
28 діб	1980,0	18,6	2210,0	32,4

Таблиця 5

Щільність і міцність віброущільненого та вібровакуумованого звичайного бетону на основі ВФС

Вік випробуваних зразків	Віброущільнений бетон		Вібровакуумований бетон	
	щільність, кг/м^3	міцність, МПа	щільність, кг/м^3	міцність, МПа
1 доба	2373,0	2,3	2428,0	8,4
28 діб	2362,0	23,9	2423,0	30,8

Доведено значне збільшення густини та міцності вібровакуумної бруківки, яка виготовлена як на дрібнозернистому, так і на звичайному бетоні.

При використанні дрібнозернистого бетону підвищення міцності було досягнуто з 18,6 до 32,4 МПа, або на 73 %, а на звичайному бетоні з 23,9 до 30,8 МПа, або на 29 %. І в першому випадку, і в другому розрахункова міцність бруківки (30 МПа) забезпечувалась завдяки вібровакуумуванню при помірному споживанні цементу.

За наведеними даними, використання вібровакуумної технології для виготовлення плитки та бруківки дає можливість:

– виключити термічну обробку з технології виробництва;

– зменшити витрату металу обладнання в 1,5...2 рази;

– збільшити продуктивність праці на 40...50 % (за рахунок виключення з технологічного процесу очищення, змащування та складання форм, зачистки виробів, термічної обробки);

– забезпечити економію: металу – 30...60 %, цементу – 20...30 %, енергоресурсів – 25...50 %.

Низька міцність бетонів на основі відпрацьованих формувальних сумішей пояснюється тим, що на зернах піску є наявність великої кількості пилу. Зерна покриті плівками в'яжучих речовин, добавками мінерального та органічного походження. Це є модифікацією внаслідок термічного впливу.

Основним компонентом відпрацьованих формувальних сумішей є кварцовий пісок. Такий пісок практично не змінює свого хімічного та мінералогічного складу. Тому суміш можна використовувати як звичайний кварцовий пісок. Але за умови очищення поверхні зерен від домішок шляхом активації.

На практиці застосовуються різноманітні способи активації ВФС. Запропоновано використовувати простий і дешевий метод – вібраційна активація ВФС. З цією метою рекомендується використовувати вібраційне обладнання, яким оснащені практично всі підприємства будівельної галузі [14].

Висновки. Використання бетонів на основі ВФС дає можливість вирішити проблему місцевих заповнювачів, а також сприяє охороні навколишнього середовища.

Завдяки технології вібровакуумованих виробів на основі бетонів на вторинних мінеральних ресурсах надається можливість використовувати існуюче технологічне обладнання без принципових конструктивних змін, здійснювати негайне розпалублення відформованих виробів, що зменшує металоємність технології.

Список використаних джерел:

1. Mariusz Holtzer, Rafał Dańko, Angelika Kmita, Dariusz Drożyński, Michał Kubecki, Mateusz Skrzyński, Agnieszka Roczniak (2020). Environmental Impact of the Reclaimed Sand Addition to Molding Sand with Furan and Phenol-Formaldehyde Resin-A Comparison. *Materials, Vol. 13,* P. 4395. https://www.mdpi.com/1996-1944/13/19/4395
2. Sang-Yeop Chung, Pawel Sikora, Dietmar Stephan, Mohamed Abd Elrahman (2020). The Effect of Lightweight Concrete Cores on the Thermal Performance of Vacuum Insulation Panels. *Materials, Vol. 13,* P. 2632. https://www.mdpi.com/1996-1944/13/11/ 2632
3. Xiaohui Zhu (2017). Properties of Alkali Activated Slag Concrete. *Chemical Engineering TransactionsCET Journal. Vol. 62*. 1009 – 1014. https://doaj.org/article/4d39fc854a7e44749abd 80068fa 052c2
4. Rimma K. Niyazbekova, Muratbek T. Userbaev, Gulnara A. Kokayeva, Lazzat S. Shansharova, Marat D. Konkanov, Saule A. Abdulina (2018). Ash Deposits CHP – as an Additional Source of Raw Material for Construction Production. *Chemical Engineering TransactionsCET Journal.. Vol. 70*. 649 – 654. https://doaj.org/article/56ad70ca5c6f438ab01cc7ac39af3b30
5. Madhura Sridharan. Ch. Madhavi (2020). Investigating the influence of copper slag on the mechanical behaviour of concrete. *Materialstoday: Proceedings*. https://www.sciencedirect.com/ science/article/pii/S2214785320388039
6. Thuy Bich Thi Nguyen, Rachot Chatchawan, Warangkana Saengsoy, Somnuk Tangtermsirikul, Takafumi Sugiyama (2019). *Influences of different types of fly ash and confinement on performances of expansive mortars and concretes*. *Vol. 209*. 176 – 186. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/ S0950061819305124
7. Savić Aleksandar, Vlahović Milica, Martinović Sanja, Đorđević Nataša, Broćeta Gordana, Volkov-Husović Tatjana (2020). Valorization of fly ash from a thermal power plant for producing high-performance self-compacting concrete. *Vol. 52, Issue 3*. 307 – 327. https://doaj.org/article/5e528041df1344bf9 e3adea1ad3a8558
8. M. Rafieizonooz, M.R. Salim, M.H. Hussin, J. Mirza, S.M. Yunus, E. Khankhaje (2017). Workability, Compressive Strength and Leachability of Coal Ash Chemical Engineering. *TransactionsCET Journal. Vol. 56*. 439 – 444. https://doaj.org/article/baced1e274354d52ba08ecd 05644c32d
9. Guo Yin-Le, Liu Xue-Ying, Hu Yue-Ping (2021). Study on the influence of fly ash and silica fume with different dosage on concrete strength. *Internatio Symposium on Architecture Research Frontiers and Ecological Environment. Vol. 237*. https://doaj.org/article/a83ba35c625b4bce9d74f05ea549ec21
10. Bavita Bhardwaj, Pardeep Kumar (2017). Waste foundry sand in concrete: A review. *Construction and Building Materials, Vol. 156,* 661 - 674. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817318111
11. Rafat Siddique**,** Gurpreet Singh (2011). Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing. *Resources, Conservation and Recycling, Vol. 55,* 885 - 892. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344911000802
12. Dekhta, T. M., Hromova, O. V., & Vasylenko, S. V. (2024). Zberezhennia enerhoresursiv pid chas termichnoi obrobky betonu za rakhunok vykorystannia dobavok [Saving energy resources during heat treatment of concrete through the use of additives]. Mosty ta tuneli: Teoriia, doslidzhennia, praktyka, 25, 46–53. [in Ukrainian]. https://mail.google.com/mail/u/1/#inbox/FMfcgzGxTFZVkQZHfJXCNhmhcMrTgRhS?projector=1&messagePartId=0.2
13. Dekhta, T. M., & Vasylenko, S. V. (2024). Zabezpechennia tekhnolohii betonu ta budivelnykh rozchyniv vtorynnymy mineralnymy resursamy [Providing concrete and mortar technology with secondary mineral resources]. In Scientific Problems and Options for Their Solution: Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference (pp. 39–44). International Scientific Unity. [in Ukrainian]. https://isu-conference.com/arkhiv/scientific-problems-and-options-for-their-solution/
14. Dekhta, t. M., bondarenko, s. V., & vasylenko, s. V. (2025). Betony ta rozchyny na vidkhodakh zol tes [concretes and mortars based on tpp ash waste]. Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy, 47, 74–81. https://doi.org/10.31713/budres.v0i47.08.

ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕТИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ВІБРОСТОЛУ З ВАЖІЛЬНИМ ЗАКРІПЛЕННЯМ ВІБРОЗБУДЖУВАЧА ЗА СПРОЩЕНОЮ КІНЕМАТИЧНОЮ МОДЕЛЛЮ

Юрій Коротич, доктор філософії, доцент[1] (ORCID: 0000-0002-1961-5318),
Сергій Жигилій, доцент, к.т.н., доцент[1] (ORCID: 0000-0001-5829-9226),
[1]Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка 24, 36011, Україна

АНОТАЦІЯ. *Розглянуто спрощену кінематичну модель вібраційного столу й для відповідної механічної системи знайдено її кінетичну енергію, без якої неможливо отримати математичну модель руху цієї механічної системи. Зазначена модель моделює реальний оригінальний вібростіл, у якого дебалансний збуджувач коливань закріплено на важелі певної довжини вертикально по центру під віброплитою. При дослідженні були використані методи математичної фізики та фізико-математичне моделювання методами прикладної механіки. В результаті отримано кінетичну енергію вібростолу як суму кінетичних енергій трьох матеріальних тіл у вигляді функціональної залежності від інерціальних і кінематичних характеристик розглянутої механічної системи. В подальшому склавши математичну модель розглянутого віброобладнання, буде проведено відповідне аналітичне дослідження цієї математичної моделі з метою встановлення оптимальних значень конструктивних параметрів вібраційного столу у напрямку покращення його технологічних можливостей.*

Ключові слова: *кінетична енергія; вібростіл; віброзбуджувач; важіль; амплітуда віброколивань.*

Вступ. Для з'ясування впливу окремих параметрів розробленого малогабаритного обладнання для віброформування бетонних виробів [1] на рух його робочого органу була складена математична модель цієї механічної системи, чисельний аналіз якої виявився складною та громіздкою задачею. Для вирішення цієї проблеми розглянемо рух спрощеної механічної системи та складемо її математичну модель. Першою дією цього завдання буде визначення кінетичної енергії даної спрощеної механічної системи.

Аналіз літературних джерел. У сучасному виробництві для формування бетонних виробів використовують вібраційні машини. Багато досліджень та розробок приділяється питанню виявлення особливостей роботи даних машин, поясненню і застосуванню на практиці ефектів, які виникають під час дії вібрації на механічні системи [2-5], розкриваючи при цьому такі переваги вібраційного обладнання, як висока ефективність ущільнення, простота конструкції, висока надійність та відносно невелика металоємність і енергоємність.

До зазначеного вібраційного обладнання відноситься й оригінальна конструкція вібраційного столу для виготовлення малогабаритних бетонних виробів, у якого відцентровий дебалансний збуджувач коливань закріплено на важелі певної довжини $\ell_{важ.}$ вертикально по центру під плитою вібростолу, яка є його робочим органом. У роботі [6] розглянуто й описано складний просторовий рух відповідної механічної системи й визначено її кінетичну енергію.

Мета роботи. Для підтвердження технологічних можливостей конструкції вібростілу з важільним закріпленням віброзбуджувача нами запропоновано розробити його математичну модель, яка б об'єднувала між собою конструктивні і технологічні параметри вібростолу з важільним закріпленням віброзбуджувача, вказуючи їх вплив на амплітуду коливань робочої поверхні віброобладнання. Одержана залежність дозволить проводити математичне моделювання з метою оптимізації перелічених параметрів у напрямку покращення енергозбереження та технологічних можливостей даного вібростолу.

Першим кроком для одержання математичної моделі є визначення кінетичної енергії вібростолу.

Виклад основного матеріалу. Вивчаючи роботу та технологічні можливості спроектованого й сконструйованого дослідного зразка вібраційного столу для виготовлення малогабаритних бетонних виробів, візуально й за допомогою відповідних приладів були встановлені всі наявні рухи

складових елементів вібростолу. Виявилося, що його однозначне положення в просторі та реальний дійсний рух визначають сім незалежних між собою параметрів [1], через що механічна система, яка моделює зазначений вібраційний стіл має $s=7$ ступенів вільності, а математична модель цього столу є системою з семи нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку. Чисельний аналіз математичної моделі виявляється надзвичайно складною та громіздкою задачею, в якій важко дослідити вплив усіх (або навіть декількох) параметрів на рух й ефективність досліджуваного зразка.

Для з'ясування загальної тенденції руху плити 1, яка за суттю є робочим органом вібростолу, та впливу на цей рух довжини $\ell_{важ.}$ важеля 2 розглянемо рух спрощеної механічної системи.

Спрощена механічна система, що моделює вібраційний стіл для виготовлення малогабаритних бетонних виробів, складається з шести фізичних тіл (рис. 1), кожне з яких рухається в площині Oyz, й задача про дослідження руху цієї системи перетворюється на двовимірну ($2D$) задачу.

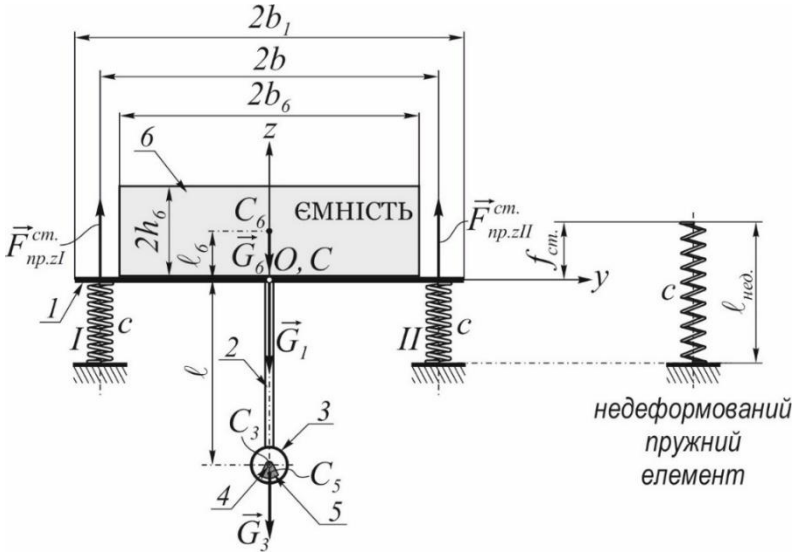


Рис. 1. Механічна система в положенні статичної рівноваги

Для розв'язання задачі скористаємось рівняннями Лагранжа другого роду

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right)-\frac{\partial T}{\partial q_i}=Q_i,\quad (i=1,2,...,s). \tag{1}$$

Для визначення положення й опису рухів тіл розглядуваної механічної системи застосуємо три системи координат: нерухому Oyz і рухомі $Cy'z'$ та Cy_1z_1. Початок відліку O нерухомої системи Oyz пов'яжемо з центром інерції C плити 1 у положенні статичної рівноваги механічної системи, яке подано на рисунку 1. Початок відліку обох рухомих систем координат рухається разом із точкою C; при цьому система $Cy'z'$ рухається поступально, через що її осі лишаються паралельними осям нерухомої системи координат, а система Cy_1z_1 жорстко пов'язана з плитою 1. У положенні статичної рівноваги всі три системи координат співпадають, а при русі механічної системи точка C характеризує рух центра інерції плити у нерухомій системі Oyz.

З нескладного аналізу видно, що положення в просторі усіх матеріальних тіл механічної системи, яка моделює вібростіл, однозначно визначають такі незалежні параметри:

- декартові координати $y_C=y_C(t)$ і $z_C=z_C(t)$, які визначають положення центра C інерції плити 1 в нерухомій системі координат Oyz;
- кут $\beta=\beta(t)$, який визначає положення плити 1 в рухомій системі координат $Cy'z'$.

Таким чином, розглядувана механічна система має $s=3$ ступені вільності, узагальненими координатами є $q_2=y_C$, $q_3=z_C$ і $q_5=\beta$, а узагальненими швидкостями – $\dot{q}_2=\dot{y}_C$, $\dot{q}_3=\dot{z}_C$ і $\dot{q}_5=\dot{\beta}$.

Для наочності й для подальших міркувань уявімо та зобразимо на рисунку 2 кінематичну схему механічної системи у довільний момент часу t так, щоб усі узагальнені координати та кут φ, який у цю мить визначає положення точки C_5, були б додатними, й уважаючи, що у цю мить кожна узагальнена координата збільшується (за такого припущення усі похідні за часом від узагальнених координат також будуть тільки додатними).

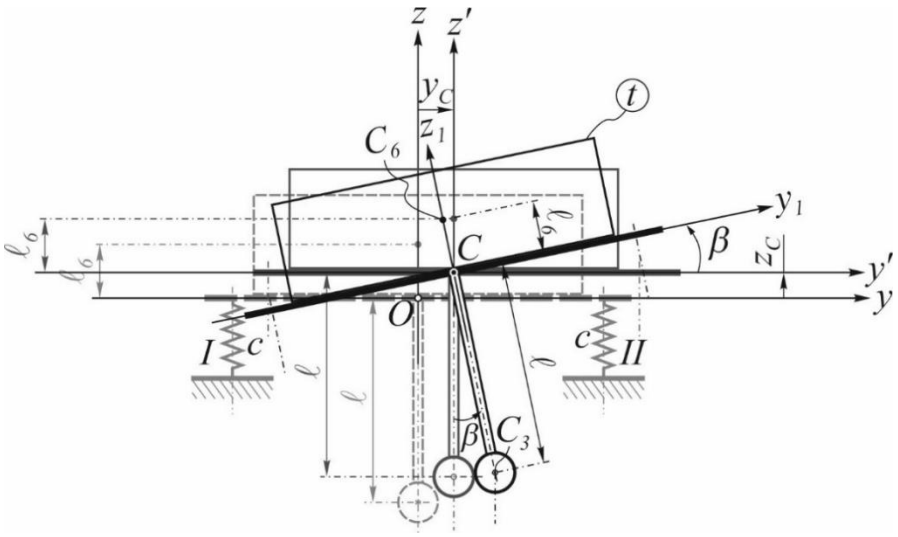


Рис. 2. Кінематична схема механічної системи

Оскільки масами важеля 2 і дебалансного вала 4 нехтуємо [6], а маса дебаланса 5 є джерелом енергії, то розглядуване віброобладнання моделюється механічною системою, що складається з трьох матеріальних тіл, кінетична енергія якої

$$T=T_1+T_3+T_6, \tag{2}$$

де T_1, T_3 і T_6 – відповідно кінетичні енергії плити 1, корпусу 3 віброзбуджувача і тіла 6, яким моделюється ємність (форма) разом з завантаженою в неї бетонною сумішшю.

Визначивши відповідні кінетичні енергії

$$T_1=\frac{m_1}{2}\cdot\left(\dot{y}_C^2+\dot{z}_C^2\right)+\frac{m_1\cdot b_1^2}{6}\cdot\dot{\beta}^2, \tag{3}$$

$$T_3=\frac{m_3}{2}\cdot\left(\dot{y}_C^2+\dot{z}_C^2\right)+m_3\cdot\ell\cdot\dot{y}_C\cdot\dot{\beta}\cdot\cos\beta+m_3\cdot\ell\cdot\dot{z}_C\cdot\dot{\beta}\cdot\sin\beta+\frac{m_3\cdot\left(\ell^2+R_3^2\right)}{2}\cdot\dot{\beta}^2, \tag{4}$$

$$T_6=\frac{m_6}{2}\cdot\left(\dot{y}_C^2+\dot{z}_C^2\right)-m_6\cdot h_6\cdot\dot{y}_C\cdot\dot{\beta}\cdot\cos\beta-m_6\cdot h_6\cdot\dot{z}_C\cdot\dot{\beta}\cdot\sin\beta+\frac{m_6\cdot\left(b_6^2+4h_6^2\right)}{6}\cdot\dot{\beta}^2, \tag{5}$$

та підставляючи значення (3), (4) і (5) у формулу (2), дістанемо кінетичну енергію досліджуваного вібраційного столу у вигляді суми п’яти доданків:

$$T=\frac{M\cdot\dot{y}_C^2}{2}+\frac{M\cdot\dot{z}_C^2}{2}+\left(m_3\cdot\ell-m_6\cdot h_6\right)\cdot\dot{y}_C\cdot\dot{\beta}\cdot\cos\beta+\left(m_3\cdot\ell-m_6\cdot h_6\right)\cdot\dot{z}_C\cdot\dot{\beta}\cdot\sin\beta+\frac{1\cdot\dot{\beta}^2}{2}\left(Дж\right),$$

де $M=m_1+m_3+m_6$ – загальна маса вібростолу, рух якого генерує обертання дебалансу 5 масою m; $\mathcal{J}=\dfrac{m_1\cdot b_1^2+3m_3\cdot\left(R_3^2+\ell^2\right)+m_6\cdot\left(b_6^2+4h_6^2\right)}{3}$ – зведений момент інерції рухомої частини

вібростолу відносно осі, що в розглядуваному положенні механічної системи проходить через точку C перпендикулярно до площини розташування системи.

Висновки. Обравши спрощену конструктивну схему моделі вібростолу з важільним закріпленням віброзбуджувача та використавши рівняння Лагранжа другого роду, визначена його кінетична енергія. В подальшому, визначивши діючі узагальнені сили, в результаті матимемо можливість скласти математичну модель, яка об'єднає між собою конструктивні та технологічні параметри з важільним закріпленням віброзбуджувача, вказуючи їх вплив на амплітуду коливань робочої поверхні вібростолу.

Список використаних джерел

1. Korotych, Y. Y. (2023). *Justification of Parameters of Small-Sized Equipment for Vibroforming Concrete Products.* [Ph.D. dissertation. Poltava National Yuri Kondratyuk University]. Repository of the Yuriy Kondratyuk National University. http://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/14134.
2. Nazarenko, I. I. (2007). *Vibration machines and processes of the construction industry*. KNUBA Publ.
3. Nazarenko, I. I., & Ruchinsky, M. M. (2002). *Physical Foundations of Building Materials Mechanics*. Afisha.
4. Nesterenko, M. P., & Molchanov, P.O. (2014). Study of vibrations of plate of oscillation cassette setting as active working organ. In *Problems of energy and nature use 2013* : conference reports materials (pp. 146–151). Budapest.
5. Runova, R. F., Gots, V. I., Nazarenko, I. I., Sivko, V. Y., & Shylyuk, P. S. (2008). *Structural materials of the new generation and technologies of their implementation in construction*. EksOb.
6. Korobko, B., Zhyhylii, S., & Korotych Y. (2022). Determination of the Vibrating Table Kinetic Energy. *Academic Journal Industrial Machine Building, Civil Engineering*, *2*(59), 17–26. DOI: 10.26906/znp.2022.59.3095.

ANALYSIS OF WAYS TO IMPROVE THE ENERGY EFFICIENCY FOR TRANSLUCENT STRUCTURES

Kateryna Pushkarova, professor, D.Sc.(Tech.), head of the department of building materials[1], (ORCID: 0000-0001-7640-8625),
Maryna Kochevykh, associate professor, Ph.D., associate professor[1] (ORCID: 0000-0002-6201-3507),
Olha Honchar, associate professor, Ph.D., associate professor[1] (ORCID: 0000-0002-1071- 7553),
Ivan Semenyuk, second-level education seeker (master's degree)[1],
[1]*Kyiv National University of Construction and Architecture, Povitrianykh syl Ave 31, 03037, Ukraine*

ABSTRACT. *The features of creating translucent structures are analyzed, taking into account modern requirements for energy efficiency of buildings and structures with minimal total energy consumption for heating, air conditioning and lighting of premises. Ways to increase energy efficiency are considered by improving the designs of double-glazed windows with different numbers of chambers, choosing the optimal distance between the sheets of glass, using special types of glass and the type of gas filling of the chamber, as well as the influence of the thickness and material of the structural profile, installation depth, and type of spacer frames. The positive effect of using "warm" installation with the use of special vapor and waterproofing tapes, as well as structural means of thermal insulation of slopes and warm base profiles has been shown.*

Keywords: *translucent structures, double-glazed window; energy efficiency; heat transfer resistance; low-emission glass; inert gas, window profile system; distance frame; «warm» installation*

Introduction. An important task for Ukraine during the post-war reconstruction of destroyed housing and infrastructure facilities is not only to maintain the quality of their construction, but also to comply with the "green principles" specified in the EU directives on energy efficiency and determining economic development and environmental safety [1]. Translucent structures of residential buildings, namely windows, play a key role in shaping the energy efficiency of a building, influencing it both through heat loss and through its inflow. Thermal energy losses through such structures can reach 20...40%. Modern requirements for the energy efficiency of windows have significantly increased and require the installation of more effective translucent structures to reduce heat loss [2].

Analysis of recent research and publications. The energy efficiency of windows is determined mainly by the reduced heat transfer resistance (R_w) and involves determining such an indicator for the entire structure as a whole, including the profile, the glass unit and the spacer frame [2]. According to the current Ukrainian building codes in the I climatic zone, which includes most of Ukraine (northern and northwestern parts of Ukraine except Zakarpattia region), the reduced heat transfer resistance of windows must be at least 0.9 (m^2K)/W, and in the II climatic zone (southern, southeastern parts of Ukraine and Zakarpattia region) - at least 0.75 (m^2K)/W [2].

The heat transfer coefficient of windows (U_w) is also important, which determines the rate of heat loss and is 1.1…1.33 W/(m^2 K) for residential premises in Ukraine. To meet such requirements, energy-efficient structures are used, represented mainly by double-glazed windows, since they occupy more than 80% of the window area, therefore, the technical characteristics of the entire window and the amount of heat lost from the room depend on its quality [3]. Improving the energy-saving properties of a double-glazed window is a comprehensive approach aimed at reducing heat loss in winter and overheating in summer. The main ways include glass modernization, improving gas filling, and optimizing the design. Thus, when using the highest energy-efficient double-glazed window, which, according to European standards, corresponds to a "passive" house (R_w more than 1.05 (m^2K)/W), 2.5 times less is spent on heating compared to a low-efficiency window, such a window retains heat 50% better in winter compared to standards for the medium-efficiency class [4, 5].

Research objective. Analyze ways to increase the energy efficiency of translucent structures, taking into account the structural features of double-glazed windows (increasing thickness, number of chambers, type of filling their space, type of distance frames, type of hydro and vapor insulation), as well as the features of the structure's installation.

Main part. To reduce the costs of air conditioning when creating translucent structures, low-emission glass (I-glass with magnetron sputtering of silver ions) or multifunctional (Solar) glass is used, which combines the functions of energy saving and protection against insolation, mainly in structures with a large glazing area. The use of double-glazed windows with an energy-saving coating on the glass not only reduces heat loss through translucent structures, which account for about 40% of all heat loss in a building, but also helps to save energy resources for heating and air conditioning of the room [6].

The use of a double-glazed window with I-glass during the heating season provides energy savings of about 230 kWh per 1 m^2 of window surface compared to a conventional double-glazed window [7]. Thus, using low-emission I-glass in the design of a double-glazed window, it is possible to reduce electricity consumption by about 30%. Compared to a conventional single-chamber package (the heat transfer resistance is 0.32 (m^2K)/W), it should be noted that an energy-saving double-glazed window is 1.5...2 times “warmer” [8].

Important in increasing the energy efficiency of a double-glazed window is to increase its thickness due to the number of chambers (double-glazed windows are more energy efficient due to the formation of two independent thermal insulation layers and the creation of an additional barrier to cold). The best efficiency indicators for residential premises are considered to be a double-glazed window with a thickness of 40-44 mm.

The optimal width of the chamber for thermal insulation is 14-16 mm, too narrow a chamber (6-8 mm) worsens thermal insulation, too large a distance increases convection. The use of multi-chamber PVC profile systems with a predominance of class A profile (with thickened external walls) and an installation depth of 70 mm and above and the presence of 5-7 chambers is 20...30% better at retaining heat compared to a 60 mm deep profile and helps to increase the heat transfer resistance of the entire window structure to 0.8...1.0 (m^2K)/ W).

To reduce heat convection, the glass chamber is filled with an inert gas (argon or krypton). Argon increases the heat transfer resistance by 5...12% compared to air (the thermal conductivity of argon is 0.016 W/(m K), while air is 0.026 W/(m K)). Thus, the use of argon in combination with low-emission glass in a glass unit reduces heat loss by an average of 16%. Argon also protects the low-emission glass coating from oxidation, extending the service life of the window. Loss of sputtering increases heat loss through the glass unit by 30…40%, turning an energy-efficient window into a regular one [8]. The use of krypton provides 30% better thermal insulation than argon, but it is 7 times more expensive, so it is used with justification.

It is possible to increase the thermal insulation properties by choosing certain types of spacer frames. Warm spacer frames are PVC, composite, and silicone foamed, which have a stainless steel frame; other types use steel frames with high-density polycarbonate applied to them. The use of a “warm” frame for energy-efficient windows not only saves on heating and air conditioning, but also reduces the likelihood of condensation at the edges of the double-glazed window. A warm frame makes the edge zone of the double-glazed window 65% warmer compared to aluminum, and the overall heat transfer performance of the window improves by 0.1…0.2 W/(m K), the energy efficiency of the window as a whole improves by 6...10%, which allows saving 7...8% of thermal energy per year. The difference in cost between double-glazed windows with a "cold" and "warm" frame is noticeable, but the decision to use a certain type of spacer frame must be made taking into account not only the energy saving factor, but also the comfort factor of staying in the room with the elimination of the "cold" window effect.

The adsorbent (molecular sieve) in the spacer frame of the double-glazed window is not a heat insulator and does not increase the nominal energy efficiency, but it guarantees that the double-glazed window will not lose 10...20% of efficiency during operation due to the prevention of condensation. High-quality two-stage sealing (primary - butyl, secondary - polyurethane/silicone) although it does not have low thermal conductivity, provides gas and moisture tightness - loss of argon filling is no more than 0.5…1% per year and the absence of the fogging effect with the transformation of an energy-efficient window into a regular one, increasing heating costs by 10…15%.

The modern concept of high-quality installation of translucent structures involves a combination of a wall opening, a window structure and an installation seam as a holistic system with several functional layers to ensure effective operation of the system under the influence of various factors. Warm installation of windows is a modern technology aimed at maximum energy conservation and prevention of heat loss through the installation seam, which involves protecting the installation foam through the use of special installation tapes (hydro barrier - external waterproofing vapor-permeable film, vapor barrier – internal vapor-insulating tape to protect against condensate. pre-compressed sealing tape made of elastic polyurethane impregnated with a moisture-repellent composition - to seal the joint of the window with the outer part of the wall).

Up to 20…30% of the total heat loss of a window block is due to poor-quality joints between the frame and the wall. Warm installation eliminates cold bridges, preventing a decrease in the temperature of the inner surface of the slope (at a temperature of -10°C in winter, the slope temperature does not drop below +15°C) and preserving up to 10…15% of heat, and wetting of the mounting foam causes a loss of its thermal insulation properties by 50…70%.

The service life of a three-layer mounting joint is more than 20 years, without protection such a joint collapse within 3…5 years. Structural means of thermal insulation of slopes and the use of warm support profiles, which are represented by expanded polystyrene (EPS) with a thickness of 20…50 mm with zero water absorption, with a thermal conductivity coefficient of 0.04 W/m K), with a density of 150 kg/m3, which allows the window structure to be placed in a layer of thermal insulation, thereby increasing the U_w of the window; insulation of slopes with extruded polystyrene XPS with a thermal conductivity coefficient of 0.035 W/(m K), sandwich panels with an inner layer of polystyrene, the use of warm plaster for the facade is a comprehensive approach to reducing heat loss in the abutment zone by 30...50% compared to standard installation.

Conclusions. Supporting modern trends in resource conservation and optimization of the arrangement of buildings and premises for various purposes, it clearly makes sense to install energy-saving windows during the reconstruction of Ukraine in the post-war period, even taking into account the fact that their cost is higher than traditional systems.The payback period of new energy-efficient windows in Ukraine is on average 1–3 years, depending on energy tariffs and climatic conditions, and the operation of the premises will be as practical and comfortable as possible at any time of the year.

It should be noted that the introduction of modern technologies for increasing energy efficiency may be accompanied by a significant increase in the cost of translucent structures, which necessitates the search for the optimal ratio between the effectiveness of innovative solutions, their cost and conditions of practical application.

References

1. Verkhovna Rada of Ukraine. (2025). Zakon Ukrainy pro enerhetychnu efektyvnist budivel [Law of Ukraine on energy efficiency of buildings] (No. 2118-VIII, current version dated August 3, 2025). [in Ukrainian].
2. Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine. (2021). DBN V.2.6-31:2021. Teplova izoliatsiia ta enerhoefektyvnist budivel [Thermal insulation and energy efficiency of buildings]. [in Ukrainian].
3. DP UkrNDNC. (2020). DSTU EN 14351-1:2020. Vikna ta dveri. Vymohy. Chastyna 1. Vikna ta zovnishni dveri [Windows and doors. Requirements. Part 1: Windows and external pedestrian doors] (EN 14351-1:2006 + A2:2016, IDT). [in Ukrainian].
4. Ploskyi V.O., Pushkarova K.K., Kryvenko O.V., Kochevykh M.O., Honchar O.A. (2024) *Enerhoefektyvni materialy ta konstruktsii v suchasnii arkhitekturi Chastyna 1 Navchalno-metodychnyi posibnyk*. Kyiv: Vydavnytstvo Lira-K, 320 s. [in Ukrainian].
5. Abyzov V., Pushkarova K, Kochevykh M., Jurus J. (2020) *Materials science for designers of architectural environment* Monografia. /Wydawnictwo Politechniki Swietokrzyskiej. Kielce, - p.475
6. Wang, YS; Zhang, Y and Wang, F (2006) *The economic assessment of building dooriwindow energy-saving technological improvemnet* // Proceedings of CRIOCM 2006 International Research Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate, vols 1 and 2, pp.1032-1036
7. Saelens D, Roels S., Hens H. (2008) *Strategies to improve the energy performance of multiple-skin façades*. - Build. Environ.2008, 43 - pp.638–650. - https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2006.06.024, free (date of the application: 12.05.2026.
8. Burmaka V., Tarasenko M., Kozak K., Burmaka O., Sabat N. (2021), *Energy efficiency of modernization of translucent building* envelope *structures. Energy* Engineering and Control Systems, Vol. 7, No. 2, pp. 87 – 96. https://doi.org/10.23939/jeecs2021.02.087

SOME RESULTS OF SOLVING THE GENERALIZED CROSS-INDUSTRY INVENTIVE PROBLEM OF ENERGY-SAVING PROCESSING OF GRANULAR MATERIALS IN DRUM MACHINES BASED ON THE ESTABLISHED EFFECT OF AUTO-OSCILLATIONS SELF-EXCITATION

Kateryna Deineka, Ph.D. (Tech.), Higher Category Lecturer[1] (ORCID: 0000-0003-3658-3087),
Yurii Naumenko, Assoc. Prof., Dr. Sc. (Tech.), Prof.[2] (ORCID: 0000-0001-7376-6734),
Serhii Zhabchyk, Master's student[2] (ORCID: 0009-0009-0579-3955),
[1]Rivne Technical Vocational College of the National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Vyshyvanka Street 35, 33027, Ukraine
[2]National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Soborna Street 11, 33028, Ukraine

ABSTRACT. *Some results obtained in an attempt to solve the generalized cross-industry inventive problem of energy-saving implementation of working processes of drum-type machines when performing various technological processes of processing granular materials: granulation, conducting a reactive process, mixing, grinding, washing, classification, rolling, drying and heat treatment are presented. The obtained results of applying the established hydrodynamic effect of auto-oscillations of granular filling of the rotating drum chamber in soft and hard self-excitation modes demonstrate intensification, increased productivity and reduced energy consumption of processes by increasing dilatancy and activating the passive part of the filling. This opens the way to creating a new generation of energy-saving working processes of processing granular materials in drum-type machines.*

Keywords: *drum-type machines; granular material; working process; rotating drum; internal chamber filling; auto-oscillation; soft and hard modes of self-excitation of oscillations*

Every year, more than 100 billion tons of various inorganic and organic granular materials are processed worldwide – minerals, industrial raw materials, construction materials, agricultural and food products. Such processes are carried out in the chemical, mining, metallurgical, construction materials industry, energy, mechanical engineering, biological, agricultural, processing and other industries.

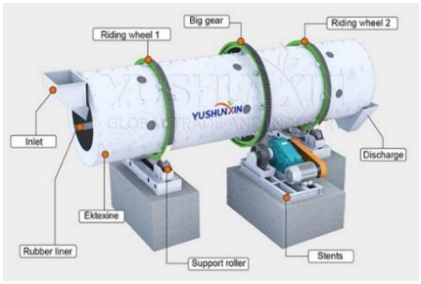
Drum machines remain the main equipment for high-volume processing of granular materials. The cross-industry class of drum-type technological machines has become widely used in various industries due

to a number of advantages – the possibility of high unit productivity, simplicity of design, high reliability of operation, ease of operation, versatility and high cost-effectiveness.

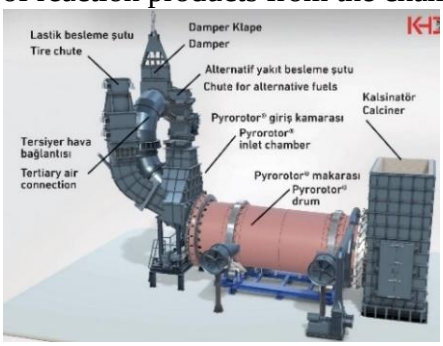
Based on the International Patent Classification, 9 classes of patents for inventions can be distinguished, corresponding to 9 main types of drum-type machines (Fig. 1): B01J 2/12 – drum granulators, B01J 8/10 and B01J 19/28 – drum reactors, B01F 29/60 – drum mixers, B02C17/00 – drum mills, B03B 5/56 – drum washing machines, B07B 1/22 – drum screens, B24B 31/02 – drum tumbling machines, F26B 11/04 – drying drums, F27B 7/00 – drum machines for heat treatment.

Drum granulators implement the technology of granulating granular material by rolling and carry out the process: feeding the material into the drum chamber, irrigating it with a binding liquid, agglomeration by mixing the material with the liquid, formation, rolling and stabilizing the structure of the granules, and removing them from the chamber.

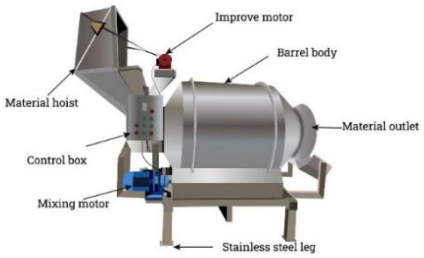
Drum reactors implement the technology of conducting reaction processes with inorganic and organic granular materials and carry out the process: feeding material and reagents into the drum chamber, conducting the reaction process by diffusion of reagents to the reaction zone on the phase interface surface, activated adsorption of reagent particles on the surface, physicochemical transformations of adsorbed particles, desorption of the formed reaction products and diffusion of reagents and products through a layer of granular material and removal of reaction products from the chamber.



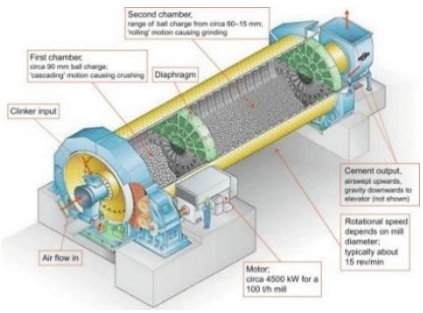
Drum granulator



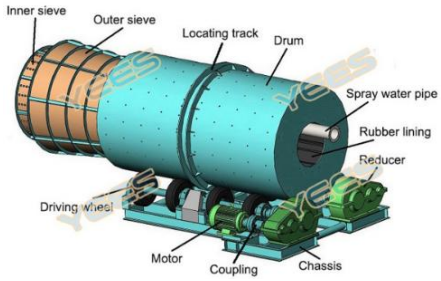
Drum reactor



Drum mixer



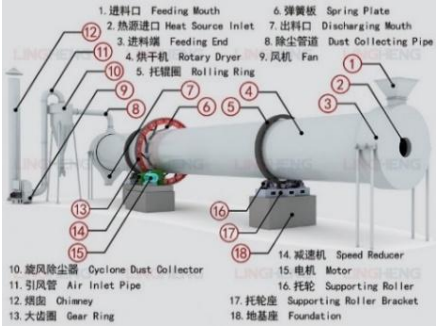
Drum mill



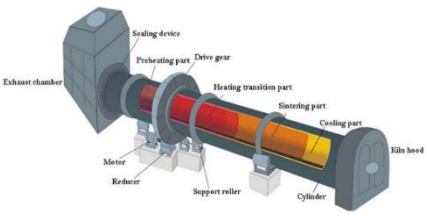
Drum washing machine

Drum screen

Drum tumbling machine



Drying drum



Drum machine for heat treatment

Fig. 1. Main types of the inter-industry class of drum-type technological machines

Drum mixers implement the technology of mixing components of a mixture of granular materials and carry out the process: feeding the mixture components into the drum chamber, uniform distribution of components in the volume being mixed by convective-diffusion, shear, impact and disintegration radial and axial mixing, and removal of the homogeneous mixture from the chamber.

Drum mills implement the technology of fine grinding of solid dispersed materials and carry out the process: feeding the crushed material into the drum chamber, disintegration by acting on it with a grinding fill by impact, abrasion and crushing, and the passage of particles of crushed material through the gaps between the grinding bodies towards the place of removal, and removal of the crushed material from the chamber.

Drum washing machines implement the technology of washing granular material to remove cementing particulates and carry out the process: feeding the material into the drum chamber, irrigating it with water, removing the cementing fine fraction together with water by disintegrating the material by loosening and dispersing the fine fraction in water, and removing the washed material from the chamber.

Drum screens implement the technology of classification by size of granular material and carry out the process: feeding material into the drum chamber, removing fine fraction through the screening surface by passing the fine fraction through a layer of material to the surface, passing particles of the fine fraction through the calibrated holes of the surface and self-cleaning the holes, and removing coarse fraction from the chamber.

Drum tumbling machines implement the technology of final finishing and strengthening mechanical processing from grinding to final polishing of surfaces of parts made of metals, polymers, glass, ceramics, minerals, wood and other materials and carry out the process: feeding parts and abrasive filler into the drum chamber, processing parts by surface plastic deformation during pulsed interaction of filler particles with the surfaces of parts and the surfaces of parts with each other, and removing the processed parts from the chamber.

Drying drums implement the technology of convective drying of inorganic and organic granular material with moisture removal by evaporation and carry out the process: feeding the material and drying agent into the drum chamber, removing moisture from the material by evaporation through convective external heat and mass transfer, during the interaction of the wet material with the drying agent, and diffusion internal heat and mass transfer, during the passage of moisture from the central layers to the outer surface of the material, and removing the dried material from the chamber.

Drum heat treatment machines implement the technology of heat treatment of granular material for solid-phase transformations and carry out the process: feeding the material into the drum chamber, heating by external heat exchange and internal heat transfer, holding at the firing temperature, cooling and removing it from the chamber.

The problem with drum-type machines is the high energy intensity of the working process. This is caused by the low intensity of the relative movement of the processed granular material in the chamber of the rotating drum. A significant portion of the granular filling of the chamber is passive, does not undergo shear deformation and does not participate in the working process.

The three-phase picture of the filling movement in the cross-section of the chamber (Fig. 2) can be conditionally divided into 3 zones: solid 1 without relative movement of particles, non-free fall zone 2 and shear layer zone 3.

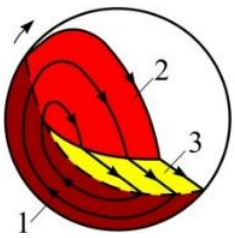


Fig. 2. Three-phase working process of a drum machine:
1 – solid zone, 2 – non-free fall zone, 3 – shear layer zone

The zones of non-free fall 2 and shear layer 3 are active, where the working process is implemented. The solid zone 1 is passive, where the processing is not carried out. It turns out that the mass fraction of the active zone is only 30-45%, while the fraction of the passive zone is 55-70%.

The aim of the inventive task was to reduce the energy intensity of processing granular materials in drum-type machines by intensifying the process.

Features of the inventive task:

1) significant differences in technological processes due to the variability of technologies for processing granular materials in different types of drum machines, which defines the task as cross-industry,

2) close similarity of the physical behavior of the processed granular medium due to the common effect on it of a combination of gravitational and distorted centrifugal force fields for all types of drum machines, which defines the task as generalized.

The generalized cross-industry inventive problem was solved on the basis of a new established physical phenomenon. The hydrodynamic effect of self-excitation of auto-oscillations of the granular filling of the rotating drum chamber was discovered. Auto-oscillations are excited due to the loss of stability of the rotating drum vibration system on the verge of establishing a dynamic balance between the action of gravitational and centrifugal force fields on the granular filling. This is accompanied by a mutual transition of the flow regimes of the liquefied granular filling in the chamber – the circulation and wall layer.

The first direct video recording of the auto-oscillating mode of motion of a granular fill of a rotating drum [1] was made in 1966 in a technical video film of the IWF film studio (Göttingen, Germany) (Fig. 3).

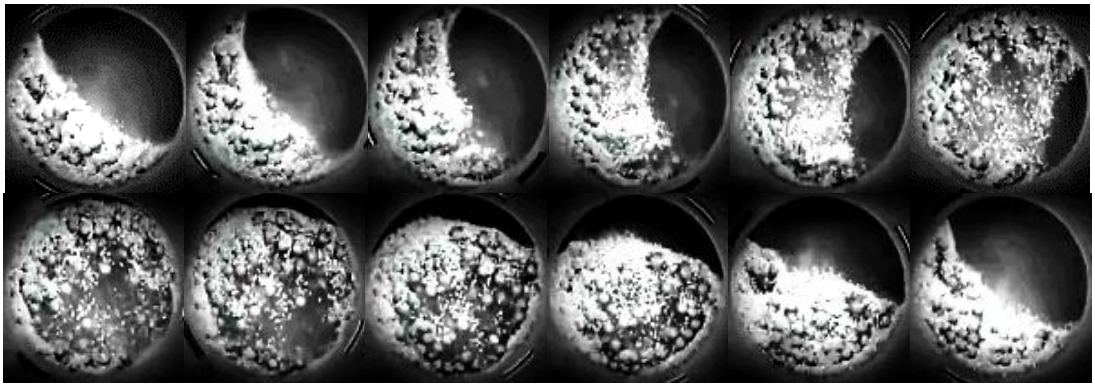


Fig. 3. Scan of successive patterns of one period of auto-oscillations of granular filling of the chamber of a laboratory drum mill (according to [1])

Subsequently, the conditions for the stability of the motion of the drum machine unit were established [2], the mechanism for implementing the self-oscillating mode of the feed flow was identified [3], and a model of the conditions and factors for the oscillatory stability of the motion of a two-fraction granular filling was constructed [4]. In addition, the influence of the degree of filling of the chamber and the content of the crushed material in the feed on the technological and energy efficiency of the auto-oscillating grinding process in a drum mill was experimentally evaluated [5-8].

It turned out that self-excitation of auto-oscillations allows you to switch from a passive mode of implementation of the process of processing granular material to an active intermittent dynamic process based on self-regulation due to feedback without the need for external periodic action. This allows you to sharply intensify and accelerate the process. Auto-oscillations lead to periodic pulsating motion and activate the passive part of the filling and significantly increase the intensity of interaction of particles of the medium with the working body and the medium. The auto-oscillation process is a direction for significantly increasing the energy efficiency of drum machines.

The general dynamic effect of self-excitation of auto-oscillations of the granular filling of the rotating drum chamber is as follows: reduction of the particle and activation of the passive part; increase of the particle of the shear layer near the free surface; enhancement of the liquefaction of the layer; increase of the dilatancy; increase of the velocity gradient between the individual layers and increase of the intensity of mutual intersection of the trajectories of particle motion; increase of the frequency of mutual collisions

of particles; significant increase of the particle contact surface; improvement of the contact of the solid, which is in a suspended pulsating state, and the gaseous or liquid phases; prevention of the formation of a central core of particle size segregation.

According to the traditional classification of inventive tasks, the task assigned belongs to the increased fourth level of complexity. Therefore, the adaptation of the newly established scientific phenomenon of self-excitation of auto-oscillations for practical application in solving the generalized cross-industry inventive task assigned was carried out in several stages.

At the first stage of solving the inventive problem, innovative processes for processing granular materials were created when the drum rotation speed reached the bifurcation value [9-17]. The innovative processes are implemented using a device that includes a drum and a drive with a rotation speed regulator, an elastic element and a recorder of the element's oscillation amplitude. To determine the bifurcation value of the speed, the initial arbitrary drum rotation speed is changed with simultaneous measurement of the amplitude of oscillations of the elastic element until the maximum value of the measurement results is reached.

Recent studies have revealed two qualitatively different modes of self-excitation of fill oscillations – soft (Fig. 4, 5) and hard (Fig. 6), which significantly affect the implementation of technological processes.

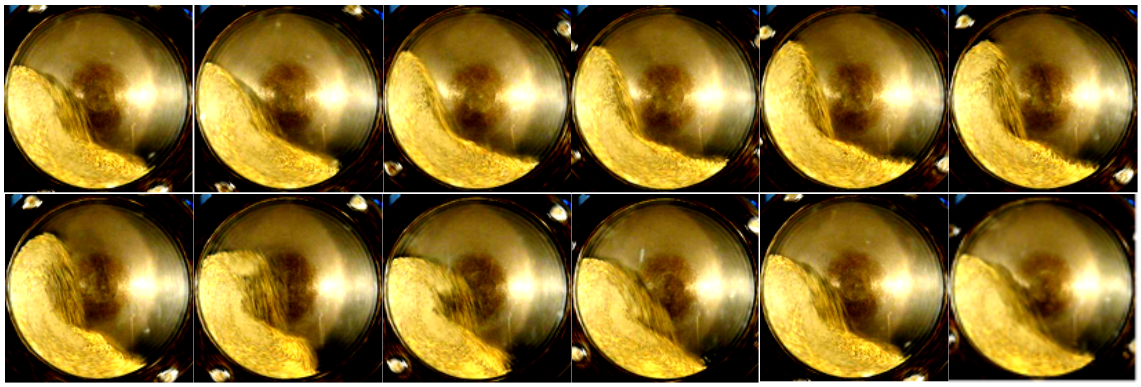


Fig. 4. The resulting scan of successive patterns of one period of auto-oscillations of the granular filling of the rotating drum chamber in the soft self-excitation mode for a filling degree of 0.25

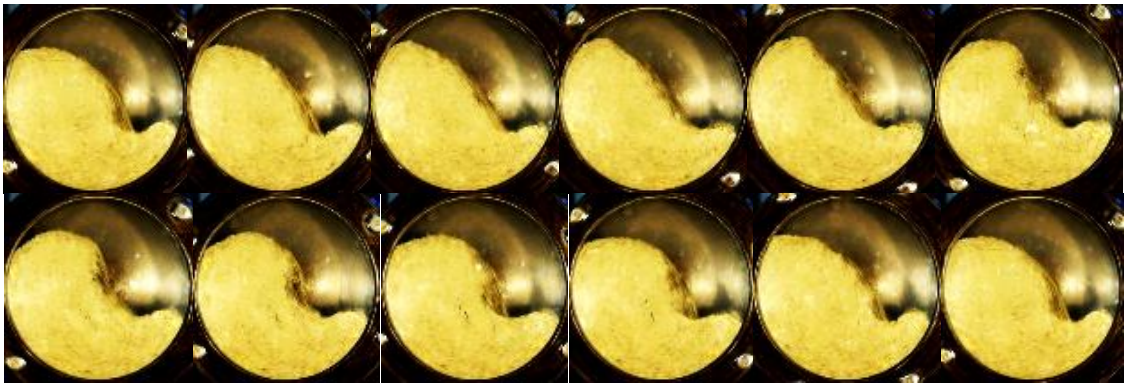


Fig. 5. The resulting scan of successive patterns of one period of auto-oscillations of the granular filling of the rotating drum chamber in the soft self-excitation mode for a filling degree of 0.5

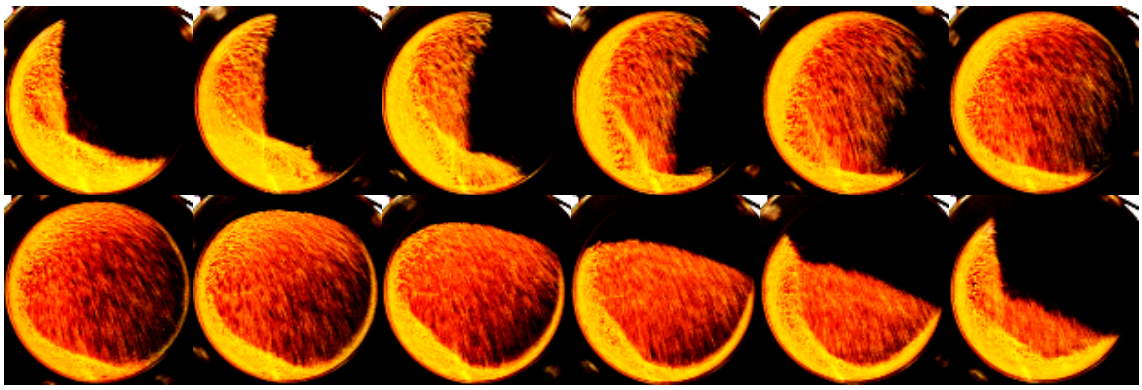


Fig. 6. The resulting scan of successive patterns of one period of auto-oscillations of the granular filling of the rotating drum chamber in the hard self-excitation mode for a filling degree of 0.25

In the soft mode, there is a smooth self-excitation of the quasi-harmonic auto-oscillations of the filling with a limited amplitude (Fig. 4, 5). This mode is characterized by monostability, reduced bifurcation values of the drum rotation speed and the dilatancy of the filling in the chamber, and an increased number of pulsations per drum rotation. With an increase in the degree of filling of the filling chamber, the manifestation of the soft self-excitation mode increases and becomes clearly pronounced.

In the rigid mode, there is a jump-like self-excitation of discontinuous relaxation auto-oscillations of the fill of an inharmonic form with a significant amplitude (Fig. 6). This mode is characterized by bistability, increased amplitude, reduced quality factor and increased degree of relaxation of auto-oscillations. With a decrease in the degree of filling of the chamber, the manifestation of the rigid self-excitation mode intensifies and becomes clearly pronounced.

At the second stage of solving the inventive problem, innovative auto-oscillating processes of granulation, washing, classification and mixing in a soft self-excitation mode [18-21] and processes of heat treatment, grinding, drying, reaction and tumbling in a hard self-excitation mode [22-26] were created.

At the third stage of solving the inventive problem, which is currently under implementation, innovative methods of controlling the processing of granular materials during self-excitation of auto-oscillations in soft and hard modes will be created.

Thus, the application of the established hydrodynamic effect of self-excitation of auto-oscillations of the granular filling of the rotating drum chamber demonstrates the intensification, increase in productivity and reduction in energy consumption of the processes of processing granular materials by significantly increasing the dilatancy and activating the passive part of the filling. This opens the way to the creation of a new generation of working processes of drum-type machines.

References

1. Both, H.-U. (1966). Mahlkörperbewegungen in der Kugelmühle [Motions of grinding elements in a ball mill] [Video]. IWF (Göttingen). https://doi.org/10.3203/IWF/C-921
2. Deineka, K. Yu., & Naumenko, Yu. V. (2018). The tumbling mill rotation stability. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 1(163), 60–68. https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-1/10
3. Deineka, K., & Naumenko, Yu. (2022). Revealing the mechanism of stability loss of a two-fraction granular flow in a rotating drum. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(1[118]), 34–46. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263097
4. Deineka, K., & Naumenko, Yu. (2025). Mathematical modeling of the rotating drum granular fill flow oscillatory stability. Vibroengineering Procedia, 59, 70–81. https://doi.org/10.21595/vp.2025.25248
5. Deineka, K., & Naumenko, Yu. (2019). Revealing the effect of decreased energy intensity of grinding in a tumbling mill during self-excitation of auto-oscillating of the intrachamber fill. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(1[97]), 6–15. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155461
6. Deineka, K., & Naumenko, Yu. (2019). Establishing the effect of decrease in power intensity of self-oscillation grinding in a tumbling mill with decrease of intrachamber fill. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(7[102]), 43–52. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183291

7. Deineka, K., & Naumenko, Yu. (2020). Establishing the effect of decreased power intensity of self-oscillatory grinding in a tumbling mill when the crushed material content in the intra-chamber fill is reduced. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(1[106]), 39–48. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209050
8. Deineka, K., & Naumenko, Yu. (2021). Establishing the effect of simultaneous reduction in the filling load inside a chamber and in the content of the crushed material on the energy intensity of self-oscillatory grinding in a tumbling mill. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(1[109]), 77–87. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224948
9. Deineka, K. Yu., & Naumenko, Yu. V. (2023). Sposib hranuliuvannia zernystoho materialu v barabani [A method for granulating granular material in a drum] (Ukraine Utility Model Patent No. UA 154570 U). Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1772317/
10. Deineka, K. Yu., & Naumenko, Yu. V. (2023). Sposib zmishuvannia zernystykh materialiv v barabani [A method for mixing granular materials in a drum] (Ukraine Utility Model Patent No. UA 154571 U). Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1772392/
11. Deineka, K. Yu., & Naumenko, Yu. V. (2023). Sposib promyvannia zernystoho materialu v barabani [A method for washing granular material in a drum] (Ukraine Utility Model Patent No. UA 154576 U). Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1772369/
12. Deineka, K. Yu., & Naumenko, Yu. V. (2024). Sposib klasyfikatsii zernystoho materialu v barabani [A method for classifying granular material in a drum] (Ukraine Utility Model Patent No. UA 155100 U). Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1780373/
13. Deineka, K. Yu., & Naumenko, Yu. V. (2024). Sposib teplovoi obrobky zernystoho materialu v barabani [A method for heat treatment of granular material in a drum] (Ukraine Utility Model Patent No. UA 155101 U). Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1780416/
14. Deineka, K. Yu., Naumenko, Yu. V., & Zhabchyk, S. V. (2024). Sposib haltuvannia detalei v barabani [A method for tumbling parts in a drum] (Ukraine Utility Model Patent No. UA 157163 U). Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1817657/
15. Deineka, K. Yu., & Naumenko, Yu. V. (2024). Sposib sushinnia zernystoho materialu v barabani [A method for drying granular material in a drum] (Ukraine Utility Model Patent No. UA 157220 U). Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1818458/
16. Deineka, K. Yu., & Naumenko, Yu. V. (2024). Sposib provedennia heterohennoho protsesu z zernystym materialom v barabannomu reaktori [A method for conducting a heterogeneous process with granular material in a drum reactor] (Ukraine Utility Model Patent No. UA 157608 U). Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1826073/
17. Deineka, K. Yu., & Naumenko, Yu. V. (2024). Sposib podribnennia v barabannomu mlyni iz avtokolyvnym vnutrishnokamernym zavantazhenniam [A method for grinding in a drum mill with self-oscillating intra-chamber loading] (Ukraine Utility Model Patent No. UA 157646 U). Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1826100/
18. Deineka, K. Yu., & Naumenko, Yu. V. (2024). Sposib hranuliuvannia zernystoho materialu v barabani iz avtokolyvnym vnutrishnokamernym zavantazhenniam [A method for granulating granular material in a drum with self-oscillating intra-chamber filling] (Ukraine Utility Model Patent No. UA 157868 U). Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1831400/
19. Deineka, K. Yu., & Naumenko, Yu. V. (2024). Sposib promyvannia zernystoho materialu v barabani iz avtokolyvnym vnutrishnokamernym zavantazhenniam [A method for washing granular material in a drum with self-oscillating intra-chamber filling] (Ukraine Utility Model Patent No. UA 158069 U). Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1834666/
20. Deineka, K. Yu., & Naumenko, Yu. V. (2025). Sposib klasyfikatsii zernystoho materialu v barabani iz avtokolyvnym vnutrishnokamernym zavantazhenniam [A method for classifying granular material in a drum with self-oscillating intra-chamber filling] (Ukraine Utility Model Patent No. UA 158585 U). Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1843634/
21. Deineka, K. Yu., & Naumenko, Yu. V. (2025). Sposib zmishuvannia zernystykh materialiv v barabani iz avtokolyvnym vnutrishnokamernym zavantazhenniam [A method for mixing granular materials in a drum with self-oscillating intra-chamber filling] (Ukraine Utility Model Patent No. UA 158884 U). Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1849725/
22. Deineka, K. Yu., & Naumenko, Yu. V. (2025). Sposib teplovoi obrobky zernystoho materialu v barabani iz avtokolyvnym vnutrishnokamernym zavantazhenniam [A method for heat treatment of granular material in a drum with self-oscillating intra-chamber filling] (Ukraine Utility Model Patent No. UA 158810 U). Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1846648/
23. Deineka, K. Yu., & Naumenko, Yu. V. (2025). Sposib podribnennia v barabannomu mlyni iz avtokolyvnym vnutrishnokamernym zavantazhenniam [A method for grinding in a drum mill with self-oscillating intra-chamber filling] (Ukraine Utility Model Patent No. UA 159078 U). Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1852548/
24. Deineka, K. Yu., & Naumenko, Yu. V. (2025). Sposib sushinnia zernystoho materialu v barabani iz avtokolyvnym vnutrishnokamernym zavantazhenniam [A method for drying granular material in a drum with self-oscillating intra-

chamber filling] (Ukraine Utility Model Patent No. UA 159087 U). Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1852588/
25. Deineka, K. Yu., & Naumenko, Yu. V. (2025). Sposib provedennia heterohennoho protsesu z zernystym materialom v barabannomu reaktori iz avtokolyvnym vnutrishnokamernym zavantazhenniam [A method for conducting a heterogeneous process with granular material in a drum reactor with self-oscillating intra-chamber filling] (Ukraine Utility Model Patent No. UA 159719 U). Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1862711/
26. Deineka, K. Yu., Naumenko, Yu. V., & Zhabchyk, S. V. (2025). Sposib haltuvannia detalei v barabani iz avtokolyvnym vnutrishnokamernym zavantazhenniam [A method for tumbling parts in a drum with self-oscillating intra-chamber filling] (Ukraine Utility Model Patent No. UA 160006 U). Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1868220/

НАПРЯМИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТА ЗМЕНШЕННЯ ЕНЕРГОЄМНОСТІ РОБІТ ЗЕМЛЕРИЙНОЇ ТЕХНІКИ

Богдан Федишин, асистент, PhD[1] (ORCID: 0000-0003-2420-7332),
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. *У представленій роботі проведено аналітичне дослідження, спрямоване на розробку та обґрунтування методів підвищення ефективності експлуатації землерийно-транспортних машин. Проаналізовано динаміку робочих процесів основних типів будівельної техніки з метою мінімізації енерговитрат при виконанні енергоємних операцій. Основну увагу приділено концепції інтенсифікації руйнування середовища шляхом впровадження активних робочих органів. Зокрема, досліджено механізми термічного зниження міцності мерзлих та міцних ґрунтів, а також застосування високочастотних механічних вібрацій для зменшення коефіцієнта тертя в зоні взаємодії металу з ґрунтовим масивом. Проведено аналіз можливостей рекуперації скидного тепла гідравлічних систем та двигунів внутрішнього згоряння. Запропоновано рішення щодо використання цієї енергії для попереднього підігріву робочих елементів будівельної техніки. Розглянуто алгоритми адаптивного керування, що базуються на використанні інтелектуальних датчиків зворотного зв'язку для оптимізації траєкторії руху робочих органів у реальному часі. Визначено критичні параметри переходу від традиційного дистанційного керування до створення повністю автономних роботизованих комплексів, здатних функціонувати в межах єдиної цифрової екосистеми будівельного майданчика.*

Ключові слова: *енергоефективність; землерийно-транспортні машини; автоматизація; роботизація; активні робочі органи; динаміка робочих процесів; автономні системи.*

Вступ. Розвиток сучасної інфраструктури та масштабна розбудова транспортних мереж вимагають виконання колосальних обсягів земляних робіт у максимально стислі терміни, що часто супроводжується дефіцитом енергетичних ресурсів та складними умовами виконання робіт. У структурі енерговитрат на будівельних майданчиках землерийна техніка посідає домінуюче місце.

Сьогодні науково-технічний акцент остаточно зміщується в бік інтенсифікації робочих процесів, що передбачає перехід від пасивного подолання опору середовища до активного цілеспрямованого впливу на нього. Це охоплює впровадження систем динамічного навантаження, застосування активних робочих органів з вібраційними або ударними імпульсами, а також методи активного термічного впливу для зниження сили тертя ґрунтів об металеві поверхні. Проте ключовим фактором якісного стрибка у продуктивності виступає тотальна цифровізація технічних засобів. Впровадження систем інтелектуального автоматизованого керування дозволяє мінімізувати вплив людського фактора, оптимізуючи траєкторію різання та режими роботи силової установки в реальному часі залежно від мінливих характеристик ґрунтового масиву.

Особливого значення набуває вектор переходу до повної роботизації землерийно-транспортних комплексів. Створення автономних машин, оснащених системами машинного зору, високоточним позиціонуванням GNSS та алгоритмами штучного інтелекту, дозволяє формувати

цілісні роботизовані ланки, здатні працювати в безперервному циклі 24/7. Такі комплекси зможуть самостійно адаптуватись до рельєфу, узгоджують дії між одиницями техніки на майданчику та забезпечують міліметрову точність виконання проектних відміток. Таким чином, поєднання активних методів інтенсифікації руйнування ґрунту та систем безпілотного керування формує новий технологічний устрій у будівельному машинобудуванні, спрямований на максимальну енергоефективність та екологічну безпеку.

Аналіз літературних джерел. Питання підвищення ефективності землерийно-транспортних машин протягом останніх десятиліть залишається у центрі уваги провідних дослідників у галузі інженерної механіки. Аналіз сучасних публікацій свідчить про поступовий перехід від суто механічних методів інтенсифікації до комплексних інтелектуальних систем.

Фундаментальні засади взаємодії робочих органів із ґрунтовим середовищем висвітлені у роботах, присвячених динаміці руйнування масивів та оптимізації геометрії різальних елементів [1, 2, 3]. Дослідники зазначають, що традиційні пасивні методи розробки ґрунтів практично досягли своєї межі за критерієм енергоємності [5]. У зв'язку з цим, значна частина сучасних праць спрямована на вивчення активних методів впливу, зокрема вібраційних та ударно-імпульсних навантажень, які дозволяють знизити лобовий опір ґрунта на 15–20% [9, 10].

Зокрема, у роботах [7, 9] обґрунтовано можливість використання теплової енергії для термічного підігріву робочих поверхонь, що особливо актуально при роботі в зимовий період та з вологими зв'язними ґрунтами.

Важливим вектором досліджень останніх років є впровадження систем автоматизації та безпілотного керування. Автори [9, 12, 13] наголошують, що застосування алгоритмів адаптивного керування та систем позиціонування GNSS дозволяє досягти стабільності режимів роботи двигуна, що суттєво знижує питому витрату палива. Разом із тим, перехід до повністю автономних роботизованих комплексів потребує подальшого вивчення питань надійності сенсорних систем та алгоритмів машинного зору в умовах високої запиленості та вібрацій [9, 12].

Незважаючи на значну кількість напрацювань, питання створення єдиної методики синтезу енергоефективних робочих органів з інтегрованими системами активного впливу та автоматизації залишається відкритим, що й обумовлює актуальність даного дослідження.

Мета роботи. Системний аналіз та узагальнення перспективних напрямків розвитку будівельної техніки, спрямованих на радикальне зниження енергоємності робіт шляхом інтеграції методів інтенсифікації робочих процесів, систем рекуперації енергії та переходу до концепції інтелектуальних роботизованих землерийно-транспортних комплексів.

Матеріали і методи. Основними матеріалами для дослідження є сучасна науково-технічна література, патентні бази даних, галузеві стандарти та технічна документація провідних світових виробників землерийно-транспортної техніки. У роботі використано результати фундаментальних досліджень у галузі інженерної механіки, геомеханіки та теорії руйнування середовищ, а також дані щодо впровадження інтелектуальних систем у будівельному машинобудуванні.

Методологічну основу дослідження складає системний аналіз процесів взаємодії робочих органів машин із ґрунтовим масивом. У ході роботи застосовувалися методи порівняльного аналізу технічних характеристик сучасної будівельної техніки, методи енергетичного аудиту робочих циклів та теоретичне узагальнення принципів роботи систем автоматизації. Дослідження базується на комплексному підході, що поєднує вивчення фізико-механічних методів інтенсифікації руйнування ґрунтів із моделюванням інтелектуальних алгоритмів автономного керування для досягнення максимальної енергоефективності техніки.

Виклад основного матеріалу. Сучасного стан будівельного машинобудування який базувався на принципах пасивного подолання опору ґрунтового масиву за рахунок тягового зусилля базового шасі, призвела до значної енергетичної неефективності, де левова частка потужності витрачається на подолання внутрішнього тертя в ґрунті та тертя об робочі поверхні [1]. У розрахунках енергоємності розробки ґрунту розглядається як багатофакторна функція, що залежить не лише від фізико-механічних властивостей середовища, а й від динаміки взаємодії робочого органу з масивом. Сучасні дослідження [3, 5] вказують на те, що критичне зниження енергоємності можливе лише за умови переходу до активних методів інтенсифікації руйнування середовища.

Одним із найбільш перспективних напрямків є впровадження активних робочих органів, що генерують динамічні імпульси високої частоти. Застосування вібраційних навантажень дозволяє перевести ґрунт у стан попереднього розпушення в зоні контакту, що радикально знижує коефіцієнт зовнішнього тертя та опір різанню [2]. Теоретичні розрахунки підтверджують, що вибір оптимальних параметрів амплітуди та частоти коливань у резонансному або близькому до резонансу режимах забезпечує зниження тягового опору на 25–30% при незначних витратах енергії на привід вібратора [9, 10]. Це відкриває шлях до створення легших і маневреніших машин, продуктивність яких не обмежена лише їхньою зчіпною вагою.

Паралельно з механічною інтенсифікацією вагому роль відіграє термодинамічний аспект. Дослідження рекуперації вторинних енергоресурсів, зокрема скидного тепла гідросистем та вихлопних газів двигунів, демонструють високий потенціал для термічного впливу на зону різання. Активне нагрівання поверхонь відвалів бульдозерів або екскаваторних ковшів мінімізує ефект адгезії та знижує міцнісні характеристики мерзлих або перезволожених ґрунтів у прикордонному шарі [7]. Системне поєднання термічного підігріву з механічною інтенсифікацією створює синергетичний ефект, дозволяючи машині адаптуватися до екстремальних експлуатаційних умов без нарощування встановленої потужності.

Проте технічне вдосконалення механічної частини є лише однією складовою сучасної стратегії розвитку. Ключовим вектором стає перехід до мехатронних систем, де автоматизація та роботизація виступають головними інструментами оптимізації енергоспоживання. Інтелектуальні системи керування, що базуються на алгоритмах реального часу, дозволяють здійснювати безперервний моніторинг параметрів опору ґрунту та автоматично корегувати кут різання, швидкість руху та подачу палива [12, 13]. Це нівелює похибки оператора, які, за статистикою, призводять до перевитрати енергії у 15–20% випадків. Впровадження технологій GNSS-позиціонування та машинного зору забезпечує високу точність формування профілю земляної споруди за один прохід, що критично важливо для зменшення загального машино-часу роботи на об'єкті [13, 14].

На особливу увагу заслуговує концепція повністю автономних роботизованих комплексів, що працюють у спільному режимі. В таких системах кожна одиниця техніки є частиною єдиного інтелектуального середовища, де координація дій між бульдозерами, екскаваторами та самоскидами відбувається без участі людини [6, 11, 12]. Це дозволяє оптимізувати логістичні ланцюжки всередині майданчика, мінімізувати простої з увімкненими двигунами та максимально використовувати інерційні властивості машин. Таким чином, сучасне рішення задачі інтенсифікації полягає у синтезі глибокої фізичної модифікації робочих процесів та інтелектуальної надбудови, що забезпечує перехід від окремих удосконалених машин до високоефективних автономних систем будівництва майбутнього.

Обговорення. Результати проведеного аналізу свідчать про те, що сучасний етап розвитку землерийного машинобудування характеризується відмовою від нарощування масових та габаритних параметрів на користь інтелектуалізації та фізичної модифікації робочих процесів. Головна перевага впровадження активних робочих органів полягає у можливості керування реологічними властивостями ґрунту безпосередньо в зоні контакту. Зокрема, використання ефекту розпушення через вібраційний вплив та зниження адгезії шляхом термічної рекуперації дозволяє змінити енергетичний баланс машини, спрямовуючи більшу частину потужності на корисну роботу різання, а не на подолання сил тертя.

Проте, варто зауважити, що реалізація зазначених методів інтенсифікації потребує принципово нових підходів до проектування динамічних систем будівельних машин. Якщо механічна частина вже має певне теоретичне підґрунтя, то питання надійної роботи чутливої електроніки таких як сенсори GNSS, лідари, камери та інші датчик, в умовах інтенсивних вібрацій та екстремального запилення залишається дискусійним і вимагає окремих конструкторських рішень. Синергія між фізичними методами інтенсифікації та цифровими алгоритмами керування створює нову інженерну платформу. Обговорення результатів підтверджує, що найбільший економічний ефект досягається не від окремого впровадження одного з методів, а від їх системного поєднання в межах єдиного автономного комплексу, що працює за принципом мінімізації питомих енерговитрат на одиницю

об’єму розробленого ґрунту.

Висновки. У результаті проведеного дослідження щодо сучасних рішень інтенсифікації та зменшення енергоємності робіт землерийної техніки було встановлено, що напрямок розвитку будівельних машин, який базується на збільшенні їхньої маси та потужності, на сучасному етапі є економічно та екологічно недоцільним через непропорційне зростання витрат ресурсів при незначному підвищенні продуктивності.

Натомість найефективнішими інструментами зниження опору ґрунтового середовища виступають активні методи інтенсифікації, зокрема застосування високочастотних вібрацій та термічної рекуперації скидного тепла, що дозволяє зменшити тяговий опір на 25–30% і забезпечити стабільну роботу техніки навіть у складних мерзлих чи зв’язних ґрунтах. Важливу роль у цьому процесі відіграє цифрова трансформація та автоматизація, які стають ключовими факторами усунення негативного впливу людського фактора впровадження адаптивних систем керування дозволяє оптимізувати режими роботи силових агрегатів у реальному часі, забезпечуючи економію палива до 20%.

Тому подальшим вектором розвитку будівельної техніки являється перехід до повністю автономних роботизованих комплексів та створення єдиної цифрової екосистеми будівельного майданчика, де техніка взаємодіє у спільному режимі для досягнення принципово нових показників енергоефективності, точності та швидкості виконання робіт. З огляду на це, подальші наукові дослідження доцільно спрямувати на розробку адаптивних алгоритмів керування активними робочими органами, які б дозволили автоматично підлаштовувати частоту та амплітуду силового впливу під зміни фізико-механічних властивостей ґрунтового масиву.

Список використаних джерел

1. Baladinskyi, V. L. (2001). *Budivelna tekhnika: navchalnyi posibnyk* [Construction equipment: A textbook]. Lybid.
2. Baladinskyi, V. L., et al. (1998). *Budivelni i melioratyvni mashyny: Pidruchnyk* [Construction and land reclamation machines: A textbook]. RDTU.
3. Vetrov, Yu. O., & Vlasov, V. V. (1995). *Mashyny dlia zemlianykh robit. Pryklady rozrakhunku* [Earth-moving machines. Calculation examples]. ISDO.
4. Khmara, L. A., & Kravets, S. V. (2014). *Mashyny dlia zemlianykh robit* [Earth-moving machines]. KhNADU.
5. Sukach, M. K. (2020). *Budivelni mashyny i obladnannia* [Construction machines and equipment]. Lira-K.
6. Nguyen, H. A. D., & Ha, Q. P. (2023). Robotic autonomous systems for earthmoving equipment operating in volatile conditions and teaming capacity: A survey. *Robotica*, *41*(2), 486–510. https://doi.org/10.1017/S0263574722000339
7. Rijpkema, J., Munch, K., & Andersson, S. B. (2022). Exhaust waste heat recovery from a heavy-duty truck engine. *Applied Thermal Engineering*, *201*, Article 117761. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117761
8. Wong, J. Y. (2022). *Theory of Ground Vehicles* (5th ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119719984
9. Niyamapa, T., & Salokhe, V. M. (2000). Soil disturbance and force mechanics of vibrating tillage tool. *Journal of Terramechanics*, *37*(3), 151–166. https://doi.org/10.1016/S0022-4898(00)00005-7
10. Yow, J., & Smith, J. L. (1976). Sinusoidal vibratory tillage. *Journal of Terramechanics*, *13*(4), 211–226. https://doi.org/10.1016/0022-4898(76)90043-4
11. Loveikin, V. S., Romasevych, Yu. O., & Chovniuk, Yu. V. (2012). *Mekhatronika* [Mechatronics]. Kyiv.
12. Azar, E. R., & Kamat, V. R. (2017). Earthmoving equipment automation: A review of technical advances and future outlook. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, *22*, 247–265.
13. Feng, J., et al. (2025). Advancements and challenges in earthmoving equipment automation using core technologies. *Automation in Construction*, *179*, Article 106472. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106472
14. Zhou, J. (2022). A review of LiDAR sensor technologies for perception in automated driving. *Academic Journal of Science and Technology*, *3*(3), 255–260.

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ЕКСТРУЗІЙНОЇ НАСАДКИ НА ФОРМУВАННЯ ШАРУ БУДІВЕЛЬНОЇ СУМІШІ ПРИ 3D-ДРУЦІ

Денис Сідан аспірант[1] **(**ORCID: 0009-0006-7945-5615),
Тетяна Нестеренко, доцент, к.т.н., доцент[1] (ORCID: 0000-0002-2387-8575),
Микола Нестеренко, доцент, к.т.н., доцент[1] (ORCID: 0000-0002-4073-1233),
[1]Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка 24, 36011, Україна

АНОТАЦІЯ. *У роботі розглянуто вплив параметрів екструзійної насадки на формування шару будівельної суміші при 3D-друці. Показано, що якість пошарового укладання матеріалу визначається не лише реологічними властивостями суміші та режимами її подачі, а й геометричними характеристиками формувальної насадки: площею вихідного отвору, його формою, еквівалентним діаметром, довжиною формувального каналу та умовами перебудови потоку перед виходом із сопла. Обґрунтовано, що раціонально підібрані параметри насадки забезпечують стабільну витрату суміші, зменшення гідравлічного опору, рівномірне витікання матеріалу та формування шару із заданою шириною і висотою. Встановлено, що узгодження швидкості переміщення друкувальної головки з фактичною витратою суміші є необхідною умовою безперервності процесу 3D-друку та збереження геометричної точності надрукованого елемента.*

Ключові слова: *будівельний 3D-друк; екструзійна насадка; будівельна суміш; формування шару; екструзія; сопло; витрата суміші; реологічні властивості; друкувальна головка; адитивне будівництво.*

Вступ. Для встановлення впливу основних конструктивних і режимних параметрів малогабаритного обладнання для вібраційної очистки деталей на характер руху робочого контейнера доцільно застосувати математичне моделювання механічної системи. Реальна система, що включає контейнер із деталями та робочим наповнювачем, пружні опори, віброзбуджувач і привід, має складний характер взаємодії елементів, тому її повний чисельний аналіз є досить громіздким. З метою спрощення розрахунків розглянуто узагальнену механічну модель вібраційної установки, яка дозволяє описати основні закономірності коливального руху контейнера та оцінити вплив амплітуди, частоти, маси робочого середовища і параметрів віброзбудження на інтенсивність процесу очистки. Початковим етапом побудови такої моделі є визначення кінетичної енергії системи з подальшим складанням рівнянь руху на основі положень аналітичної механіки.

Аналіз літературних джерел. Аналіз сучасних досліджень показує, що якість формування шару при будівельному 3D-друці значною мірою залежить від узгодження реологічних властивостей суміші, параметрів подачі матеріалу та геометрії екструзійної насадки. У роботі [1] розглянуто процес осадження бетонної суміші екструдером будівельного 3D-принтера та показано, що стабільність формування шару визначається режимами подачі суміші й умовами її виходу з формувальної головки. Це джерело є базовим для аналізу завершального етапу технологічного процесу – укладання матеріалу на поверхню друку.

У праці [2] систематизовано вплив параметрів насадки на екструдованість, здатність до нарощування шарів і міжшарове зчеплення 3D-друкованого бетону. Авторами встановлено, що найбільш важливими параметрами є швидкість переміщення насадки, її розмір, форма вихідного отвору та відстань до попереднього шару. Ці положення безпосередньо пов’язані з обґрунтуванням геометричних характеристик насадки для забезпечення рівномірного формування шару.

У роботі [3] розроблено чисельний підхід до моделювання процесів екструзії та пошарового осадження матеріалу при 3D-друці бетоном. Показано, що форма шару залежить від витрати матеріалу, швидкості руху друкувальної головки, поведінки суміші в свіжому стані та умов контакту між шарами. Запропонований підхід дозволяє оцінювати вплив параметрів екструзії на геометрію надрукованого елемента.

Окрему увагу питанню екструдованості приділено у дослідженні [4], де процес витікання 3D-друкованого бетону розглянуто як двофазний дискретний потік. Авторами показано, що невідповідність між розміром вихідного отвору насадки та крупністю заповнювача може

призводити до закупорювання сопла, нестабільної подачі й погіршення форми екструдованого шару. Це підтверджує необхідність раціонального вибору діаметра насадки з урахуванням гранулометричного складу суміші.

Аналіз літератури свідчить, що екструзійна насадка є одним із ключових елементів технологічної системи будівельного 3D-друку. Її форма, розміри, довжина формувального каналу та положення відносно поверхні друку визначають стабільність матеріального потоку, геометрію шару, якість міжшарового контакту та безперервність процесу пошарового формування.

Мета роботи. Метою роботи є дослідження впливу геометричних і технологічних параметрів екструзійної насадки на процес формування шару будівельної суміші при 3D-друці. Передбачається проаналізувати вплив форми та площі вихідного отвору, еквівалентного діаметра, довжини формувального каналу, витрати суміші та швидкості переміщення друкувальної головки на стабільність матеріального потоку, рівномірність укладання шару та точність його геометричних параметрів. Особливу увагу приділено обґрунтуванню умов узгодження подачі суміші з параметрами пошарового формування для забезпечення безперервності процесу друку, зменшення дефектів шару та підвищення якості надрукованих будівельних елементів.

Виклад основного матеріалу. Екструзійне формування шару будівельної суміші є завершальним етапом технологічного процесу 3D-друку, під час якого матеріал після змішування та подачі насосною системою надходить до друкувальної головки й витікає через формувальну насадку.

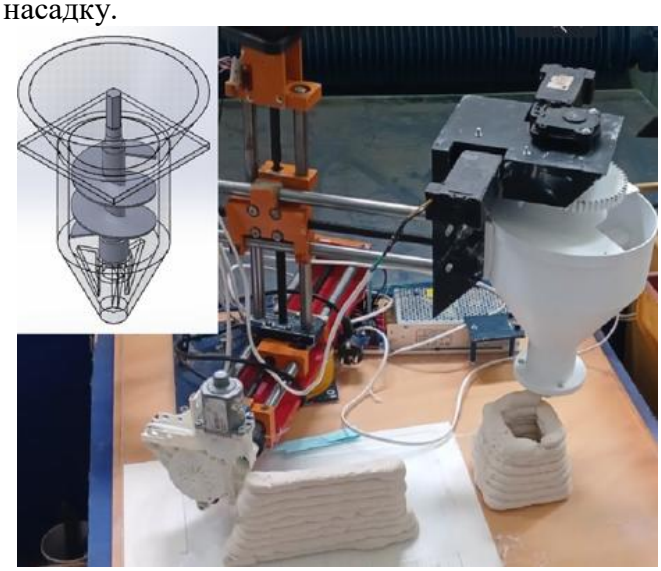


Рис. 1. Лабораторний 3D-принтер з екструзійною головкою для формування шару будівельної суміші

Саме на цьому етапі остаточно задаються геометричні параметри шару, його ширина, висота, суцільність і здатність зберігати форму після укладання. Тому екструзійна насадка є одним із ключових елементів лабораторного 3D-принтера, що безпосередньо впливає на якість пошарового формування будівельної суміші.

Загальний вигляд лабораторного 3D-принтера та екструзійного вузла для подачі будівельної суміші наведено на рис. 1. Установка включає систему переміщення друкувальної головки, бункер для суміші, вузол подачі матеріалу, екструзійну насадку та робочу зону, у якій виконується пошарове формування зразків.

Наявність змінної насадки дозволяє досліджувати вплив її геометричних параметрів на стабільність витікання матеріалу, форму екструдованого шару та рівномірність укладання суміші

Параметри екструзійної насадки визначають умови переходу суміші від шнекової або трубопровідної подачі до формування шару на поверхні друку. Основними з них є форма та площа вихідного отвору, еквівалентний діаметр, довжина формувального каналу і конфігурація внутрішньої порожнини. Вони впливають на гідравлічний опір, швидкість витікання, рівномірність потоку та здатність суміші зберігати задану форму після виходу з сопла.

Площа вихідного отвору повинна відповідати гранулометричному складу суміші, її рухливості та продуктивності системи подачі. Недостатня площа може спричиняти пульсації потоку або закупорювання каналу, а надмірно велика – розпливання шару та втрату геометричної точності. Форма отвору також є важливою: круглі насадки забезпечують рівномірне витікання, тоді як прямокутні або щілинні дозволяють формувати шар із більш прогнозованими розмірами.

Довжина формувального каналу впливає на стабілізацію потоку перед виходом із насадки. Короткий канал зменшує опір руху суміші, але може не забезпечити достатнього вирівнювання потоку, тоді як довший канал покращує однорідність витікання, проте збільшує втрати тиску.

Якість друку залежить від узгодження параметрів насадки зі швидкістю переміщення друкувальної головки та витратою суміші. Надлишкова подача призводить до накопичення матеріалу й деформації шару, а недостатня – до розривів і порожнин. Тому стабільне формування шару можливе лише за раціонального поєднання геометрії насадки, реологічних властивостей суміші та режимів подачі.

Екструзійна насадка виконує не лише функцію випускного елемента, а й формує умови переходу будівельної суміші у стійкий шар. Раціональний вибір її геометричних параметрів дозволяє зменшити гідравлічний опір, забезпечити стабільну витрату матеріалу, підвищити точність формування шару та покращити якість пошарового укладання при будівельному 3D-друці. Це підтверджує доцільність подальших експериментальних досліджень роботи змінних екструзійних насадок на лабораторному 3D-принтері.

Висновки. Встановлено, що параметри екструзійної насадки суттєво впливають на характер виходу будівельної суміші, форму шару, рівномірність укладання та стабільність матеріального потоку при 3D-друці. Основними чинниками є форма і площа вихідного отвору, еквівалентний діаметр, довжина формувального каналу та узгодження цих параметрів із витратою суміші й швидкістю переміщення друкувальної головки. Раціональний вибір геометрії насадки дозволяє зменшити дефекти шару, підвищити точність пошарового формування та покращити якість 3D-друку.

Список використаних джерел

1. Orysenko, O., Nesterenko, M., & Shokalo, A. (2022). The analytical investigation of the concrete mixture deposition process by the concrete 3D printer extruder. Academic Journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering, 2(59), 5–10. https://doi.org/10.26906/znp.2022.59.3093
2. Yang, L., Sepasgozar, S. M. E., Shirowzhan, S., Kashani, A., & Edwards, D. (2023). Nozzle criteria for enhancing extrudability, buildability and interlayer bonding in 3D printing concrete. Automation in Construction, 146, Article 104671. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104671
3. Rizzieri, G., Ferrara, L., & Cremonesi, M. (2024). Numerical simulation of the extrusion and layer deposition processes in 3D concrete printing with the Particle Finite Element Method. Computational Mechanics, 73, 277–295. https://doi.org/10.1007/s00466-023-02367-y
4. Sun, Y., Zhang, X., Zhou, J., Wang, Y., Zhang, B., Zhang, Y., Cui, W., & Tao, Y. (2024). Extrudability analysis of 3D printable concrete as a two-phase discrete flow. Journal of Building Engineering, Article 111252. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111252

ПОРІВНЯЛЬНИЙ ОГЛЯД ПЕРСПЕКТИВНИХ КОНСТРУКЦІЙ ВІБРОЗБУДНИКІВ ДЛЯ ЕНЕРГООЩАДНОГО ВІБРАЦІЙНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Віталій Корендій, доцент, к.т.н., завідувач кафедри [1] (ORCID: 0000-0002-6025-3013),
Олег Паращин, аспірант [1] (ORCID: 0000-0002-2970-8163),
Олександр Янів, аспірант [1] (ORCID: 0009-0001-2491-5278),
Владислав Киричук, аспірант [1] (ORCID: 0009-0009-7891-6987),
[1] Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери 12, 79013, Львів, Україна

АНОТАЦІЯ. *Розглянуто три перспективні конструкції віброзбудників для вібраційного технологічного обладнання: планетарний інерційний віброзбудник, здвоєний фазокерований кривошипно-шатунний механізм і кулачковий віброзбудник з пружно зв'язаною коливальною масою. Показано, що всі три рішення орієнтовані не лише на створення заданої амплітуди та частоти, а передусім на програмування траєкторії або закону прискорення робочого органа. Планетарна конструкція забезпечує механічне формування колових, еліптичних, прямолінійних і гіпотрохоїдальних траєкторій через добір передатного відношення, ексцентриситету та початкової фази. Здвоєний кривошипно-шатунний збудник дає змогу перемикати прямолінійні, еліптичні та близькі до колових траєкторії за рахунок керування фазовим зсувом між двома каналами збудження. Кулачковий віброзбудник доцільний для реалізації асиметричних, зокрема близьких до віброударних, законів прискорення, однак потребує контролю кута тиску, кривизни профілю та умов безвідривного контакту. Узагальнено переваги, обмеження та типові сфери застосування розглянутих конструкцій.*

Ключові слова: *віброзбудник; вібраційне технологічне обладнання, енергоощадність; планетарний механізм; кривошипно-шатунний механізм; кулачковий механізм; траєкторія коливань; синтез.*

Вступ. Вібраційне технологічне обладнання застосовується у процесах транспортування, грохочення, сортування, ущільнення, сепарації, фінішної обробки та активації сипких або дисперсних середовищ. Енергоощадність таких машин визначається не тільки коефіцієнтом корисної дії приводу, а й відповідністю закону руху робочого органа конкретному технологічному процесу. За однакових витрат енергії прямолінійна, еліптична, колова або імпульсна траєкторія можуть забезпечувати різний транспортний ефект, різну інтенсивність розпушення шару, різні контактні навантаження та зношування елементів машини.

Традиційні інерційні збудники з незмінним дебалансом є конструктивно простими, але мають обмежену здатність до адаптації траєкторії руху. Тому перспективним напрямом є створення віброзбудників, у яких бажаний закон руху формується на рівні кінематичної структури або параметрів керування: передатного відношення, фази, ексцентриситету, ходу повзуна, геометрії напрямних чи профілю кулачка. Такий підхід дозволяє наблизити механічну систему до режиму «потрібна дія – мінімальні енергетичні втрати», оскільки енергія не витрачається на надлишкові складові руху, які не беруть участі у виконанні технологічної операції.

Аналіз літературних джерел. Класичні положення теорії коливань і вібраційної механіки показують, що ефективність вібраційних машин істотно залежить від співвідношення власних і вимушених частот, демпфування, фазових співвідношень і способу передавання збурювальних сил [1, 2]. У сучасних роботах для вібраційних грохотів і транспортерів підкреслюється роль траєкторії руху робочого органа: змінна еліптична траєкторія та керування напрямом коливань можуть підвищувати інтенсивність транспортування, розподіл матеріалу і якість сепарації [3, 4]. Огляд нових конструкцій інерційних віброзбудників також вказує на потребу переходу від емпіричного підбору параметрів до синтезу траєкторії та динамічної адаптації збудника до машини [5].

У першій базовій роботі розглянуто планетарний віброзбудник, у якому кільцева шестерня, водило, сателіти та ексцентрично розташована незрівноважена маса утворюють механічне джерело багаточастотного збудження. Автори показали, що співвідношення $R/r = 2$ є межовим випадком, за якого формуються одночастотні колові, еліптичні або прямолінійні траєкторії; за $R/r \neq 2$ виникають

справжні гіпотрохоїдальні траєкторії [6]. У другій роботі досліджено три-масову систему зі здвоєним кривошипно-шатунним збудником. Її ключовою особливістю є фазове керування двома каналами, що дозволяє отримувати вертикальні, горизонтальні, похилі, еліптичні та близькі до колових траєкторії робочого органа [7]. У третій роботі запропоновано інверсний синтез кулачкового віброзбудника, коли профіль дискового кулачка визначається не з наперед заданої геометрії, а з потрібної програми прискорення коливальної маси [8]. Для кулачкових систем особливо важливими залишаються питання безвідривного контакту, контактно-ударної динаміки та локальної кривизни профілю [9].

Мета роботи. Метою роботи є порівняльне узагальнення трьох перспективних конструкцій віброзбудників і визначення їх раціональних сфер застосування у складі енергоощадного вібраційного технологічного обладнання. Досягнення мети передбачає: 1) ідентифікацію керованих параметрів кожної конструкції; 2) встановлення зв'язку між параметрами збудника і траєкторією або законом прискорення робочого органа; 3) оцінювання конструктивних переваг, обмежень та умов енергетично доцільного використання.

Матеріали і методи. Матеріальною базою дослідження є три наукові праці [6–8], присвячені планетарному, здвоєному кривошипно-шатунному та кулачковому віброзбудникам. Методично робота виконана як порівняльний огляд із елементами структурно-кінематичного та динамічного аналізу. Для планетарного збудника (рис. 1) аналізувались геометричні параметри R, r, H, ε та початкова фаза γ_0; для здвоєного кривошипно-шатунного механізму (рис. 2) – фазовий зсув γ, орієнтації напрямних θ_2, θ_3 і відносні ходи r_2, r_3; для кулачкового механізму (рис. 3) – програма прискорення $a_1(\theta)$, переміщення штовхача $s(\theta)$, радіус основного кола R_b, кут тиску α та радіус кривизни ρ. Порівняння виконувалося за п'ятьма критеріями: тип формованої траєкторії, рівень керованості, енергетична доцільність, конструктивна складність та ризикові обмеження експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Планетарний віброзбудник (рис. 1) складається з кільцевої шестерні (епіцикла, корони), водила, сателітів та незрівноваженої маси, центр якої розміщений з ексцентриситетом ε відносно осі сателіта. Положення точки збудження E може бути описане як суперпозиція руху центра сателіта та відносного руху ексцентрика: $x_E = (R-r)\cdot\cos\varphi + \varepsilon\cdot\cos\left[(1-R/r)\cdot\varphi+\gamma_0\right]$, $y_E = (R-r)\cdot\sin\varphi + \varepsilon\cdot\sin\left[(1-R/r)\cdot\varphi+\gamma_0\right]$. Звідси випливає головна перевага такої конструкції: траєкторія збурювальної маси задається без складної електронної системи керування – через геометрію зубчастого зачеплення та початкову фазу.

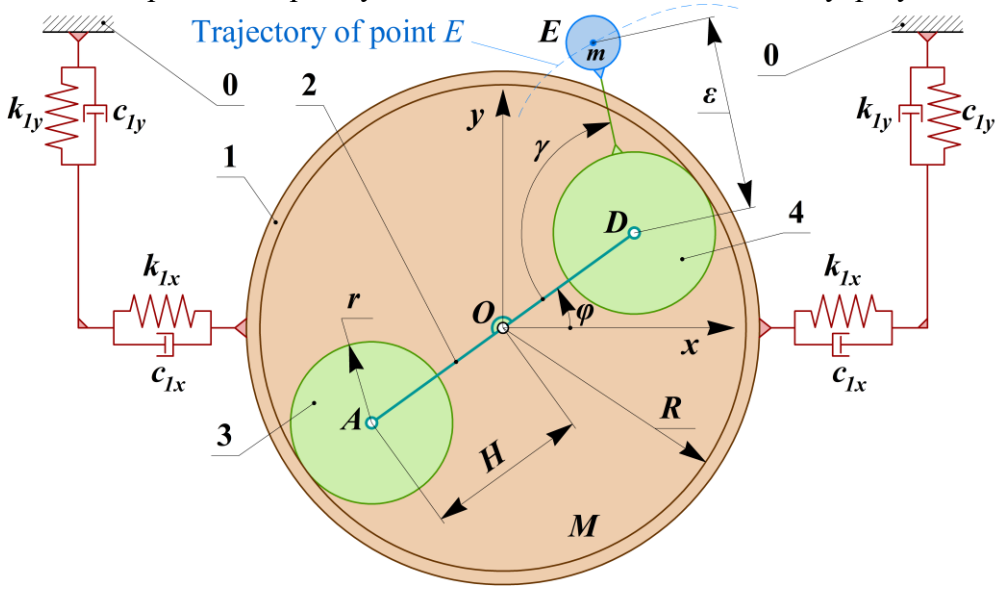


Рис. 1. Розрахункова схема віброзбудника планетарного типу

За умови $R = 2r$ частоти двох складових стають рівними за модулем, і точка E описує одночастотну криву. Якщо $\varepsilon = 0$, формується колова траєкторія; якщо $0 < \varepsilon < r$ – еліптична; якщо $\varepsilon = r$ – прямолінійна. Початкова фаза γ_0 визначає орієнтацію еліпса або прямої, причому для цього

граничного випадку кут орієнтації можна оцінювати як $\alpha = \gamma_0/2$. За $R/r > 2$ виникає гіпотрохоїдальний режим: передатне відношення задає кількість пелюсток, а ε/r визначає перехід від заокруглених контурів до петлеподібних траєкторій.

Енергоощадний потенціал планетарного збудника полягає у механічному програмуванні траєкторії без постійної зміни швидкості приводу. Робочий орган може відтворювати траєкторію, близьку до траєкторії збуджувальної маси, а пружно-дисипативні опори масштабують її амплітуду та фільтрують високочастотні складові. Такий збудник доцільний для машин, де потрібна компактна конструкція і змінна геометрія руху: грохотів, вібротранспортерів, установок фінішної обробки. Водночас необхідно враховувати втрати в зубчастому зачепленні, люфти, точність виготовлення та балансування рухомих елементів.

Здвоєний кривошипно-шатунний віброзбудник (рис. 2) реалізовано як двоканальну механічну систему з двома допоміжними масами, що рухаються вздовж похилих напрямних і через пружно-в'язкі зв'язки передають сили робочому органу. На відміну від одиничного кривошипного механізму, ця схема має додатковий керований параметр – фазовий зсув γ між каналами. У прийнятій моделі клас траєкторії визначається ефективним фазовим зсувом $\delta = \gamma + (\theta_3 - \theta_2)$. Коли $\delta \approx 0°$ або $\delta \approx 80°$, формується майже прямолінійна траєкторія; коли δ відрізняється від цих значень, виникають еліптичні траєкторії; за збалансованих амплітуд і $\delta \approx 90°$ отримується близька до колової траєкторія.

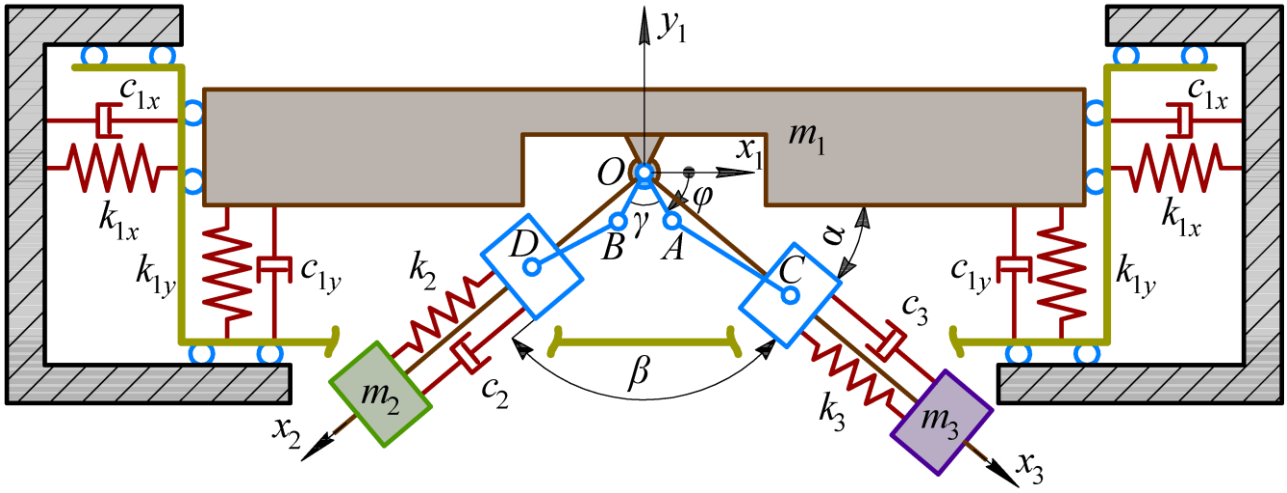


Рис. 2. Розрахункова схема здвоєного кривошипно-шатунного віброзбудника

Геометричні кути θ_2 і θ_3 визначають напрям проєкцій збуджувальних сил, а відносні радіуси кривошипів r_2/r_3 регулюють амплітудний баланс між каналами. Тому один і той самий структурний принцип може забезпечувати вертикальні, горизонтальні, похилі, еліптичні та колові коливання. За умови електронної синхронізації приводів фазовий зсув γ може стати оперативним параметром керування, а кути напрямних і ходи повзунів – конструктивними налаштуваннями.

Енергетична перевага цієї схеми пов'язана з можливістю працювати поблизу резонансу допоміжних гілок, не доводячи робочий орган до надмірних резонансних навантажень. Система передає технологічно корисні компоненти сили у потрібному напрямі, а зайві проєкції можуть взаємно компенсуватися. Основні обмеження – потреба в точній фазовій синхронізації, чутливість майже колових режимів до розбалансування гілок, а також вплив мас повзунів, тертя напрямних і пружності трансмісії у реальній машині.

Кулачковий віброзбудник (рис. 3) доцільно розглядати як механізм точного програмування закону руху. Дисковий кулачок діє на поступальний штовхач, штовхач через пружину збуджує робочу масу, а зворотна пружина підтримує силове замикання контакту. Ключова відмінність цієї схеми полягає у тому, що робоча маса не є жорстко зв'язаною зі штовхачем. Тому синтез починається з потрібного прискорення робочої маси $a_1(\theta)$, після чого за інверсною моделлю знаходиться переміщення штовхача: $x_2(\theta) = x_1(\theta) + (M/c_1)\cdot a_1(\theta)$ для недемпфованого зв'язку без зовнішнього технологічного навантаження.

Профіль кулачка визначається як огинальна положень плоского торця штовхача. Для попереднього проєктування важливими є дві групи обмежень: обмеження кута тиску $\tan\alpha = s'(\theta)/\left(R_b + s(\theta)\right)$ та умова додатної кривизни $\rho(\theta) = R_b + s(\theta) + s''(\theta) > 0$, що запобігає підрізанню і втраті технологічності профілю. У наведеному в [7] прикладі для близького до віброударного режиму при n = 1200 об/хв, ході H = 4 мм і короткому робочому інтервалі β_r = 40° було отримано імпульс прискорення близько ±750 м/с². За вибраного R_b = 100 мм максимальний кут тиску становив лише близько 5,96°, а мінімальний радіус кривизни – близько 10,26 мм; отже, визначальним обмеженням стала не бічна сила в напрямній, а саме локальна кривизна профілю.

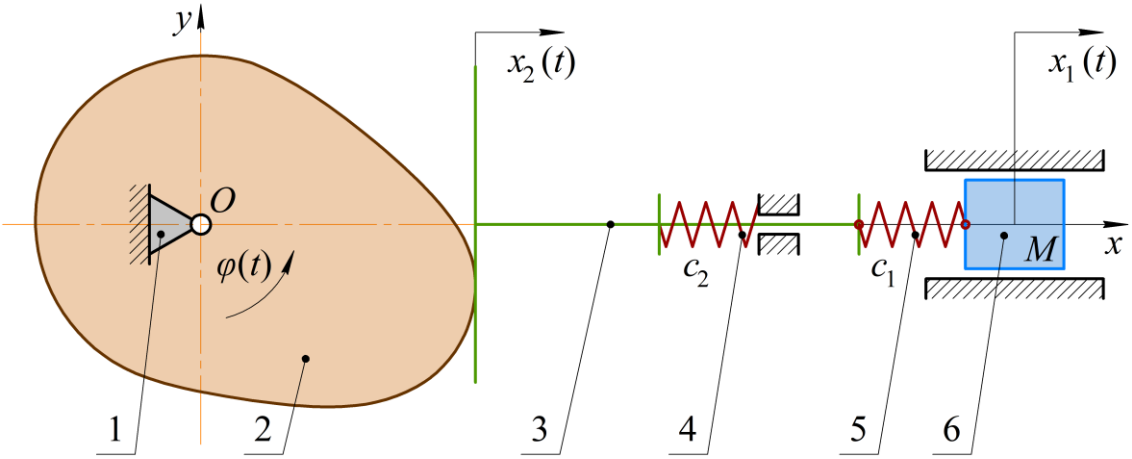


Рис. 3. Розрахункова схема здвоєного кулачкового віброзбудника

Кулачкова конструкція є найбільш придатною для режимів, де потрібен асиметричний цикл: швидкий робочий хід, імпульсна дія або наближення до віброударного режиму при контрольованому поверненні. Потенційна енергоощадність досягається за рахунок формування корисного прискорення саме у потрібній фазі технологічного циклу. Проте така схема висуває жорсткі вимоги до контактної міцності, твердості поверхонь, змащування, точності виготовлення та перевірки безвідривного контакту.

Обговорення результатів. Порівняння трьох конструкцій показує, що вони реалізують різні стратегії енергоощадного збудження (див. Табл. 1). Планетарний механізм найкраще підходить для механічного програмування складних траєкторій без активного фазового керування під час роботи. Здвоєний кривошипно-шатунний збудник забезпечує найширші можливості оперативного перемикання траєкторії за рахунок фазового зсуву, особливо у машинах з електронно синхронізованими приводами. Кулачковий механізм має найвищу здатність до формування заданого закону прискорення, але є найбільш чутливим до контактних, міцнісних і технологічних обмежень.

З погляду енергоощадності найбільш універсальним є не конкретний тип механізму, а принцип узгодження структури збудника з технологічним завданням. Якщо процес потребує змінної просторової траєкторії за незмінного приводу, доцільним є планетарний збудник. Якщо потрібна адаптація траєкторії під час роботи або швидке перемикання режимів, перевагу має двоканальна кривошипно-шатунна система. Якщо основною вимогою є наперед заданий закон прискорення, зокрема короткий інтенсивний робочий імпульс, найбільш раціональним є кулачковий збудник. У всіх випадках остаточний вибір повинен враховувати не тільки кінематику, а й динамічну взаємодію з робочим середовищем, жорсткість опор, демпфування, умови контакту і допустиму потужність приводу.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика розглянутих віброзбудників

Критерій	**Планетарний**	**Здвоєний кривошипно-шатунний**	**Кулачковий**
Основний параметр синтезу	R/r, ε/r, γ_0	γ, θ_2, θ_3, r_2/r_3	$a_1(\theta)$, $s(\theta)$, R_b
Тип траєкторії	колова, еліптична, прямолінійна, гіпотрохоїдальна	прямолінійна, еліптична, близька до колової	заданий закон переміщення/прискорення вздовж осі
Перевага для енергоощадності	механічне програмування траєкторії без складного керування	компенсація зайвих проєкцій сил і фазове налаштування	концентрація корисного імпульсу у потрібній фазі циклу
Критичні обмеження	люфт, балансування, втрати в зачепленні	синхронізація каналів, тертя напрямних, розбалансування	кривизна профілю, контактні напруження, безвідривний контакт
Раціональне застосування	грохоти, транспортери, поліорбітальні режими	обладнання з перемиканням траєкторій	імпульсні та близькі до віброударних режими

Висновки. Планетарний віброзбудник доцільно розглядати як компактний механічний програматор траєкторії. Його ключові параметри R/r, ε/r і γ_0 визначають перехід між коловими, еліптичними, прямолінійними та гіпотрохоїдальними режимами. Здвоєний фазокерований кривошипно-шатунний віброзбудник є перспективним для машин із керованою траєкторією робочого органа. Основним параметром оперативного впливу є фазовий зсув γ, тоді як кути напрямних і ходи кривошипів задають орієнтацію та амплітудний баланс. Кулачковий віброзбудник забезпечує найпряміший перехід від заданої програми прискорення до геометрії механізму. Його раціонально застосовувати у режимах асиметричної або імпульсної дії, однак визначальними стають обмеження кривизни, контактної міцності та безвідривного руху штовхача.

Список використаних джерел

1. Den Hartog, J. P. (1985). *Mechanical vibrations*. Dover Publications.
2. Rao, S. S. (2021). *Mechanical vibrations* (6th ed.). Pearson.
3. Duan, C., Yuan, J., Pan, M., Huang, T., Jiang, H., Zhao, Y., Qiao, J., Wang, W., Yu, S., & Lu, J. (2021). Variable elliptical vibrating screen: Particles kinematics and industrial application. *International Journal of Mining Science and Technology*, *31*(6), 1013–1022. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.07.006.
4. Ogonowski, S., & Krauze, P. (2022). Trajectory control for vibrating screen with magnetorheological dampers. *Sensors*, *22*(11), 4225. https://doi.org/10.3390/s22114225.
5. Korendiy, V., Augousti, A., Lanets, O., Vilchynskyi, T., Kyrychuk, V., Yaniv, O., & Protasov, R. (2024). Novel concepts and designs of inertial vibration exciters for industrial vibratory equipment: A review. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*, *10*(4), 17–33. https://doi.org/10.23939/ujmems2024.04.017.
6. Korendiy, V., Parashchyn, O., Kachur, O., Lozynskyi, V., Hrevtsov, S., & Hembara, N. (2026). Trajectory-oriented synthesis of a planetary-type vibration exciter for vibratory technological equipment. *Vibroengineering Procedia*, *61*, 1–10. https://doi.org/10.21595/vp.2026.26348.
7. Korendiy, V., Gursky, V., Krot, P., & Kachur, O. (2023). Dynamic analysis of three-mass vibratory system with twin crank-slider excitation mechanism. *Vibrations in Physical Systems*, *34*(2), 2023226-1–2023226-9. https://doi.org/10.21008/j.0860-6897.2023.2.26
8. Korendiy, V., Kyrychuk, V., Svidrak, I., Kotsiumbas, O., Pelo, R., & Brytkovskyi, V. (2026). Acceleration-driven cam profile synthesis for a cam-type vibration exciter with an elastically coupled oscillating mass. *Vibroengineering Procedia*, *61*, 17–25. https://doi.org/10.21595/vp.2026.26147.
9. Flores, P., Leine, R., & Glocker, C. (2012). Application of the nonsmooth dynamics approach to model and analysis of the contact-impact events in cam-follower systems. *Nonlinear Dynamics*, *69*, 2117–2133. https://doi.org/10.1007/s11071-012-0413-3.

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОНОПЛЯНОГО УТЕПЛЮВАЧА

Цапко Юрій, професор, д.т.н., професор [1] (ORCID: 0000-0003-0625-0783),
Цапко Олексій, старш. досл., PhD, доцент [1] (ORCID: 0000-0003-2298-068x),
Бондаренко Ольга, доцент, к.т.н., доцент [1] (ORCID: 0000-0002-8164-6473),
Бердник Оксана, .доцент, к.т.н., доцент [1] (ORCID: 0000-0001-5321-3518),
Ющенко Аліна, студент [1] (ORCID: 0009-0002-0936-5789),
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. *В роботі досліджено процеси передавання тепла зразком утеплювача виготовленим з коноплі. Внаслідок унікальних властивостей наведеного матеріалу, таких як мала густина, низька теплопровідність, досить висока атмосферостійкість, висока хімічна стійкість, економічність тощо, вироби з конопляного утеплювача, не дивлячись на високий темп розвитку нових технологій, широко використовуються в будівництві. Встановлено механізми процесу теплоізоляції при передаванні енергії через матеріал, що дає можливість впливати на цей процес. Доведено, що вони полягають у зниженні пористості матеріалу та наявність повітря в структурі виробу. Так, зі зменшенням об'ємної маси матеріалу, теплопровідність зменшується, і навпаки. Досліджено процес передавання тепла при теплопереміщені, визначено залежності теплофізичних коефіцієнтів від температури. За отриманими залежностями розраховано коефіцієнти теплопровідності для стінки конопляного утеплювача, який сягає 0,0028 Вт/(м·К).*

Ключові слова: *конопляний утеплювач; густина; теплоізоляційні вироби; теплопровідність; теплофізичні властивості.*

Вступ. Вироби з органічних матеріалів, зокрема, конопляні волокна знаходять застосування у будівництві оскільки мають ряд унікальних властивостей, таких як мала об’ємна вага, низька теплопровідність, досить висока атмосферостійкість, має високу міцність та пружність [1-3].

Наведені вироби з рослинної сировини широко застосовують в малоповерховому будівництві. Конопляний утеплювач використовують в основному в конструкціях стін, перегородок, перекриттів і покрівель, у якості теплоізоляційних і звукоізоляційних матеріалів. Утеплювачі з конопель мають добрі теплоізоляційні властивості, що дозволяє знизити втрати тепла через стіни та дахи будівель. Вони зберігають тепло в холодний період і захищають від перегріву влітку. Конопляні волокна можуть вбирати та видавати вологу, регулюючи вологості в приміщенні. Це може допомогти підтримувати комфортну мікрокліматичну зону в будівлі. Конопляні волокна мають природні антибактеріальні властивості, що допомагають запобігати розвитку плісняви та грибка в будівлях [4-7].

Таким чином, застосування виробів з конопляного утеплювача для будівництва та облаштування приміщень, потребує встановлення тих чи інших властивостей, зокрема, теплофізичних характеристик, необхідних для проектування і виготовлення виробів. Це і обумовило необхідність проведення досліджень у даному напрямку.

Мета роботи. Метою роботи є встановлення теплофізичних характеристик будівельних виробів з конопляного утеплювача для визначення умов тепло ізолювання будівельної конструкції.

Матеріали і методи. Для з визначення термічної стійкості вогнезахищених зразків утеплювача використовували будівельний утеплювач KONSULATE® із костри конопель виробництва ТМ KONSULATE by Sumykamvol, розміром 320×140 мм, товщиною 32…35 мм, густиною 62…67 г/м^3 (рис. 1). Для вогнезахисту утеплювача на поверхню наносили вогнезахисний просочувальний засіб «ФАЄРВОЛ-АТТІК» (Україна) з витратою 300 г/м^2 та спучуюче покриття «ФАЄРВОЛ-ВУД» (Україна) з витратою 250 г/м^2.

Рис. 1. Утеплювач із коноплі

Виклад основного матеріалу. Результати досліджень з визначення температури та тривалості індукційного часу передавання тепла через зразок, виготовленого з конопляного утеплювача, виконували за методикою та на обладнанні, які наведені вище, а отримані результати наведено на рис. 4.

Як видно з рис. 2, при дії нагрівача на зразок стінки почалося інтенсивне передавання тепла та незначне підвищення температури на оберненій поверхні протягом близько 1800 с. У результаті проведених випробувань встановлено, що теплопровідність даного зразка характеризується сукупністю матеріалів, а саме процесу теплоізоляції при передаванні енергії через матеріал полягає в гальмуванні, яка утворена повітряними бар'єрами в утеплювачі, що дає можливість впливати на цей процес.

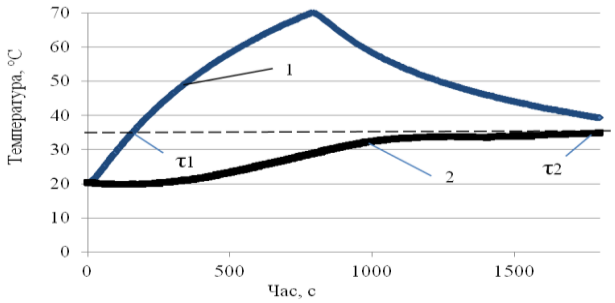


Рис. 2. Результати випробувань теплопровідності стінки, виготовленої з конопляного утеплювача: 1 – нагрівальна крива, 2 – значення температури на оберненій поверхні утеплювача. Точки τ_1 – відповідають середньому значенню температури нагрівальної кривої і τ_2 – відповідно середньому значенню температури на оберненій поверхні.

Виходячи з результатів виміряної температури, розраховані теплофізичні характеристики стінки з конопляного утеплювача (табл. 1).

Дослідження показали, що зразок конопляного утеплювача відповідають теплоізоляційного матеріалу (λ=0,07 Вт/(м·К) [2].

Таким чином, для облаштування приміщень, де до зовнішнього вигляду теплоізоляційних матеріалів пред'являються підвищені вимоги, є доцільним застосовувати конопляний утеплювач.

Теплопровідність через стінку споруди – це процес передачі енергії тепла від нагрітих частин приміщення до менш теплих, при цьому обмін енергією буде відбуватися поки температура не урівноважиться. Коефіцієнти теплопровідності будівельних матеріалів залежать від багатьох факторів: природи матеріалу, його структури, ступеня пористості, характеру пор, вологості і середньої температури, при якій відбувається передача тепла.

Крім того, теплоізоляційні будівельні матеріали й вироби повинні задовольняти наступним вимогам: вони повинні мати стабільні теплоізоляційні показники протягом усього періоду експлуатації та бути атмосферостійкими, не виділяти в навколишнє середовище шкідливих речовин. Це погоджується з відомими даними, які теж показують ефективність створення теплоізоляційних матеріалів з органічної сировини.

Таблиця 1

Теплофізичні характеристики конопляного утеплювача

Назва матеріалу	Товщина, мм	Маса, г	Розрахункові характеристики виробів з очерету				
			Густина ρ, кг/м^3	Теплова активність, Вт·с$^{1/2}$/(м^2·К)	Температуропровідність, м^2/с	Теплопровідність λ, Вт/(м·К)	Теплоємність, кДж/(кг·К)
Необроблений утеплювач	32	8,4	8,8	110,1	$0{,}08\cdot10^{-7}$	0,0028	39,79
Утеплювач просочений антипіренами	33	12,1	12,2	124,3	$0{,}1\cdot10^{-7}$	0,066	30,44
Утеплювач оброблений покриттям	33	10,6	10,7	11’1,2	$0{,}09\cdot10^{-7}$	0,0029	39,81

Обговорення. Отримані дані щодо впливу матеріалів та структури виробу на процес передавання тепла і зміни ізолювальних властивостей дозволяють стверджувати наступне:

– основним регулятором процесу є щільність і пористість матеріалу, оскільки не висока щільність і низька пористість призводить до швидкого урівноваження температур, а при підвищеній вологості і промоканні стін будівлі показник проходження їх буде вище;

– суттєвий вплив на процес теплопровідності при застосуванні конопляного утеплювача здійснюється у напрямку орієнтації природного матеріалу.

Висновки. За теплофізичними залежностями для стінки з конопляного утеплювача розраховано коефіцієнт теплопровідності, який сягає 0,0028 Вт/(м·К), при цьому температуропровідність складає $0{,}08\cdot10^{-7}$ м^2/с, а теплоємність – 39,79 кДж/(кг·К), що відносить їх до теплоізоляційних матеріалів. Вогнезахисне просочення у незначній мірі прискорює процес теплопровідності конопляного утеплювача, натомість, реактивне покриття, яке нанесене на поверхню конопляного утеплювача, зберігає теплопровідність на рівні необробленого зразка. Особливості гальмування процесу передавання тепла до матеріалу, що виготовлений з конопляного утеплювача, пов’язані з малою густиною та утворенням повітряних пор у структурі. Це пояснюється тим, що в повітряних порах відсутній рух повітря, що супроводжується гальмуванням перенесення тепла.

Список використаних джерел

1. Tsapko, Yu., Tsapko, A., & Bondarenko, O. (2019). Establishment of heat-exchange process regularities at inflammation of reed samples. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(10[97]), 36–42. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156644
2. Tsapko, Yu., Kyrycyok, V., Tsapko, A., Bondarenko, O., & Guzii, S. (2018). Increase of fire resistance of coating wood with adding mineral fillers. MATEC Web of Conferences, 230, Article 02034. https://doi.org/10.1051/matecconf/201823002034
3. Markert, F., Gonzalez, I., De La Parra Rogero, C., & Hosta, E. S. (2023). Protection of pre-treated wood and construction materials using intumescent coatings. Journal of Physics: Conference Series, 2654(1), Article 012084.
4. Li, Y., Zhao, J., Wang, Y., Kou, X., & Xue, J. (2022). Flame retardancy of pyrophyllite modified intumescent coating. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 41(1), 323–331.
5. Sarathiraja, M., Devanathan, S., & Kannan, M. (2020). Tuning parameters for flame-retardant coatings on wood and polymer. Materials Today: Proceedings, 24, 1138–1146.
6. Hu, L., Zhu, H., Wang, J., Tao, R., & Zhang, Z. (2024). Research and application of continuous and precise nitrogen injection fire extinguishing technology in coal mines. Minerals Engineering, 215, Article 108801. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108801
7. Ni, X., Zheng, Z., Li, G., & Wang, X. (2022). Evaluating the suppression effectiveness of hybrid nitrogen and water mist with a cup burner coflowing flame. Fire and Materials, 46(2), 388–396.

ФЛЕГМАТИЗУВАННЯ АЗОТОМ СУМІШЕЙ ПОВІТРЯ З ПРОДУКТАМИ ПІРОЛІЗУ ЦЕЛЮЛОЗОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ

Цапко Юрій, професор, д.т.н., професор [1] (ORCID: 0000-0003-0625-0783),
Цапко Олексій, старш. досл., PhD, доцент [1] (ORCID: 0000-0003-2298-068x),
Бондаренко Ольга, доцент, к.т.н., доцент [1] (ORCID: 0000-0002-8164-6473),
Бердник Оксана, .доцент, к.т.н., доцент [1] (ORCID: 0000-0001-5321-3518),
Ющенко Аліна, студент [1] (ORCID: 0009-0002-0936-5789),
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. *З метою підвищення надійності та стабільності конструкції дробарки був проведений аналіз віброізоляції та інерційних параметрів дробарки. В роботі проведені розрахунки коефіцієнту передачі та коефіцієнту ефективності. Виконані порівняльні розрахунки сталевих та гумових віброізоляторів. Побудовані графіки залежностей пружності верхньої пружини від резонансної амплітуди коливань. Визначено раціональні значення координат центру мас, відповідні моменти інерції та сумарні обертові моменти інерції. Встановлено значення амплітуд коливань центру мас системи по відповідним осям координат та кутові коливання навколо цих осей. Розраховані сумарні жорсткості системи по відповідним координатним осям. Встановлено параметр, який характеризує швидкість наростання збурювального зусилля по і-й координаті та співвідношення резонансних амплітуд до амплітуд коливання в робочому режимі.*

Ключові слова: *леткі продукти термічної деструкції; осередок пожежі; кількість азоту; концентраційні межі; флегматизування.*

Вступ. Одним із способів підвищення рівня пожежної безпеки є флегматизування газовими вогнегасними речовинами горючих газових середовищ, які можуть утворюватися у приміщеннях під час проведення технологічних процесів. Такі процеси характерні для хімічної, нафтохімічної промисловості, транспортування горючих газів і рідин, підприємств зберігання рослинної сировини. Наприклад, у складських приміщеннях є займання газоподібних продуктів термічної і термоокислювальної деструкції (водню, метану, оксиду вуглецю та ін.), які утворюються у процесі нагрівання целюлозовмісних матеріалів, таких як деревина та дерево-полімерні матеріали, папір, картон. Ефективним способом захисту таких об’єктів є флегматизування газового середовища шляхом введення достатньої кількості газової вогнегасної речовини (ГВР) – азоту, аргону, діоксиду вуглецю та їх сумішей. Розрахунок цієї кількості має базуватися на значенні мінімальної флегматизувальної концентрації ($С_{мф}$) ГВР для газових сумішей повітря з продуктами деструкції матеріалу, який зберігається на об’єкті [1].

Враховуючи, що термічну деструкцію целюлози (деревина, папір) супроводжує хімічне окиснення, що прискорюється значним підвищенням температури. В результаті цих процесів отримується складна суміш продуктів глибокого розкладу, причому характер одержуваних продуктів залежить від умов протікання процесу розкладання і від того, на якій стадії він припиняється. Загальна властивість целюлозних матеріалів виражається в їх здатності при розкладанні виділяти легкозаймисті гази та пари і залишати в звичайних умовах твердий залишок (вугілля) як кінцевий продукт піролізу.

Мета роботи. Метою роботи було встановити концентраційні межі області флегматизування в системі «суміш продуктів піролізу деревини – повітря – азот» і на підставі одержаних даних обґрунтувати найбільш прийнятні умови флегматизування горючих середовищ.

Матеріали і методи. Для одержання летких горючих газів термодеструкції целюлозовмісних матеріалів використовували зразки стружки прямошарової деревини сосни та пакувального паперу (рис. 1). Зразки деревини та паперу були висушені до вологості 8…10%.

Для визначення можливості використання азоту для ліквідації модельних осередків пожежі використовували газоподібний балонний азот. Для одержання газоподібних продуктів термічної

деструкції цих матеріалів застосовували спеціальне обладнання на базі трубчатої електричної печі з терморегулятором. Якісний і кількісний склад цих сумішей визначали газохроматографічним методом з використанням газового хроматографа ЛХМ-7А.

а

б

Рис. 1. Зразки матеріалів для термодеструкції: а – стружка деревини; б – пакувальний папір

Для визначення концентраційних меж поширення полум'я та закономірностей застосування азоту для ліквідації газового горючого середовища термодеструкції целюлозовмісних матеріалів проводили визначення концентраційних меж та мінімальної флегматизувальної концентрації азоту. Для досліджень використовували установку по визначенню мінімальної флегматизувальної концентрації газових вогнегасних речовин [2]. Необхідну концентрацію азоту виготовляли у блоці газоповітряної суміші та подавали до випробувальної камери.

Виклад основного матеріалу. Проведено термодеструкцію зразків паперу та деревини, зібрані леткі продукти термодеструкції і проведено їх газохроматографічний аналіз. Так, суміші продуктів термодеструкції паперу та деревини суттєво відрізняються за вмістом оксиду і діоксиду вуглецю (при цьому їх сумарна концентрація сягає 81,26 % у першому випадку і 91,01% у другому) і значно менше - за вмістом інших горючих компонентів (водню і вуглеводнів). Зокрема, співвідношення концентрацій діоксиду та оксиду вуглецю у цих сумішах становлять 1,3…1,4, а сумарні концентрації горючих компонентів – 60,46% і 59,67% відповідно. Отже, слід очікувати, що для флегматизування знадобиться значна кількість вогнегасної речовини. Таку кореляцію підтверджено результатами експериментального визначення мінімальних флегматизувальних концентрацій азоту для сумішей повітря з продуктами піролізу деревини та паперу (табл. 1).

Встановлено, що для надійного запобігання пожежам і вибухам, які пов'язані з термічною деструкцією органічних матеріалів внаслідок їх нагрівання, необхідно створювати досить високі концентрації вогнегасних речовин у прилеглому газовому середовищі, незважаючи на те що продукти піролізу містять понад 50% інертного розріджувача – діоксиду вуглецю та майже 5% азоту для паперу. З теоретичної точки зору вони дозволяють стверджувати про визначення механізму процесів вогнезахисту, що є певними перевагами даного дослідження. Зокрема, це передбачає наявність даних, достатніх для якісного проведення процесу горіння та виявлення на його основі моменту часу, з якого починається процес пригнічення, що є новим і не дослідженим. Таке виявлення дозволить дослідити перетворення горючого середовища у сторону флегматизування й інгібування полум'я та визначити ті змінні, що суттєво впливають на початок цього процесу.

Таблиця 1

Результати експериментального визначення концентраційних меж поширення полум'я та мінімальної флегматизувальної концентрації $C_{мф}$ (% об.)

Горюче середовище	Концентраційні межі поширення полум'я, % об.		Значення мінімальної флегматизувальної концентрації, % об.
	нижня	верхня	азот
Суміші повітря з продуктами піролізу соснової деревини	12,8	35,1	42,5
Суміші повітря з продуктами піролізу паперу	9,8	31,2	38,7

Обговорення. На відміну від результатів досліджень авторів робіт [3-7], отримані дані щодо впливу азоту для сумішей повітря з продуктами піролізу деревини та паперу дозволяють стверджувати наступне:

– основним регулятором процесу є не тільки формування летких продуктів горіння з виділенням негорючих газів. Зокрема, азоту, діоксиду вуглецю, які взаємодіють з полум'ям та гальмують процес окислення в газовій і конденсованій фазі;

– суттєвий вплив на процес флегматизування газоподібних продуктів термічної деструкції целюлозовмісних матеріалів при застосуванні азоту здійснюється у напрямку реакцій у передполуменевій області убік утворення негорючого середовища.

Такі результати можуть вважатися за доцільні з практичної точки зору, тому що дозволяють обґрунтовано підходити до визначення необхідної кількості азоту. У випадку застосування азоту його мінімальна флегматизувальна концентрація для сумішей повітря з продуктами піролізу паперу в 1,1 рази нижча, ніж для сумішей повітря з продуктами піролізу соснової деревини.

Висновки. Таким чином, експериментальними дослідженнями встановлено, що під час дослідження флегматизування горючого середовища азотом його мінімальна флегматизувальна концентрація для сумішей повітря з продуктами піролізу паперу в 1,1 рази нижча, ніж для сумішей повітря з продуктами піролізу соснової деревини. Як видно з результатів експериментального визначення концентраційних меж поширення полум'я та мінімальної флегматизувальної концентрації, для надійного запобігання пожежам і вибухам, які пов'язані з термічною деструкцією органічних матеріалів внаслідок їх нагрівання, необхідно створювати досить високі концентрації вогнегасних речовин у прилеглому газовому середовищі, незважаючи на те, що продукти піролізу містять понад 50% інертного розріджувача – діоксиду вуглецю та майже 5% азоту для паперу.

Список використаних джерел

1. Tsapko, Yu., Bondarenko, O., & Tsapko, A. (2019). Research of the efficiency of the fire fighting roof composition for cane. Materials Science Forum, 968, 61–67. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.61
2. International organization for standardization. (2000). Iso 14520-1:2000. Gaseous fire-extinguishing systems: physical properties and system design. Part 1: general requirements. Https://www.irdetect.ro/iso14520-1-2000.pdf
3. Li, X., Zhang, G., Zhu, G., Yuan, D., & Guo, D. (2022). Effect of blocking state on the fire-extinguishing efficiency of liquid nitrogen in a long and narrow space. Case Studies in Thermal Engineering, 29, Article 101720. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101720
4. Stylyk, I., Zhartovskyi, S., Boryso, A., & Dobrostan, O. (2025). Possibilities of using potassium carbonate and bicarbonate as inhibitors in the composition of aqueous fire-extinguishing substances. Materials Science Forum, 1165, 91–97.
5. Hu, L., Zhu, H., Wang, J., Tao, R., & Zhang, Z. (2024). Research and application of continuous and precise nitrogen injection fire extinguishing technology in coal mines. Minerals Engineering, 215, Article 108801. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108801
6. Ni, X., Zheng, Z., Li, G., & Wang, X. (2022). Evaluating the suppression effectiveness of hybrid nitrogen and water mist with a cup burner coflowing flame. Fire and Materials, 46(2), 388–396.
7. Xia, Y.-C., Zhang, B., Wang, B.-Q., Wang, R.-Q., & Girma, B. A. (2022). Experimental research on suppression mechanism of ultrafine water mist on deflagration of hydrogen-methane premixed gas. Journal of Dalian Maritime University, 48(4), 127–134.

ДВИГУНИ СТІРЛІНГА ТА РЕКУПЕРАЦІЯ ТЕПЛА В МОБІЛЬНИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОМПЛЕКСАХ

Ігор Косминський, доцент, к.т.н., доцент[1] ((ORCID: 0000-0003-0234-7166),
Андрій Довгаль , к.е.н.[2] (ORCID: 0000-0003-1300-0192),
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна
[2] ТОВ "ІРМА, , вулиця Басейна 5А, 01004, Україна

Анотація. *У роботі розглянуто підвищення енергоефективності мобільних комплексів для виробництва будівельних матеріалів за рахунок інтеграції модифікованого двигуна Стірлінга з системою рекуперації тепла. Запропоновано структурну схему єдиного енергомодуля альфа-конфігурації на робочому тілі — гелії під тиском 2,5–3,5 МПа, що утилізує тепло вихлопних газів сушильного барабана (180–250 °C) і вібраційного обладнання (80–120 °C). Ключовими конструктивними рішеннями є вакуумна герметизація (10^{-3} Па), теплообмінник-рекуператор з фазовим переходом (парафін + графеновий наповнювач) та PID-регулятор з нейронним прогнозуванням для стабілізації потужності при коливаннях температури ±40 °C. Виконано імітаційне моделювання в MATLAB/Simulink на основі параметрів сушильного барабана ДС-158. Встановлено, що система забезпечує генерацію 4,1–5,8 кВт, знижує питомі енергозатрати на 26–29 % та викиди CO_2 на 31–34 %. Розбіжність між результатами моделювання та теоретичними розрахунками не перевищує 6,8 %. Технологія є перспективною для об'єктів відновлення інфраструктури в умовах обмеженого доступу до електромереж.*

Ключові слова: *двигун Стірлінга; рекуперація тепла; мобільний будівельний комплекс; енергоощадні технології; вакуумна герметизація.*

Вступ. Відбудова інфраструктури України потребує перегляду енергетичного забезпечення будівельних майданчиків. Традиційні дизельні генератори мають ККД 25–35 % і значні викиди шкідливих речовин [2]. Водночас технологічні процеси виробництва бетонних та асфальтобетонних сумішей супроводжуються значними тепловими втратами: температура вихлопних газів сушильних барабанів досягає 180–250 °C, а поверхонь вібраційного обладнання — 80–120 °C [5]. Двигун Стірлінга, як машина зовнішнього підведення тепла здатен утилізувати ці ресурси, проте його застосування в мобільних комплексах стримувалося проблемами герметизації та нестабільністю теплового джерела [4]. Саме їх вирішення становить мету даної роботи.

Постановка задачі та конструктивна схема. На основі патенту на корисну модель авторів Мельниченка М.С. та Косминського І.В. [1], де запропоновано вдосконалення двигуна Стірлінга шляхом вакуумної герметизації (10^{-3} Па) та примусового рідинного охолодження, розроблено єдиний енергомодуль для інтеграції в мобільний комплекс.

Модуль включає: (1) модифікований двигун Стірлінга альфа-конфігурації, робоче тіло — гелій під тиском 2,5–3,5 МПа; (2) комбінований теплообмінник-рекуператор з фазовим переходом (парафін + графеновий наповнювач) для стабілізації температури гарячого контуру; (3) систему примусового охолодження холодного контуру технологічною водою бетонозмішувача (40–60 °C); (4) генератор на постійних магнітах з інвертором для мережі 380 В. Схема дозволяє паралельне підключення модуля до приводу сушильного барабана без зупинки виробничого процесу.

Рис.1. Структурна схема енергомодуля на базі двигуна Стірлінга

Математична модель. Динаміку теплового циклу описує система диференціальних рівнянь [6]:

$$dT_{\mathrm{h}}/dt \;=\; (1/C_{\mathrm{h}})(Q_{\mathrm{re}} - Q_{\mathrm{loss}} - P_{\mathrm{me}}) \quad (1)$$

$$Q_{\mathrm{re}} \;=\; \dot{m}_{\mathrm{p}} c_{\mathrm{p}} (T_{\mathrm{pas}} - T_{\mathrm{phase}}) \eta_{\mathrm{hx}} + \alpha A (T_{\mathrm{ai}} f - T\mathrm{c}_{\mathrm{ol}} d) \quad (2)$$

Для стабілізації потужності при коливаннях температури газів ±40 °C застосовано PID-регулятор з нейронним прогнозуванням [3]:

$$u(t) \;=\; K_{\mathrm{p}} \cdot e(t) \;+\; K_{\mathrm{i}} \int e(t)dt \;+\; K^{\mathrm{d}} \cdot de/dt \;+\; NN(\Delta T, \dot{m}) \quad (3)$$

де T_h — температура гарячого контуру двигуна, К; C_h — теплоємність робочого тіла гарячого контуру, Дж/К; Q_{rec} — теплова потужність від рекуператора, Вт; Q_{loss} — теплові втрати системи, Вт; P_{mech} — механічна потужність на валу двигуна, Вт; m_p — масова витрата відпрацьованих газів, кг/с; c_p — питома теплоємність газу при сталому тиску, Дж/(кг·К); T_{pas} — температура газів на вході до рекуператора, К; T_{phase} — температура фазового переходу теплоакумулятора, К; η_{hx} — ефективність теплообмінника (ηhx = 0,78–0,85); α — коефіцієнт тепловіддачі поверхні вібраційного обладнання, Вт/(м²·К); A — площа поверхні теплообміну вібраційного обладнання, м²; T_{air} — температура поверхні вібраційного обладнання, К; T_{cold} — температура холодного контуру, К; u(t) — керуючий сигнал PID-регулятора; e(t) = P_{set} − P(t) — похибка регулювання потужності; K_p, K_i, K^d — коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференційної складових; NN(ΔT, ṁ) — корекція нейронної мережі за відхиленням температури ΔT та витратою ṁ.

Результати моделювання. Імітаційне моделювання виконано в MATLAB/Simulink з використанням блоків Simscape [7] на основі параметрів сушильного барабана ДС-158. Результати наведено в таблиці 1 та на рис. 2.

Таблиця 1

Показники енергомодуля при різних режимах роботи (t = 3600 с)

Температура газів, °C	Потужність, кВт	ККД, %	Зниження енергозатрат, %	Зниження CO_2, %
180	4,1	34,2	26	31
210	5,0	36,8	27,5	32,5
240	5,8	39,0	29	34

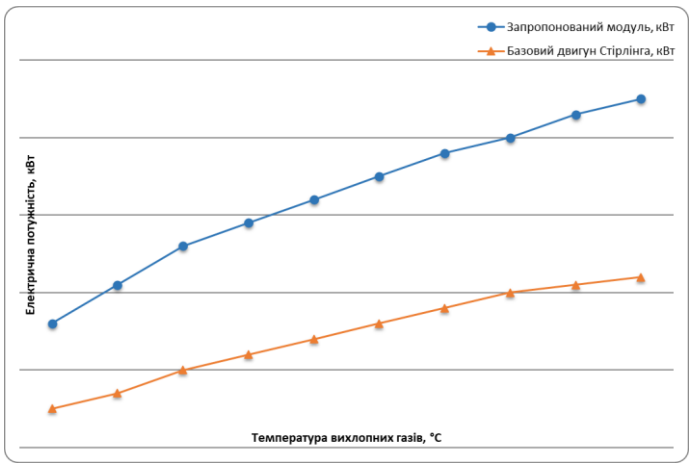


Рис. 2. Залежність електричної потужності від температури вихлопних газів

Розбіжність між результатами моделювання та теоретичними розрахунками не перевищує 6,8 %. Застосування теплообмінника з фазовим переходом підвищує ККД системи на 15–19 % порівняно зі стандартними дизельними генераторами. Вакуумна герметизація та примусове охолодження, захищені патентом [1], збільшують різницю температур контурів на 40–55 °C, що суттєво впливає на потужність.

Висновки. Запропонована інтеграція модифікованого двигуна Стірлінга в мобільний комплекс дозволяє генерувати 4,1–5,8 кВт з відпрацьованого тепла при переробці 1 т асфальтобетонної суміші, знижуючи питомі енергозатрати на 26–29 % і викиди CO_2 на 31–34 %. Технологія особливо перспективна для об'єктів відновлення інфраструктури в умовах обмеженого доступу до електромереж. Подальші дослідження спрямовуватимуться на фізичне прототипування та натурні випробування модуля.

Список використаних джерел

1. Melnychenko, M. S., & Kosmynskyi, I. V. (2017). Dvyhun Stirlinha z vakuumnoiu hermetyzatsiieiu ta systemoiu prymusovoho okholodzhennia [Stirling engine with vacuum sealing and forced cooling system] (Patent of Ukraine for utility model No. 112910). [in Ukrainian].
2. Kosmynskyi, I. V., & Melnychenko, M. S. (2014). Modyfikatsiia dvyhuna Stirlinha dlia pidvyshchennia efektyvnosti teploobminu [Modification of a Stirling engine to improve heat exchange efficiency]. Tekhnika budivnytstva, 33, 24–27. [in Ukrainian].
3. Kosmynskyi, I., Sankin, I., & Levchuk, K. (2023). Vybir Stirlinh-tekhnolohii yak shliakh do enerhozberezhennia [Selection of Stirling technology as a way to energy saving]. Tekhnika budivnytstva, 1(38), 34–38. https://doi.org/10.32347/tb.2023.1-38.0105 [in Ukrainian].
4. Durcansky, P., et al. (2020). Use of Stirling engine for waste heat recovery. Energies, 13(16), Article 4133. https://doi.org/10.3390/en13164133
5. Powell, R. A. (1983). Waste heat recovery in asphalt mixing plant (U.S. Patent No. 4375959A).
6. Urieli, I., & Berchowitz, D. M. (1984). Stirling cycle engine analysis (pp. 45–98). Adam Hilger.
7. MathWorks. Gamma Stirling engine (Simscape). Retrieved April 30, 2026, from https://www.mathworks.com/help/simscape/ug/gamma-stirling-engine.html
8. Nazarenko, I. I. (2023). Enerhooshchadni tekhnolohii v budivelnomu mashynobuduvanni [Energy-saving technologies in construction machine building] (pp. 116–118). KNUCA. [in Ukrainian].

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ БЕТОНУ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ: LCA-ПІДХІД

Марина Суханевич, доцент, д.т.н., доцент [1] (ORCID: 0000-0002-9644-2852),
Володимир Чахоян, аспірант[1],
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. *У статті досліджено енергоефективність технології 3D-друку бетону із застосуванням промислових відходів на основі методології аналізу життєвого циклу (LCA). Проведено порівняльну оцінку традиційного бетону та 3D-друкованого композиту, у якому 40 % цементу і заповнювачів заміщено золою-виносу, доменним шлаком та відходами руйнування бетону. Встановлено, що використання вторинної сировини забезпечує зниження вбудованої енергії на 30–45 %, скорочення викидів CO_2 на 35–45 % та зменшення споживання цементу на 30–40 %. Показано, що технологія 3D-друку додатково підвищує ресурсоефективність завдяки відмові від опалубки, оптимізації конструкцій і автоматизації процесів. Результати LCA підтверджують екологічну та енергетичну доцільність комплексного використання 3D-друку й промислових відходів як перспективного напряму декарбонізації будівельної галузі*

Ключові слова: *3D-друкований бетон; промислові відходи; аналіз життєвого циклу (LCA); декарбонізація; циркулярна економіка.*

Вступ. Будівельна галузь є одним із найбільших споживачів енергії та джерел викидів парникових газів. За сучасними оцінками, виробництво цементу формує до 7–8 % глобальних викидів CO_2. Основна частина енергоспоживання припадає на стадії видобутку сировини, випалу клінкеру та транспортування матеріалів [1].

Водночас накопичення промислових відходів — золи-виносу, доменних шлаків та відходів руйнування бетону (ВРБ) — створює значне екологічне навантаження. Використання цих матеріалів у будівництві дозволяє не лише вирішити проблему утилізації, але й суттєво знизити енергоємність виробництва. Технологія 3D-друку бетону додатково підсилює цей ефект завдяки оптимізації використання матеріалів і виключенню енерговитратних процесів [5, 6].

З позицій сучасного сталого будівництва ключовим критерієм оцінки матеріалів є не лише їхні механічні властивості, а й показники енергоємності та впливу на довкілля протягом усього життєвого циклу. У цьому контексті поєднання промислових відходів з технологією 3D-друку бетону дозволяє суттєво знизити вбудовану енергію та вуглецевий слід матеріалу.

Аналіз літературних джерел. Промислові відходи мають вже сформовану мінералогічну структуру і не потребують енергоємної термічної обробки, на відміну від портландцементу. Заміщення частини цементу золою-виносу або шлаком дозволяє знизити енерговитрати на 30–60 %, зменшити споживання викопного палива та скоротити виробничі викиди CO_2. Таким чином, кожна тонна заміщеного цементу еквівалентна значній економії енергії та скороченню вуглецевого сліду [8].

Вуглецевий слід будівельних матеріалів формується протягом усього життєвого циклу: видобуток сировини, виробництво, транспортування, експлуатація та утилізація [9]. Використання відходів позитивно впливає на кожну з цих стадій:

– зменшується потреба у видобутку природних ресурсів;
– скорочується кількість відходів на полігонах;
– знижуються транспортні витрати завдяки локальному використанню сировини.

У результаті загальний вуглецевий слід матеріалу може бути зменшений на 20–50 % . З позицій життєвого циклу використання промислових відходів забезпечує зниження вбудованої енергії матеріалу, скорочення глобального потенціалу потепління (ГПП) та підвищення ресурсоефективності. Особливо важливо, що ефект досягається не лише на стадії виробництва, але й на етапі кінця строку служби, оскільки матеріал повертається у цикл використання.

Технологія 3D-друку додатково знижує енергоспоживання за рахунок відмови від опалубки (що виключає витрати на її виробництво та утилізацію відходів), топологічної оптимізації конструкцій (зменшення маси матеріалу, створення пористих структур) та автоматизації процесів (скорочення трудовитрат і часу будівництва). У сукупності це дозволяє зменшити загальне енергоспоживання будівництва на 20–40 % [10]. Дослідження показали, що бетонні суміші з промисловими відходами мають достатню міцність (30–45 МПа), характеризуються покращеною мікроструктурою, забезпечують стабільність форми при 3D-друці та дозволяють знизити витрати цементу. Оптимальний рівень заміщення становить 30–40 %, що забезпечує баланс між механічними властивостями та енергоефективністю [7, 11].

Перспективним напрямом подальшого підвищення енергоефективності та екологічної привабливості 3D-друкованих бетонів є наномодифікація цементної матриці. Введення наночастинок SiO_2, TiO_2, вуглецевих нанотрубок (CNT) або наноглини дозволяє суттєво ущільнити мікроструктуру цементного каменю, заповнюючи пори між зернами в'яжучого та продуктами гідратації. Це забезпечує зниження водоцементного відношення при збереженні необхідної реологічної поведінки суміші для 3D-друку, а також підвищення ранньої міцності — одного з ключових параметрів придатності суміші до пошарового формування [12]. З позицій екологічності наномодифікація відкриває можливість подальшого скорочення вмісту цементу в сумішах для 3DCP без втрати міцнісних і реологічних характеристик. Зокрема, синергетичний ефект поєднання 10–15 % золи-виносу або шлаку з 1–3 % нано-SiO_2 дозволяє досягти рівня міцності еталонного складу при зменшенні питомого вмісту клінкеру на додаткові 10–15 %, що відповідає скороченню викидів CO_2 ще на 8–12 % порівняно із сумішами, модифікованими лише промисловими відходами [13]. Таким чином, наномодифікація цементної матриці є комплементарним інструментом до стратегії рециклінгу відходів і здатна вивести 3D-друковані бетони на якісно новий рівень декарбонізації будівельного виробництва.

Мета роботи. Виконати кількісну оцінку екологічного впливу матеріалу за методологією аналізу життєвого циклу (LCA) та порівняти показники енергоємності і вуглецевого сліду традиційного бетону і 3D-друкованого композиту з промисловими відходами.

Матеріали і методи. Матеріалом для аналізу є науково-технічна та довідкова література щодо вітчизняних і зарубіжних зразків традиційного та 3D-друкованого бетону з використанням промислових відходів. Основний метод дослідження — порівняльний LCA за стандартами ISO 14040 та ISO 14044, що включає кількісну оцінку вбудованої енергії та вуглецевого сліду за сценарієм «від видобутку до випуску».

Виклад основного матеріалу. Аналіз життєвого циклу (LCA) базується на порівнянні двох систем: традиційний бетон (100 % портландцемент, природні заповнювачі) та 3D-друкований композит із 40 % заміщенням цементу та заповнювачів промисловими відходами (зола-виносу, доменний шлак, бетон від руйнування споруд). Результати кількісної оцінки життєвого циклу матеріалів LCA наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння енергоємності та вуглецевого сліду бетонів

Показник	Традиційний бетон	3D-друк + відходи	Зниження
Вбудована енергія (МДж/м³)	3200–3600	1900–2400	↓ 30–45%
CO_2 (кг/м³)	300–350	180–220	↓ 35–45%
Вміст цементу (кг/м³)	350–400	200–250	↓ 30–40%
Водоцементне відношення	0.45–0.55	0.30–0.40	↓
Відходи виробництва (%)	10–15	<5	↓

Обговорення. Отримані результати демонструють, що основне зниження енерговитрат досягається за рахунок зменшення частки портландцементу, виробництво якого є найбільш енергоємним етапом (до 5 ГДж/т). Зола-виносу та доменний шлак, які вже пройшли термічну обробку в попередніх технологічних циклах, дозволяють уникнути повторного споживання енергії. Додатковий ефект забезпечується технологією 3D-друку, яка зменшує перевитрати матеріалу на 20–

30 %, виключає використання опалубки, скорочує транспортні витрати (локальне виробництво) та знижує трудовитрати і пов'язані енерговитрати. LCA-інтерпретація за стадіями: на стадії «від видобутку до випуску» досягається найбільше скорочення CO_2 — переважно за рахунок зниження частки цементу; на будівельній стадії — економія енергії через автоматизацію; на стадії кінця строку служби — повторна переробка матеріалу. Таким чином, використання відходів формує замкнений матеріальний цикл відповідно до принципів циркулярної економіки. Поєднання 3D-друку та вторинних ресурсів дозволяє знизити сумарний енергетичний слід будівництва на 30–50 % та скоротити викиди CO_2 до 45 %, що підтверджує доцільність впровадження технології як інструменту декарбонізації будівельної галузі.

Висновки. Використання промислових відходів є ефективним інструментом зниження енергоємності будівельних матеріалів: заміщення 40 % портландцементу вторинною сировиною знижує вбудовану енергію на 30–45 % та викиди CO_2 на 35–45 %. Технологія 3D-друку підсилює енергоефективність за рахунок відмови від опалубки, оптимізації конструкцій та автоматизації виробничих процесів — загальне енергоспоживання будівництва зменшується на 20–40 %. LCA-аналіз підтверджує екологічну доцільність комплексного застосування 3DCP і вторинних ресурсів на всіх стадіях життєвого циклу — від виробництва до утилізації. Комплексне впровадження запропонованого підходу скорочує сумарний енергетичний слід будівництва на 30–50 % і формує технологічну основу для декарбонізації будівельної галузі.

Список використаних джерел

1. Scrivener, K., John, V. M., & Gartner, E. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO_2 cement-based materials industry. Cement and Concrete Research, 114, 2–26.
2. Gursel, A. P., Masanet, E., Horvath, A., & Stadel, A. (2014). A life-cycle approach to environmental, energy, and cost assessment of concrete mixtures. Resources, Conservation and Recycling, 87, 126–140.
3. Flower, D. J. M., & Sanjayan, J. G. (2007). Green house gas emissions due to concrete manufacture. The International Journal of Life Cycle Assessment, 12(5), 282–288.
4. Turner, L. K., & Collins, F. G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO_2-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. Construction and Building Materials, 43, 125–130.
5. Panda, B., & Tan, M. J. (2018). Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing. Ceramics International, 44(9), 10258–10265.
6. Buswell, R., Leal de Silva, W., Jones, S., & Dirrenberger, J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. Cement and Concrete Research, 112, 37–49.
7. Wolfs, R., Bos, F., & Salet, T. (2018). Triaxial compression testing on early age concrete for numerical analysis of 3D concrete printing. Cement and Concrete Composites, 104, Article 103344.
8. Roussel, N. (2018). Rheological requirements for printable concretes. Cement and Concrete Research, 112, 76–85.
9. Sanjayan, J., Nematollahi, B., Xia, M., & Marchment, T. (2018). Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete. Construction and Building Materials, 172, 468–475.
10. Habert, G., & Roussel, N. (2009). Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives. Cement and Concrete Composites, 31(6), 397–402.
11. Van den Heede, P., & De Belie, N. (2012). Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and “green” concretes. Cement and Concrete Composites, 34(4), 431–442.
12. Sikora, P., Chougan, M., Cuevas, K., Liebscher, M., Mechtcherine, V., Ghaffar, S. H., & Stephan, D. (2022). The effects of nanosilica on the rheological properties and printability of 3D printing mortars. Construction and Building Materials, 332, 127384.
13. Chougan, M., Ghaffar, S. H., Jahanzat, M., & Albar, A. (2021). Effect of nano-additives on fresh, mechanical and microstructural properties of 3D printed geopolymer. Construction and Building Materials, 301, 124115.

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВЕРТИКАЛЬНИХ ВАЛКОВИХ МЛИНІВ У СУЧАСНІЙ ЦЕМЕНТНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

Микола Клименко, к.т.н., доцент [1] (ORCID: 0000-0002-6166-8966),
Тетяна Коса, к.пед.н. [2] (ORCID: 0009-0009-3462-9150),
Василь Марач, аспірант [1] (ORCID: 0009-0003-9457-6042),
Дмитро Олійник, студент [1],
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил, 31, м. Київ, Україна
[2] Відокремлений структурний підрозділ «Інститут інноваційної освіти КНУБА», вул. Освіти, 4, м. Київ, Україна

АНОТАЦІЯ. *Здійснено техніко-аналітичне дослідження конструктивних особливостей та експлуатаційних параметрів вертикальних валкових млинів, що застосовуються для тонкого подрібнення портландцементного клінкеру та гранульованого доменного шлаку. Проаналізовано геометричні варіанти виконання розмельних валків та конструкції помольних столів провідних машинобудівних компаній, встановлено їхній вплив на характер напружено-деформованого стану матеріалу в зоні дезінтеграції. Розглянуто еволюцію систем приводу, зокрема модульні схеми з розподіленим резервуванням потужності та механізми незалежного притискання роликів, спрямовані на підвищення питомої продуктивності та зниження енергоємності помелу. Систематизовано порівняльні дані щодо питомих енерговитрат та інтенсивності зношування робочих органів агрегатів LOESCHE, Gebr. Pfeiffer, FLSmidth, Ube Machinery та Thyssen Krupp Polysius. Встановлено визначальний вплив твердості й вологості сировини на вибір раціональної конфігурації млина. Обґрунтовано перспективність застосування полімер-металевих композиційних матеріалів для підвищення зносостійкості елементів помольного тракту в умовах циклічних ударно-динамічних навантажень.*

Ключові слова: *вертикальні валкові млини; гранульований доменний шлак; тонкий помел; енергоефективність; питома продуктивність; зносостійкість; помольний стіл; розмельні валки.*

Вступ. Вертикальні валкові млини є сьогодні базовим технологічним обладнанням енергоефективного подрібнення сировини в цементній, гірничодобувній та енергетичній галузях. Їхнє основне призначення полягає у високодисперсному подрібненні різноманітних мінеральних матеріалів, серед яких особливе місце посідає гранульований доменний шлак. Використання шлакопортландцементів, що вирізняються підвищеною міцністю та стійкістю до агресивних середовищ, є важливою передумовою довговічності залізобетонних конструкцій, тому впровадження вертикальних млинів у технологічні лінії цементних заводів фактично перетворилося на галузевий стандарт виробництва.

Зростання вимог будівельної індустрії до інтенсифікації виробництва безпосередньо стосується ефективності переробки вторинних металургійних продуктів. Одним із пріоритетних напрямів прикладних досліджень залишається вдосконалення конструктивних схем млинів з метою досягнення максимальної питомої продуктивності за мінімальної енергоємності процесу. Зниження енергоспоживання під час тонкого помелу є визначальним чинником зменшення собівартості готової продукції, а також кроком до декарбонізації виробництва за рахунок скорочення сукупного вуглецевого сліду підприємства. Постійне збільшення одиничної потужності розмельних агрегатів та ускладнення режимів їхньої роботи вимагають нових підходів до проєктування основних робочих органів – валків, помольних столів і сепараційних вузлів. Наукові пошуки в цій сфері зосереджені на оптимізації геометрії контактних поверхонь, удосконаленні приводних і трансмісійних систем та впровадженні засобів автоматизованого керування процесом подрібнення в реальному часі.

Водночас ресурс робочих елементів млинів істотно обмежений складними триботехнічними умовами експлуатації, що визначаються інтенсивним абразивним і ударно-динамічним зношуванням поверхонь контакту. Це зумовлює підвищені вимоги до фізико-механічних

властивостей конструкційних матеріалів та їхньої зносостійкості. Актуальним завданням машинобудування залишається застосування високолегованих сталей, спеціальних зносостійких сплавів та новітніх технологій нанесення захисних наплавних покриттів на робочі поверхні. Окремою науково-технічною проблемою є контроль вібраційних процесів під час дезінтеграції матеріалу, оскільки надлишкова вібрація знижує не лише довговічність обладнання, а й дестабілізує параметри технологічного потоку та якість готового продукту. Отже, пошук конструктивних рішень для демпфування динамічних навантажень і підвищення експлуатаційної стабільності агрегатів залишається актуальним завданням сучасної інженерії розмельного обладнання, що й визначає напрям цього дослідження.

Аналіз літературних джерел. Питанням підвищення ефективності вертикальних валкових млинів присвячено низку публікацій вітчизняних та закордонних авторів. Так, у роботі [1] представлено результати експериментального оцінювання термічної ефективності вертикального млина моделі LM 53.3+3, що експлуатується на заводі PT Semen Baturaja Tbk. Конструктивною особливістю установки є шестивалкова система з трьома основними та трьома допоміжними роликами; млин одночасно виконує подрібнення та термічну дегідратацію клінкеру з мінеральними добавками (вапняк, гіпс, пуцолан, зола-винесення), а теплообмін реалізується за рахунок відпрацьованих газів охолоджувача клінкеру та теплоти, що виділяється внаслідок тертя валків об матеріал.

Дослідження Y. Shigemoto зі співавторами [2] присвячене млину UBE UM43.6SR, розробленому спеціально для високопродуктивного помелу шлаку й цементу на потужних підприємствах. Ключовою інновацією тут є «подвійна система» (2-Way System), у якій допоміжні ролики виконують механічне ущільнення та деаерацію шару матеріалу на столі, що запобігає виникненню автоколивань під час виробництва надтонких порошків. Збільшення кількості валків до шести зі зменшенням їх одиничного розміру дало змогу зменшити габарити установки, підвищити продуктивність приблизно на 3 % і знизити питомі енерговитрати на 2 %, а масу млина й фундаменту скоротити на 20 %, що суттєво знижує капітальні витрати на будівництво.

Woywadt [3] розглядає модульну концепцію млина (Modular Mill) із розподіленою системою приводу потужністю до 12 000 кВт, що передбачає інтеграцію 4–6 незалежних валкових модулів із 2–6 ідентичними приводними агрегатами, кожен з яких оснащений автономною гідравлічною системою підтримання постійного зазору між валком і столом. Принцип структурної надлишковості дозволяє зберігати до 85 % номінальної продуктивності навіть у разі відмови одного модуля, істотно підвищуючи технічну готовність підприємства; альтернативна концепція Swing Mill орієнтована на підприємства малої й середньої потужності та дозволяє почергово перероблювати сировинну суміш і клінкер в одному агрегаті без механічного переналаштування, що мінімізує капітальні інвестиції на етапі будівництва заводу.

Роботи [4–7] присвячені технології монтажу розмельних валків безпосередньо на місці експлуатації для великогабаритних млинів моделі SLM5600, які є базовими для ліній виробництва клінкеру потужністю 6000 т на добу. Стандартна процедура обслуговування, що передбачає заміну підшипників, ущільнень та зносостійких втулок, зазвичай супроводжується тривалими простоями через транспортування вузлів на завод-виробник. Запропонована технологія передбачає попереднє нагрівання опори валка до температури 120–180 °C для забезпечення необхідних монтажних допусків та контрольоване затягування болтів кріплення для досягнення розрахункового зусилля притискання, що дає змогу повністю уникнути логістичних витрат і суттєво скоротити тривалість ремонту.

Наведений огляд літературних джерел свідчить, що, попри значну різноманітність конструктивних рішень вертикальних валкових млинів, представлених провідними світовими виробниками, питання комплексного порівняння геометричних параметрів робочих органів у прив'язці до фізико-механічних властивостей конкретного виду сировини – зокрема гранульованого доменного шлаку – досліджено ще недостатньо повно, що й зумовлює доцільність систематизації наявних технічних рішень у межах цієї роботи.

Мета роботи. Метою дослідження є аналіз конструктивних особливостей робочих органів вертикальних валкових млинів та обґрунтування технічних рішень щодо їх удосконалення для підвищення енергоефективності, продуктивності й зносостійкості під час подрібнення гранульованого доменного шлаку в умовах інтенсивних експлуатаційних навантажень.

Матеріали і методи. Матеріалами дослідження слугували технічна документація провідних виробників розмельного обладнання, науково-технічна та довідкова література з проєктування вертикальних млинів, а також чинні регламентні матеріали, що визначають технічні характеристики та умови експлуатації такого обладнання. Основними методами дослідження є аналіз і систематизація науково-технічної інформації, а також порівняльний метод оцінювання конструктивних рішень за сукупністю техніко-експлуатаційних критеріїв, зокрема питомого енергоспоживання, інтенсивності зношування та продуктивності агрегатів.

Принцип дії вертикального валкового млина ґрунтується на динамічній взаємодії системи розмельних валків із горизонтальним столом, що обертається за допомогою потужного редуктора. Вихідна сировина подається через завантажувальну тічку в центральну зону стола, а під дією відцентрових сил інерції рівномірно розподіляється від центру до периферії, формуючи стабільний шар матеріалу заданої товщини. Розташовані на важелях валки під дією гідравлічних циліндрів створюють значне притискне зусилля, необхідне для ефективного руйнування шару матеріалу; захист робочих поверхонь від інтенсивного абразивного зношування забезпечують змінні броньовані плити стола та бандажі валків, виготовлені зі спеціальних зносостійких сплавів. На відміну від кульових млинів ударної дії, у валкових агрегатах домінує поєднання механізмів стиснення та зсуву безпосередньо в шарі матеріалу, що сприяє інтенсивному утворенню мікротріщин у структурі зерен, забезпечуючи ефективнішу передачу механічної енергії об'єкту подрібнення, мінімізацію теплових втрат і підвищення загального коефіцієнта корисної дії установки.

Виклад основного матеріалу. Геометрична конфігурація валків суттєво впливає на характер напружено-деформованого стану матеріалу в зоні дезінтеграції. Циліндричні валки забезпечують рівномірний лінійний контакт зі столом і стабільний процес стиснення шару матеріалу, що характерно для стандартних конфігурацій млинів. Конічні валки ефективно компенсують тангенціальні напруження зсуву та оптимізують напрямок вивантаження подрібненого продукту в бік зони сепарації, а сферичні й тороїдальні – створюють варіативний контактний тиск по площі взаємодії, що зручно при одночасній переробці компонентів із суттєво відмінними фізико-механічними властивостями, зокрема твердого клінкеру та абразивного шлаку. Профільована поверхня валків суттєво покращує захоплення сировини, інтенсифікує її транспортування в зоні помелу та знижує ймовірність проковзування між робочими елементами, а знімні броньовані плити чи сегментні зносостійкі вставки помітно підвищують ремонтопридатність вузла.

Помольні столи так само відзначаються конструктивним розмаїттям: плоскі або низькопрофільні поверхні з радіальними канавками забезпечують рівномірний розподіл матеріалу під валками, круто нахилені столи використовують гравітаційну складову для пришвидшення виносу продукту на периферію та інтенсифікації сепарації, а тороїдальна форма концентрує контактний тиск у центральній зоні, забезпечуючи підвищену енергію руйнування, необхідну для диспергування особливо міцних часток. Матеріальною основою цих вузлів традиційно слугують високолеговані сталі з наплавленими зносостійкими шарами, що гарантує довговічність в умовах циклічних навантажень.

Порівняльний аналіз типових конструкцій провідних виробників (табл. 1) свідчить, що конічні валки краще пристосовані до коливань товщини шару матеріалу та забезпечують ефективніший розподіл навантаження, тоді як сферичні валки дають стабільнішу контактну пляму та менше зношування при обробці матеріалів з високим індексом розмелюваності за Бондом. Горизонтальні столи формують стабільніший і рівномірніший шар матеріалу, а похилі й тороїдальні профілі інтенсифікують процеси масообміну та пришвидшують евакуацію готової фракції з робочої зони. Усі провідні виробники застосовують гідравлічні або комбіновані механогідравлічні системи притискання, що забезпечують прецизійне керування тиском на шар матеріалу, причому окремі

рішення, зокрема розробки Gebr. Pfeiffer, передбачають незалежний привід кожного валка з можливістю індивідуального регулювання параметрів подрібнення.

Таблиця 1

Порівняльні конструктивні характеристики вертикальних валкових млинів провідних виробників

Виробник	Ролики	Помольний стіл	Притискання	Особливості конструкції
LOESCHE (Німеччина)	2+2 / 3+3, конічні або тороїдальні	Горизонтальний з канавками	Гідравлічна	Подвійний режим: основні + допоміжні ролики; діаметр стола до 5600 мм
Gebr. Pfeiffer (Німеччина)	4 або 6, циліндричні / сферичні	Похилений, з бронюванням	Механогідравлічна	Незалежний привід кожного ролика, активне регулювання навантаження; до 6000 мм
FLSmidth (Данія)	4 або 6, сферичні	Гладкий, горизонтальний	Гідравлічна	Висока енергоефективність, інтегрована сепарація; до 5600 мм
Ube Machinery (Японія)	4, циліндричні	Радіально рифлений	Гідравлічна	Комбінований привід стола, зміщений центр подачі; до 4800 мм
Thyssen Krupp Polysius (Німеччина)	4, конічні	Тороїдальна поверхня	Електрогідравлічна	Роздільне регулювання роликів, мінімізоване зношування; до 5000 мм

Порівняння експлуатаційних показників (табл. 2) демонструє, що агрегати FLSmidth OK та Gebr. Pfeiffer MVR мають найнижче питоме енергоспоживання завдяки оптимізованій аеродинамічній конфігурації та ефективним сепараторам останнього покоління, а млини Pfeiffer MVR – водночас і мінімальну інтенсивність зношування валків та сегментів стола, що зумовлено незалежним навантаженням кожного ролика, прецизійним регулюванням притискного зусилля та застосуванням твердих сегментних бронеплит. Млини Ube демонструють підвищений знос робочих органів через особливості геометрії валків і менш досконалу систему розподілу навантаження, тоді як Loesche (схеми «2+2»/«3+3» з допоміжними стабілізуючими роликами) та Polysius QUADROPOL забезпечують збалансоване поєднання енергоефективності та зносостійкості, що робить їх універсальним рішенням для переробки різнорідної мінеральної сировини.

Таблиця 2

Порівняльна ефективність та зношування робочих органів вертикальних валкових млинів

Показник	LOESCHE	Gebr. Pfeiffer	FLSmidth	UBE	Polysius
Питомі енерговитрати, помел клінкеру, кВт·год/т	22–26	21–25	20–24	24–27	23–26
Питомі енерговитрати, помел граншлаку, кВт·год/т	25–30	24–28	23–27	27–31	25–29
Знос роликів, помел клінкеру, г/т	6–9	4–7	5–8	7–10	6–9
Знос роликів, помел граншлаку, г/т	8–12	6–10	7–11	10–14	8–12
Ефективність сепарації	Висока	Дуже висока	Дуже висока	Середня	Висока
Придатність для шлаку високої вологості	Хороша	Відмінна	Відмінна	Середня	Хороша

Знос валків і стола лишається одним із визначальних чинників експлуатаційної надійності млинів, оскільки ці елементи працюють в умовах інтенсивного абразивного зношування, високих контактних навантажень та періодичних ударних впливів, що ускладнює забезпечення довговічності обладнання протягом тривалого періоду. Перспективним напрямом підвищення зносостійкості елементів помольного тракту є застосування полімер-металевих композиційних матеріалів, які демонструють кращі експлуатаційні характеристики порівняно з традиційними легованими сталями чи високоміцним чавуном: поєднання високої механічної міцності, ударної

в'язкості та низького коефіцієнта тертя дозволяє істотно знизити інтенсивність зношування функціональних поверхонь.

Узагальнення технічних характеристик сировини – твердості за шкалою Мооса, вологості, необхідної тонини помелу – дозволило сформувати практичні рекомендації щодо вибору млина залежно від типу матеріалу. Для портландцементного клінкеру (твердість 6–7, вологість 0,5–1,5 %) оптимальними є моделі FLSmidth OK, Gebr. Pfeiffer MVR або Loesche LM зі сферичними чи конічними валками й горизонтальним гладким столом, що забезпечують максимальну енергоефективність і стабільний шар матеріалу за мінімального зношування. Для гранульованого доменного шлаку (твердість 5–6, вологість 6–12 %, необхідна дисперсність до 6000 см²/г) доцільніші млини Gebr. Pfeiffer MVR або Loesche LM із конічними чи тороїдальними валками й тороїдальним чи похиленим столом, що забезпечують кращу циркуляцію матеріалу та стабілізацію шлакового шару. Для сировинних матеріалів цементного виробництва (вапняк, глина, мергель) з високою природною вологістю (8–15 %) рекомендовано млини Polysius QUADROPOL, Ube UM або Pfeiffer MPS, конструктивно адаптовані до можливості інтеграції процесу сушіння в цикл подрібнення за рахунок теплоти відхідних газів, тоді як тонина помелу таких матеріалів зазвичай регламентується залишком на ситі 90 мкм у межах 12–18 %, що є менш жорсткою вимогою порівняно з питомою поверхнею за Блейном для готового цементу.

Обговорення. Отримані результати підтверджують, що фундаментальна перевага вертикальних валкових млинів полягає в реалізації енергоощадного механізму подрібнення, заснованого на стисненні та зсуві безпосередньо в шарі матеріалу, що дає змогу суттєво зменшити енергетичні втрати порівняно з традиційними млинами ударної дії. Порівняльний аналіз демонструє пряму кореляцію між оптимізованим аеродинамічним компонуванням, інтелектуальними системами розподілу механічних навантажень, здатними здійснювати прецизійний контроль розмельного тиску в реальному часі, та найнижчими показниками питомого енергоспоживання й зношування робочих компонентів. Вибір раціональної конфігурації млина суттєво залежить від фізико-хімічних властивостей сировини: для вологого й порівняно м'якого шлаку доцільні спеціалізовані модифікації з конічними або тороїдальними валками та відповідним профілем стола, тоді як для твердого клінкеру пріоритетними є конструкції з максимальною енергоефективністю та стабільним шаром матеріалу.

Не менш важливим є питання експлуатаційної готовності обладнання: наведений у літературних джерелах досвід свідчить, що суттєва частка втрат продуктивності пов'язана не з конструктивними недоліками млинів, а з недосконалим плануванням технічного обслуговування та недостатньою кваліфікацією обслуговчого персоналу, що підкреслює необхідність комплексного підходу, який поєднує вдосконалення конструкції з розвитком служб експлуатації та впровадженням технологій ремонту вузлів безпосередньо на місці експлуатації. Застосування модульних архітектур приводу зі структурною надлишковістю, розглянутих у літературному огляді, додатково підвищує стійкість технологічного процесу до раптових відмов окремих вузлів, що є особливо цінним для підприємств із безперервним циклом виробництва. Викладене підтверджує, що безперервне вдосконалення конструктивних елементів помольного тракту, розвиток технологій ремонту на місці експлуатації та інтеграція систем автоматизованого керування залишаються визначальними чинниками підвищення ефективності виробництва та екологічної сталості будівельної й цементної галузей.

Висновки. За результатами проведеного техніко-аналітичного дослідження систематизовано конструктивні особливості робочих органів вертикальних валкових млинів провідних світових виробників та встановлено закономірності впливу геометрії розмельних валків і помольних столів на напружено-деформований стан матеріалу в зоні дезінтеграції. Показано, що застосування конічних і тороїдальних валків у поєднанні з відповідним профілем стола є раціональним рішенням для подрібнення гранульованого доменного шлаку підвищеної вологості, тоді як для твердого портландцементного клінкеру доцільніші сферичні або циліндричні валки з горизонтальним гладким столом. Систематизовано порівняльні дані щодо питомих енерговитрат та інтенсивності зношування робочих органів агрегатів провідних виробників, що дозволяє обґрунтовано підходити до вибору обладнання залежно від фізико-механічних властивостей сировини. Обґрунтовано

доцільність застосування незалежних систем притискання роликів та полімер-металевих композиційних матеріалів для підвищення зносостійкості й енергоефективності обладнання в умовах циклічних ударно-динамічних навантажень, що є актуальним напрямом для декарбонізації цементного виробництва та підвищення екологічної сталості будівельної галузі.

Список використаних джерел:

1. Pratiwi D, Safaruddin. Efisiensi Thermal Alat Vertical Cement Mill Pabrik II PT Semen Baturaja Tbk. Jurnal Terapan Internship & Multidisiplin JATIM. 2022. Vol. 1, No. 10.
2. Shigemoto Y., Kasai H., Hinauchi T. Development of 6-Roller UBE Vertical Mill for Slag. World Cement. Dec. 16, 2023.
3. Woywadt C. The latest innovative technology for vertical roller mills: Modular mill with modular drive system and swing mill solutions. 2014 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference, National Harbor, MD, USA, 2014. P. 1–6.
4. Hasan M., Palaniandy S., Hilden M., Powell M. Calculating breakage parameters of a batch vertical stirred mill. Minerals Engineering. 2017. Vol. 111. P. 229–237.
5. Schaefer H.V. Loesche vertical roller mills for the comminution of ores and minerals. Minerals Engineering. 2001. Vol. 14, No. 10. P. 1155–1160.
6. Altun D., Benzer H., Aydogan N., Gerold C. Operational parameters affecting the vertical roller mill performance. Minerals Engineering. 2017. Vol. 103–104. P. 67–71.
7. Zhang S., Zou D., Xu J., Li X., Zhai Y., Song B. Research on on-site installation process of grinding roller of SLM5600 vertical roller mill. International Journal of Materials Science and Technology Studies. 2024. Vol. 1, No. 1. P. 81–85.

СЕКЦІЯ 5
«ПРОБЛЕМИ ВИЩОЇ ОСВІТИ У ПІДГОТОВЦІ ФАХІВЦІВ У ВОЄННИЙ ТА ПОВОЄННИЙ ЧАС»

ТРАНСФОРМАЦІЯ МЕТОДИКИ ВИКЛАДАННЯ МАТЕМАТИКИ В УМОВАХ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ ПІД ЧАС ВІЙНИ

Іван Буценко, здобувач вищої освіти навчальної групи ІСТм-25 [1],
Ірина Безклубенко доцент, к.т.н., доцент [1] (ORCID: 0000-0002-9149-4178),
Олена Баліна доцент, к.т.н., доцент [1] (ORCID: 0000-0001-6925-0794),
Юрій Буценко, доцент, к.фіз.-мат.н., доцент [2] (ORCID: 0000-0003-4806-9587),
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна
[2] Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна.

АНОТАЦІЯ. *Розглянуто актуальні проблеми викладання математичних дисциплін у закладах вищої освіти в умовах дистанційного навчання та воєнного стану. Автори аналізують трансформацію традиційних цілей математичної освіти — формування логічного мислення («чиста математика») та створення бази для спеціальної підготовки («математика для споживача») — у контексті нових викликів. Особливу увагу приділено питанням дезорганізації навчального процесу через територіальне переміщення студентів, проблемам зв'язку та психологічним аспектам відсутності «колективного настрою». Запропоновано шляхи адаптації навчального контенту, зокрема перехід до лапідарних текстів, обов'язкове використання відеоматеріалів та впровадження індивідуальних графіків виконання завдань. Обґрунтовано необхідність пошуку нових форм контролю знань, які б нівелювали негативний вплив шкільних стереотипів та специфіки підготовки до ЗНО на якість університетської освіти.*

Ключові слова: *дистанційне навчання; вища математика; індивідуальний підхід; відеолекції; адаптація першокурсників; навчальний процес у воєнний час.*

Вступ. Сьогодні дистанційне навчання є не просто трендом, а нагальною потребою, викликаною війною. Хоча ДТВО визнані перспективним напрямом, їхнє поєднання з традиційною освітою створює нові виклики. Важливо розуміти, що впровадження «дистанційки» в умовах війни принципово різниться від формату часів пандемії, оскільки потребує кардинальних змін у менеджменті та законодавстві. Проте трудомісткі методичні здобутки університетів, накопичені за минулі роки, не втрачають своєї актуальності та активно використовуються в поточному процесі [1].

Аналіз літературних джерел. В джерелі [2] дані основні стратегіїї викладання курсу вищої математики в технічному університеті. Питання пов'язані з накопиченням балів студентів при вивченні курсу вищої математики досліджуються в роботі [3]. Роботи [4, 5] присвячені програмним засобам супроводження курсу вищої математики в технічному вузі. Спеціалізовані програмні пакети та їх роль у курсі вищої математики розглянуті в роботі [6, 7].

Мета роботи. Аналіз можливостей та розробка ключових принципів системного підходу до вирішення проблем ДТВО при викладанні математичних курсів в вищих навчальних закладах. Виявити завдання та здійснити вибір шляхів їх вирішення, на основі яких розробити основні принципи та запропоновати рекомендації, які дозволять підвищити ефективність навчального процесу, покращити якість дистанційного викладання та підвищать мотивацію студентів.

Виклад основного матеріалу. Історично викладання математики у вищому навчальному закладі базується на двох фундаментальних засадах. По-перше, формування логічного мислення та наукової суворості через вивчення «чистої математики» з її чіткою термінологією та доказовістю, що забезпечує зростання загальноосвітнього рівня студентів шляхом вивчення формалізованої

(чітко визначена термінологія, логічна еволюція, жорсткі вимоги до обґрунтованості тверджень) дисципліни. Відомо, що захоплені відгуки про математику видатних вчених та інженерів у великій мірі пов'язані саме з цією стороною математичних курсів – «чистою математикою».

По-друге, створення теоретичного підґрунтя для фахових дисциплін. Математика «для споживача» має бути максимально наближена до реальних професійних задач, тобто викладання математики повинно забезпечити належні підвалини для курсів власне спеціальної підготовки. Така математика «для споживача», зрозуміло, є життєво необхідною у структурі вищої освіти, особливо якщо вона максимально насичується відповідними прикладами та задачами професійно-орієнтованого характеру [8].

Відзначимо, по-перше, що як студенти, які мають навчатись дистанційно, так і їх викладачі не мають досвіду використання такої форми навчального процесу в умовах воєнного часу, пов'язаних з переміщенням великих мас людей не тільки територією України, але й далеко за її межами, побутовими проблемами учасників навчального процесу, часом неможливістю доступу до мережі Інтернет. Зрозуміло, що для студентів, «дистанційка» виглядає дуже привабливо з точки зору гнучкості розподілу їх часу. В принципі, гнучкість при розподілі часу мала б виглядати привабливо і для викладачів, якщо б цей розподіл не виявлявся результатом диктату студентів. Добре відома всім викладачам «аритмічність» подачі студентами заочної форми навчання їх домашніх робіт в повній мірі стосується і студентів - «дистанційників». Відсутність попереднього досвіду роботи в умовах масової міграції, побутових труднощів та нестабільного зв'язку вимагає перегляду ставлення до «дедлайнів». На наш погляд, тотальна відміна встановлюваних викладачами граничних строків виконання студентами планових робіт, штрафних санкцій за їх порушення, обліку відвідування занять тощо є досить небезпечною, оскільки призводить до дезорганізації навчального процесу. Хоча асинхронність зручна для студентів, вона часто веде до дезорганізації. Оптимальним рішенням вбачається індивідуальний підхід: розробка персональних графіків виконання робіт після опитування студентів, з урахуванням їхнього місця перебування та часових поясів.

Природним розвитком першого пункту є другий. Відсутність аудиторного «колективного настрою» негативно впливає на якість засвоєння матеріалу. Оскільки відеоконференції лише частково замінюють живе спілкування, доцільно створювати неформальні студентські «бригади». Робота в таких мікрогрупах (за кураторства викладача) сприяє обміну досвідом та підтримці морального духу.

По-третє, варто відзначити, що структура та обсяг матеріалів для дистанційного навчання часто залишаються заручниками традиційних викладацьких стереотипів. Замість надмірних списків літератури та переобтяжених збірників задач, характерних для очної форми, доцільно перейти до максимально лаконічного викладу теорії. Пріоритет слід віддавати посібникам із розв'язання задач, структурованим тестам та обов'язковому відеосупроводу. Оскільки для сучасного студента відеолекції є більш ефективним форматом, ніж опрацювання навіть найякісніших друкованих видань, критично важливим стає забезпечення відкритого доступу до записів усіх навчальних заходів».

Четвертий проблемний аспект стосується організації підсумкового контролю (заліків та іспитів) в умовах дистанційного навчання. Попри наявність перевірених методик активізації пізнавальної діяльності — таких як опитування, математичні диктанти, колоквіуми чи ведення опорних конспектів — їхня ефективність наразі суттєво знижується [9, 10]. Головною причиною є когнітивний розрив: першокурсники, сформовані системою підготовки до ЗНО, важко адаптуються до університетських стандартів. Шкільні стереотипи виявляються настільки стійкими, що традиційний адаптаційний період стає критично складним. Оскільки швидка трансформація шкільної освіти або зміна правил вступу є малоймовірними, постає нагальна потреба у розробці механізмів «м'якого переходу», які б дозволили студентам інтегруватися у вищу школу без зниження академічних вимог. Мабуть, для різних предметів (гуманітарних, фундаментальних та ін.) підходи мають бути різними. Авторам, звичайно, хотілося б мати максимально можливий особистий контакт із студентами, досвід ЗНО свідчить, що перевірка знань з математики тестового типу (навіть із включенням тестів відкритого типу та жорстким контролем при її проведенні) може розглядатись лише як первинна, вона є формою допуску до заліку чи екзамену, але ж не замінюючи їх.

Висновки. Традиційна система жорстких дедлайнів потребує суттєвого перегляду. Найбільш ефективним рішенням є впровадження індивідуальних графіків навчання, що враховують об'єктивні обставини (переміщення, різні часові пояси, відсутність стабільного зв'язку), проте з обов'язковим збереженням контрольних точок для запобігання дезорганізації. Слід відмовитися від перенасичення дистанційних курсів надмірними обсягами текстової літератури на користь лаконічних опорних конспектів та обов'язкового відеосупроводу (записи лекцій, консультацій та розв'язання задач), що є більш прийнятним для сучасного студента. Для подолання ефекту ізоляції та підвищення мотивації доцільно стимулювати створення неформальних студентських «бригад» (спільнот), які за підтримки викладача забезпечують обмін досвідом та підтримку належного морального клімату. Традиційні методи перевірки знань втрачають ефективність через розрив між шкільними звичками (орієнтація на ЗНО) та вимогами вищої школи. Тестові форми контролю мають розглядатися лише як етап допуску, тоді як основний акцент має залишатися на особистому контакті (навіть онлайн) для перевірки глибини розуміння теоретичного матеріалу.

Список використаних джерел

1. Balina, O. I., Bezklubenko, I. S., Butsenko, Yu. P., & Labzhynskyi, V. A. (2020). Klasternyi pidkhid do diahnostuvannia skladnykh system [Cluster approach to diagnostics of complex systems]. In Upravlinnia rozvytkom tekhnolohii. Informatsiini tekhnolohii rozvytku osvity: Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference (pp. 51–53). KNUCA. [in Ukrainian].
2. Bezklubenko, I. S., Balina, O. I., Hetun, H. V., & Butsenko, Yu. P. (2019). Vybir stratehii vykladannia kursu vyshchoi matematyky v tekhnichnomu VNZ [Choosing a strategy for teaching higher mathematics at a technical university]. In Modern Achievements of Science and Education: Proceedings of the XIV International Conference (pp. 86–88). https://iftomm.ho.ua/pages/mase-2019.php [in Ukrainian].
3. Balina, O., Bezklubenko, I., & Butsenko, Yu. (2024). Model nakopychennia reitynhovykh baliv studentiv pry vyvchenni kursu vyshchoi matematyky v tekhnichnomu universyteti [A model for accumulating students' rating points when studying higher mathematics at a technical university]. In Osvita, pravo ta publichne upravlinnia – novitni tendentsii rozvytku: Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference (pp. 36–40). https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/05/zbirnyk-elpa-ndt-3.pdf [in Ukrainian].
4. Bohdanov, O. V., Butsenko, Yu. P., Balina, O. I., & Bezklubenko, I. S. (2024). Prohramni zasoby suprovodzhennia kursu vyshchoi matematyky u tekhnichnomu universyteti: Chastyna 1. Osnovni pytannia [Software tools for supporting the higher mathematics course at a technical university: Part 1. Basic issues]. Mikrosystemy, elektronika ta akustyka, 29(2), Article 314217. https://elc.kpi.ua/article/view/328241 [in Ukrainian].
5. Bohdanov, O., Butsenko, Yu., Balina, O., & Bezklubenko, I. (2026). Software support for the higher mathematics course at the technical university. Part 3. GNU Octave D. Mikrosystemy, elektronika ta akustyka, 31, Article 359022. https://doi.org/10.20535/2523-4455.mea.359022
6. Bohdanov, O., Butsenko, Yu., Balina, O., & Bezklubenko, I. (2026). Software support for the higher mathematics course at the technical university. Part 3. GNU Octave D. https://elc.kpi.ua/article/download/359022/344778
7. Bezklubenko, I., Balina, O., & Serpinska, O. (2026). Tsyfrova kultura vykladacha vyshchoi matematyky: Novi vyklyky ta mozhlyvosti tekhnichnoho universytetu [Digital culture of a higher mathematics teacher: New challenges and opportunities of a technical university]. In Osvita, pravo ta publichne upravlinnia – novitni tendentsii rozvytku: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference (pp. 10–14). https://www.socosvita.kiev.ua/node/3328 [in Ukrainian].
8. Balina, O. I., Bezklubenko, I. S., Bohdanov, O. V., & Butsenko, Yu. P. (2025). Spetsializovani prohramni pakety ta yikh rol u kursi vyshchoi matematyky [Specialized software packages and their role in a higher mathematics course]. In Matematyka u suchasnomu tekhnichnomu universyteti: Proceedings of the X International Scientific and Practical Conference (pp. 164–168). https://ela.kpi.ua/handle/123456789/73583 [in Ukrainian].
9. Bezklubenko, I. S., Balina, O. I., Bohdanov, O. V., & Butsenko, Yu. P. (2025). Zabezpechennia hromadianskykh prav v Ukraini shliakhom vykorystannia dystantsiinoi formy osvity [Ensuring civil rights in Ukraine through the use of distance education]. In Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference (Vol. 2, pp. 312–313). https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025 [in Ukrainian].
10. Balina, O. I., Bezklubenko, I. S., Bohdanov, O. V., Butsenko, Yu. P., & Serpinska, O. I. (2025). Problemy fundamentalnoi pidhotovky studentiv inzhenernykh spetsialnostei v Ukraini na suchasnomu etapi [Problems of fundamental training of engineering students in Ukraine at the current stage]. In Modern Achievements of Science and Education: Proceedings of the XX International Scientific Conference (pp. 43–45). https://iftomm.ho.ua/pages/mase-2025.php [in Ukrainian].
11. Lubnina, A. A., Chikisheva, N. M., Simonova, L. M., Alenina, E. E., Khrustalev, B. B., Sadykova, R. Sh., & Kharisova, R. R. (2016). [Title not specified in the source list]. International Review of Management and Marketing, 6(52), 219–224.

НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПРАКТИЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ ІНЖЕНЕРНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

Олександр Дьяченко, доцент, к.т.н., доцент [1] (ORCID: 0000-0001-8199-2504),
Євген Міщук, доцент, к.т.н., доцент [1] (ORCID: 0000-0002-7850-0975),
Максим Балака, доцент, к.т.н., доцент [1] (ORCID: 0000-0003-4142-9703),
[1]Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. *Якість підготовки фахівців, що навчаються за спеціальностями галузі знань «Інженерія, виробництво та будівництво», залежить як від рівня теоретичних знань, а й від наявності широкого спектру практичних навичок і досвіду. Для досягнення необхідних цілей здобувачем, в освітніх програмах передбачено перелік фахових обов'язкових і вибіркових компонент. В нинішніх умовах складається так, що перелік таких компонент є недостатньою для отримання здобувачем необхідного об'єму знань і навичок. Пов'язано все це з широким переліком факторів в умовах воєнного стану, що знижують рівень практичної підготовки майбутнього фахівця. В роботі наведено напрямки, що дозволять підвищити якість практичної підготовки, одним з яких є широке застосування STEM підходу у освітньому процесі і широке залучення здобувачів до виконання кафедральних проектів у рамках гуртків, що дозволяє розширювати і поглиблювати теоретичні знання і практичні навичок здобувачів.*

Ключові слова: *прототипування; освітній процес; STEM-підхід; CAD-системи; інженерія.*

Вступ. Задля навчання майбутніх фахівців спеціальностей галузі знань G «Інженерія, виробництво та будівництво» з необхідним на ринку праці рівнем знань і навичок, освітні програми включають перелік основних дисциплін(компонент), а також вибіркових дисциплін, серед яких є дисципліни як загальної так і фахової(профільної) підготовки. Основні компоненти - визначені освітньою програмою і є обов'язковими до вивчення, а вибіркові – підлягають вибору здобувачем у рамках наявних запропонованих кафедрами в університеті[6].

З загального обсягу кредитів (240 кредитів для бакалаврської освітньої програми) для вибіркових освітніх компонент має припадати не менше ніж 1/4 загальної кількості кредитів ЄКТС, передбачених для даного рівня вищої освіти, а саме 60 кредитів відповідно до Закону України «Про вищу освіту» (п.15, ч. першої ст.62). На діяльності у рамках основних компонент лишається не більше 3/4 від загальної кількості кредитів ЄКТС, а саме 180 кредитів. Це скорочує залучення здобувачів у різні івенти в рамках профільних навчально-практичних і наукових проектах.

Крім того в Україні за умов воєнного стану освіта страждає чи не найбільше. Сигнали повітряних тривог, регулярні обстріли, обмеження постачання електроенергії, а також скорочення промисловості в Україні. Це призводить до проблем якісного ведення занять, відсутності живлення матеріально-технічної бази університету. Поруч із цим значно страждає практична підготовка здобувачів при проходженні практики на підприємствах.

Все це впливає на рівень якості набуття результатів навчання за освітньою програмою, а тому необхідно шукати способи розширення залученості здобувачів до проектів, що в свою чергу підвищить рівень їх фахової підготовки за обраною спеціальністю.

Аналіз літературних джерел. Спеціальності галузі «Інженерія, виробництво та будівництво» є технічними і творчими й пов'язані з винахідницькою діяльністю[1]. Це вимагає наявності у фахівця знань і навичок, що дозволять виконувати процес розробки пристроїв машин і механізмів від постановки мети і завершуючи досягненням кінцевого результату. Згідно теорії розв'язку винахідницьких задач для досягнення результату необхідним є виконання наступних кроків: формулювання завдання/проблеми, пошук протиріч, пошук ресурсів, складання списку ідей розв'язку задачі або вирішення проблеми, аналіз кожної з ідей для досягнення кінцевого результату[2]. В сучасних умовах основним умінням, що визначає перевагу фахівця – є здатність перебудовуватися і навчатися та змінювати зміст своєї діяльності відповідно зі зміною вимог ринку праці [3]. Це пов'язано з бурхливим розвитком науки і технології, а також потребі у реалізації стратегії сталого розвитку суспільства, що вимагає покращення рівня практичної підготовки[4].

Одними із найбільш актуальних технологій, що змінили підготовку спеціаліста є широке розповсюдження CAD-систем[5], без знань і навичок роботи у яких неможливо уявити сучасного фахівця. Навчання майбутнього інженера для роботи у CAD-системах вимагає розробки і актуалізації наявних освітніх методик, у тому числі з метою підвищення наочності та якості засвоєння, що вимагає широкого залучення адитивних технологій виробництва у освітній процес[6].

Мета роботи. Розглянути напрямки розширення і поглиблення теоретичних знань і практичних навичок здобувачів.

Для досягнення мети роботи сформульовані та вирішені наступні задачі:

- визначити ключові профільні освітні компоненти освітньої програми спеціальності G9 «Прикладна механіка»;

- оглянути результати навчання, визначені Стандартом вищої освіти для спеціальності G9 «Прикладна механіка», що впливають на формування у майбутнього фахівця високого рівня практичних навичок і теоретичних знань, необхідних на ринку праці;

- навести спосіб залучення здобувачів до виконання кафедральних проектів шляхом виконання різних видів діяльностей у рамках гуртків і визначити ключові тенденції до розширення даного підходу.

Виклад основного матеріалу.

Бакалаврська освітньо-професійна програма (ОПП) G9 «Прикладна механіка», що реалізовується у КНУБА, включає в себе ключові обов'язкові компоненти як загальної так і фахової(профільної) підготовки.

Дисципліни загальної підготовки необхідні для набуття здобувачами загальних компетенцій, визначених стандартом. Фахові дисципліни сприяють набуттю як фахових так і загальних компетенцій. До ключових фахових дисциплін відносять наступні: взаємозамінність, стандартизація і технічні вимірювання; деталі машин; основи конструювання у CAD-системах. Наведені дисципліни є пререквізитами для вивчення у подальшому основних освітніх компонент: системи комп'ютерного проектування; технологія машинобудування та верстатне обладнання автоматичного виробництва.

Дисципліни вільного вибору можуть не мати пререквізитів з числа дисциплін освітньої програми, а для їх вивчення достатньо шкільних знань або когнітивних навичок здобувача вищої освіти. Однак окремі з дисциплін вільного вибору вимагають обов'язкове успішне проходження інших дисциплін, а саме: проектування приводів машин; автоматизація технології обробки деталей у CAM-системах; проектування і конструювання робототехнічних систем.

Закріплення отриманих знань і розширення навичок відбувається з допомогою практик різних рівнів, які є обов'язковими компонентами ОПП – навчальної, виробничої або переддипломної.

Нижче наведені результати навчання, які набуває здобувач у процесі вивчення зазначених фахових компонент за спеціальності G9 «Прикладна механіка»:

- створювати і теоретично обґрунтовувати конструкції машин, механізмів та їх елементів на основі методів прикладної механіки, загальних принципів конструювання, теорії взаємозамінності, стандартних методик розрахунку деталей машин;

- знати і розуміти основи інформаційних технологій, програмування, практично використовувати прикладне програмне забезпечення для виконання інженерних розрахунків, обробки інформації та результатів експериментальних досліджень

- виконувати геометричне моделювання деталей, механізмів і конструкцій у вигляді просторових моделей і проекційних зображень та оформлювати результат у виді технічних і робочих креслень

- навички практичного використання комп'ютеризованих систем проектування (CAD), підготовки виробництва (CAM) та інженерних досліджень (CAE).

Для підвищення якості набуття результатів навчання при здобутті вищої освіти і кращого розуміння майбутньої предметної області пропонуються наступні напрямки рішень[6]:

- агітація вибору здобувачами фахових компонент, які пропонуються кафедрами для підсилення як майбутнього спеціаліста;

- забезпечення балансу вибору між вибірковими компонентами фахового і загального спрямування в вибірковому блоці;
- блочність і спадковість вибору вибіркових компонент;
- розширенням напрямків навчально-практичних та науково-практичних діяльностей

Перспективним напрямком вбачається широке залучення здобувачів до виконання навчально-практичних і науково-практичних діяльностей з впровадження STEM-підходу. Ключові засади підходу STEM до здобуття освіти: практична спрямованість; трансдисциплінарність (інтеграція); проєктна діяльність; дослідницька діяльність.

Перелік діяльностей і активностей, які можна реалізувати у освітньому процесі:

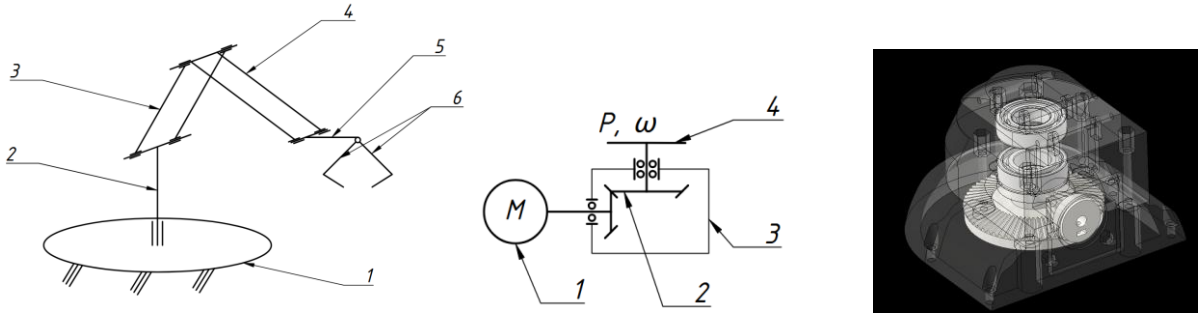
- хакатони і тренінги за участі викладачів і запрошених фахівців від працедавців і підприємств галузі інженерії, виробництва та будівництва;
- виїзні екскурсії-заняття на підприємства або участі у спеціалізованих промислових виставках;
- виконання навчально-практичних і наукових проектів в межах освітнього закладу;
- опрацювання та/або вирішення технічних проблем, що виникають на підприємствах;
- та інше.

Виконання навчально-практичних і наукових проектів є одним із найбільш доступних і якісних способів реалізації STEM підходу в межах освітнього закладу.

Обговорення. На кафедрі машин і обладнання технологічних процесів забезпечено діяльність гуртка «Комп'ютерне моделювання конструкцій машин і обладнання». Усе необхідне матеріально-технічне забезпечення наявне на базі загальних та спеціалізованих аудиторій і лабораторій, що є в університеті. Мета гуртка полягає у вивченні основ моделювання як окремих деталей так і цілих механізмів машин і обладнання технологічних процесів будіндустрії з використанням CAD-систем.

Для реалізації усіх засад STEM підходу здобувачі працюють в наступних напрямках і темах: призначення і розрахунок допусків і посадок з'єднань; встановлення точності форми і розташування поверхонь деталей; розрахунок і моделювання зубчастих зачеплень; використання стандартних виробів у конструкції; забезпечення принципів зручності складання і обслуговування механізму; забезпечення міцності, жорсткості і надійності механізмів; вивчення методики проведення вимірювання і використання вимірювальних засобів; використання адитивних технологій для виробництва деталей.

Для виконання роботи по наведених напрямках і темах у рамках гуртка розробляється п'ятиланковий робот маніпулятор(рис.1,а), що складається з наступних елементів: основи – 1, поворотної бази – 2, трьох ланок – 3, 4 і 5, а також механізму захоплення (гріппера) – 6. Кінематична схема приводу поворотної бази наведена на рис. 1, б. Модель основи і поворотної бази робота-маніпулятора представлена на рис. 1, в.



а) б) в)

Рис. 1. Кінематична схема конструкції п'ятиланкового робота маніпулятора(а), кінематична схема приводу(б) і конструкція поворотної бази робота маніпулятора (в)

По завершенню розробки конструкції і її моделювання, здобувачі вивчають CAM-системи для підготовки управляючої програми(УП) 3D принтера. Обов'язковим етапом є ознайомлення з обладнанням адитивного виробництва Студенти проходять цілий цикл активностей, у яких вони знайомляться з конструкціями 3D принтерів, їх налаштуваннями, підготовкою до друку і безпосередньо друком деталей(див. рис.2).

а) **б)**

Рис. 2. Виготовлення деталей маніпулятора з допомогою адитивних технологій: а – зубчастого конічного зачеплення; б – поворотної бази

У результаті збирання і тестування розроблених деталей і конструкцій здобувачами виявляються проблеми і недоліки розроблених конструкцій, визначається вплив налаштувань параметрів друку на якість і міцність деталей, розмірні параметри, тощо.

Висновки. У роботі оглянуто ключові результати навчання, які здобувач повинен набути у процесі навчання на освітній програмі спеціальності G9 «Прикладна механіка», визначено дисципліни, у яких безпосередньо відбувається набуття цих результатів навчання.

Напрямком підвищення якості практичної підготовки фахівців інженерних спеціальностей обрано є використання STEM підходу у освітньому процесі і широке залучення здобувачів до виконання кафедральних проектів у рамках гуртків, що дозволяє розширювати і поглиблювати теоретичні знання і практичні навичок здобувачів.

Список використаних джерел

1. Snitko, E. O., Drachuk, Y. Z., & Trushkina, N. V. (2014). Skladovi inzhenernoi osvity u vyshchomu navchalnomu zakladi [Components of engineering education in a higher educational institution]. In Forum hirnykiv-2014: Proceedings of the International Conference (pp. 255–260). https://dspace.luguniv.edu.ua/xmlui/handle/123456789/2321 [in Ukrainian].
2. Bilska, O. M., & Kost, S. P. (2020). Tekhnolohiia rozvytku tvorchoi osobystosti H. Altshullera [Technology of development of creative personality by G. Altshuller]. In N. Machynska (Ed.), Osvitnii almanakh (Issue 3, pp. 18–21). https://pedagogy.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/03/Osvitniy-al-manakh_-3_2020.pdf#page=18 [in Ukrainian].
3. Kobets, A. S., Demianenko, A. G., & Kagadiy, S. V. (2011). Suchasna vyshcha ahrarna inzhenerna osvita v Ukraini: Stan, problemy, deiaki kontseptsii ta zakhody pidvyshchennia yii yakosti [Modern higher agricultural engineering education in Ukraine: State, problems, some concepts and measures to improve its quality]. Theory and Methods of Electronic Learning, 2, 72–77. https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/1992 [in Ukrainian].
4. Karpash, M., Kryzhanivskyi, E., & Karpash, O. (2014). Vyshcha inzhenerna osvita v umovakh staloho rozvytku suspilstva [Higher engineering education in the context of sustainable development of society]. Higher Education of Ukraine, 2, 55–60. http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/vou_2014_2_10.pdf [in Ukrainian].
5. Rudyk, O. Y. (2020). Orhanizatsiia pryrodnycho-matematychnoi osvity z vykorystanniam CAD/CAE-system [Organization of natural science and mathematics education using CAD/CAE systems]. In Informatsiini tekhnolohii v metalurhii ta mashynobuduvanni: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference (pp. 239–242). https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/itmm/article/download/284/193 [in Ukrainian].
6. Diachenko, O., Balaka, M., & Kryvchenkov, P. (2026). Aktualni problemy formuvannia praktychnykh kompetentnostei zdobuvachiv inzhenernykh spetsialnostei u vyshchii osviti [Current problems of forming practical competencies of engineering students in higher education]. In Innovatsiini tekhnolohii pidhotovky kadriv dlia promyslovosti ta transportu: Proceedings of the International Conference (pp. 328–337). https://repositary.knuba.edu.ua/bitstreams/ff567cb4-a888-4acf-9211-ec72d1578db6/download [in Ukrainian].

СУЧАСНІ ЗДОБУТКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ НАУКОВОЇ ДІЯЛЬНОСТІ НА ФАКУЛЬТЕТІ МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТРАНСПОРТУ ВНТУ

Віктор Біліченко, ректор, д.т.н., професор [1] (ORCID: 0000-0002-9681-5292),
Леонід Поліщук зав. кафедри ГМ, д.т.н., професор [1] (ORCID: 0000-0002-5916-2413),
Сергій Сухоруков, декан ФМТ, к.т.н., доцент[1] (ORCID: 0000-0003-4201-1691),
[1] Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе 95, 21000, Україна

АНОТАЦІЯ. *У доповіді висвітлено сучасні наукові здобутки та перспективи розвитку наукової діяльності факультету машинобудування та транспорту Вінницького національного технічного університету. Розглянуто основні напрями досліджень кафедр факультету, зокрема створення вібраційних і гідроімпульсних машин, розроблення адаптивних гідроприводів і мехатронних систем, технологій зміцнення та відновлення деталей машин, удосконалення міських транспортних систем і транспортного моделювання. Значну увагу приділено науковим розробкам для потреб Збройних Сил України та медичної реабілітації військовослужбовців. Відображено участь науковців факультету у міжнародних проєктах програми «Горизонт Європа», спрямованих на розвиток зеленої енергетики та створення сучасних магнітних матеріалів. Показано, що наукова діяльність факультету поєднує фундаментальні та прикладні дослідження, орієнтовані на інноваційний розвиток промисловості, транспорту та відбудову економіки України*

Ключові слова: *машинобудування; транспортні системи; гідроприводи; мехатронні системи; наукові дослідження; зелена енергетика; інноваційні технології.*

Вступ. Факультет машинобудування та транспорту стояв у витоків створення ВНТУ, який нещодавно відзначив своє 66 річчя . На тепер до складу факультету входять 5 кафедр, які готують фахівців з 5-ти спеціальностей. Науковий потенціал факультету складають 11 докторів наук та 40 кандидатів наук, які працюють за 7-ма науковими напрямками досліджень.

Науковці ФМТ за свої науково-педагогічні здобутки щорічно нагороджуються міністерськими відзнаками, державними, обласними та міськими нагородами[1]. Звання Заслужений діяч науки та техніки України мають 3 співробітники факультету, Заслужений працівник освіти України – 1 співробітник, Відмінник освіти України – 5 співробітників. На факультеті видається науково-технічний фаховий журнал «Вісник машинобудування та транспорту» (категорія Б)[2].

З початку створення факультету і до сьогоднішніх днів свою наукову діяльність продовжують кафедри галузевого машинобудування та технології і автоматизації машинобудування.

Виклад основного матеріалу. На кафедрі галузевого машинобудування в межах зазначених наукових напрямків досліджень виконано десятки наукових проєктів щодо створення вібраційних та віброударних машин, переважна більшість яких впроваджені у виробництво, зокрема, інерційна машина для вібропресування заготовок в капсулах з гідроімпульсним приводом, інерційний вібропрес-молот, пристрій ударної дії для руйнування негабаритів, установка для віброударного фільтрування вологих дисперсних матеріалів, генератори імпульсів тиску для керування гідроімпульсними приводами.

Останнім часом, під керівництвом професора Обертюха Р.Р., отримав розвиток новий напрямок гідроімпульсного приводу щодо створення параметричних однокаскадних генераторів імпульсів тиску підвищеної пропускної здатності з фасковою герметизацією на першому та другому його ступенях і гідроімпульсних пристроїв на базі суміщення їх запірних ланок (елементів) з пружними елементами високої жорсткості типу прорізних і кільцевих пружин. Розроблено пристрої для віброточіння, для поверхневого деформаційного зміцнення деталей з плаваючим сідлом першого ступеня герметизації ГІТ, малогабаритний гідроімпульсний вібратор-гідроциліндр.

На кафедрі ГМ, під керівництвом професора Поліщук Л.К., успішно розвивається напрям щодо дослідження проблем, пов'язаних з динамікою керувальних привідних систем машин різного технологічного призначення та діагностикою металоконструкцій мобільних підіймально-

транспортних та інших технологічних машин. Розроблено низку конструкцій вмонтованого гідравлічного приводу конвеєра з пристроєм керування, оригінальні конструкції пристроїв керування роботою двох гідромоторів приводу, вмонтований привід конвеєра для видалення стружки, комплектний привід з кульково-хвильоворю передачею тощо[3].

Професором Савуляком В.І. розвинуто теорію оптимальних структур композиційних дисперсно зміцнених матеріалів та покриттів, розроблено фундаментальні критерії їх термодинамічної стабільності. Під його керівництвом творчим колективом кафедри розроблено новий напрям, що ґрунтується на використанні нановуглецевих матеріалів для нанесення градієнтних покриттів з метою відновлення та зміцнення деталей машин. Розвинуто технологію наплавлення високовуглецевих зносостійких покриттів, технологію навуглецьовування з використанням ефектів контактного плавлення.

Кафедра спрямовувала свої зусилля на допомогу ЗСУ. На Центрі «Зварювання» виготовлялися партіями польові печі впродовж кількох років на замовлення 59-Ї Вінницької бригади. Молодими науковцями кафедри разом зі студентами розроблений та виготовлений евакуаційний та легкий тактичний автомобілі, які відзначені на міжнародних виставках. Кафедра бере участь у науково-дослідній роботі «Розробка оптико-електронної системи тривимірної реконструкції в медицині катастроф для покращення медичної діагностики, лікування та реабілітації військовослужбовців», яка фінансується Національним фондом досліджень України. Поточного року на кафедрі проводиться робота по госпдоговірній діяльності на замовлення ЗСУ щодо розробки пристроїв спеціального призначення, крім того, проводиться спільна науково-дослідна робота з Військово-медичним клінічним центром Центрального регіону щодо удосконалення пристроїв при лікування вогнепальних політравм кінцівок.

На кафедрі технології та автоматизації машинобудування розвивається науковий напрямок щодо розробки та досліджень адаптивних гідроприводів з пропорційним керуванням мобільних та технологічних машин під керівництвом проф. Козлова Л. Г. та проф. Бурєннікова Ю. А.

За цим напрямком розроблено мехатронну систему для мобільних робочих машин на основі регульованих насосів, оригінальної пропорційної гідроапаратури та програмованих контролерів, що забезпечують адаптивні властивості гідросистемі. Розроблено стенд для випробовування та мехатронна гідросистема для екскаваторів 2 розмірної групи, що покращує їх статичні та динамічні характеристики. Для мобільних робочих машин на базі колісних тракторів розроблено конструкцію мультирежимного розподільника, конструкцію гідроагрегату, що суміщує функцію врівноважувального клапана та гідрозамка, а також конструкцію регулятора для насоса змінної продуктивності. На основі насоса з багаторежимним регулятором розроблена гідросистема автобетонозмішувача, що випускається Вінницьким державним машинобудівним заводом. Розроблено гідросистему приводів з електрогідравлічним керування на основі програмованого контролера. Гідросистема забезпечує роботу автоматизованої установки по виробництву заготовок цегли за високих якісних показників геометричної форми.

Фахівці кафедри автомобілів та транспортного менеджменту Вінницького національного технічного університету, під керівництвом професора Біліченка В.В., займаються розробкою проєктів організаційно-технічного розвитку систем пасажирських перевезень міст.

У 2008 році була розроблена концепція розвитку пасажирського автомобільного транспорту з метою оптимізації маршрутної мережі у м. Вінниця, яка впроваджена в 2012 році та успішно функціонує до тепер. Протягом усього періоду колектив кафедри проводить авторський супровід розроблених рекомендацій, аналізує реальну ситуацію на маршрутній мережі та за необхідності корегує запропоновані розробки.

Використовуючи отримані наукові наробки, фахівцями кафедри були розроблені проєкти організаційно-технічного розвитку систем пасажирських перевезень м. Могилів-Подільський (2008 рік), м. Кам’янець-Подільський (2014 рік) та м. Дніпро (2017 рік). На теперішній час виконується науково-дослідна робота: «Створення інтерактивної системи керування пасажирським транспортом міста Черкаси».Розроблені методики та програмне забезпечення для виконання цих робіт, на які отримано 7 свідоцтв про реєстрацію авторського права. В результаті викладачами кафедри АТМ розроблено інтерактивне середовище формування, аналізу та оптимізації мережі міських

пасажирських перевезень CityBusService. Для нього сформована програмна реалізація, структура середовища, статистична база транспортної мережі. База зупинок формується для всіх вулиць міста, по яких курсує міський пасажирський транспорт. Для кожної зупинки визначаються GPS-координати, які прив'язуються до парної або непарної сторони вулиці. В базі даних зберігається інформація про назву зупинки, координати та зв'язок з вулицею. База зупинок з їх GPS-координатами дає можливість сформувати GPS-карту всіх існуючих зупинок міста. Формування транспортних маршрутів має певні особливості, які полягають в необхідності збереження траєкторії руху транспорту між зупинками маршруту. Після цього алгоритм досліджень передбачає формування бази транспортних засобів, формування динамічної бази транспортної мережі, аналіз параметрів для кожного перегону (зупинки) маршрута, що виконувався для вибраного інтервалу часу. Заключним етапом є моделювання та оптимізація транспортної мережі.

Кафедра АТМ за цим напрямком виконала госпдговірних робіт на суму 5 млн. гривень.

Студенти кафедри вибороли призові місця на Всеукраїнській студентській конференції наукових досліджень «Automotive Visison» та Всеукраїнському творчому конкурсі студентських наукових робіт з галузі знань "Автомобільний транспорт" та «Транспортні технології».

Кафедра опору матеріалів, теоретичної механіки та інженерної графіки разом з кафедрою технології та автоматизації машинобудування під керівництвом професора Грушка О.В., починаючи з 2024 року, бере участь у спільному Дослідницько-інноваційному проєкті програми Горизонт-Європа «Реінженерія монокристаллічного Nd-Fe-B для створення постійних магнітів», який виконується консорціумом з структурних підрозділів з 15 країн Європи[4].

Цей проект спрямовано на вирішення проблем зеленої енергетики згідно з нещодавно оприлюдненим Промисловим планом Green Deal для епохи нульового споживання, який разом з Планом дій з циркулярної економіки встановлює рамки для трансформації промисловості в ЄС. Постійні магніти на основі рідкоземельних елементів, зокрема Nd-Fe-B, є життєво важливими для використання в електромобілях та вітрових турбінах, що робить їх ключовими для майбутнього зеленої енергетики Європи. Ці магніти мають одні з найкращих властивостей для відповідного застосування, але мають певні недоліки у циклах виробництва та переробки. Зокрема, існує значна залежність Європейського ринку від імпорту з Китаю.

Завданням ВНТУ в цьому спільному науковому проєкті є дослідження залишкових напружень та місфітних деформацій у певних композиціях полікристалічного Nd-Fe-B, для врахування впливу структурних і механічних аспектів систем на локальну магнітокристалічну анізотропію досліджуваного матеріалу. Очікувані результати: датасети результатів моделювання термічних, залишкових та місфітних деформацій полікристалічних магнітів Nd-Fe-B.

Обсяг фінансування: частка ВНТУ - 186 250 євро (загалом 8 000 000 євро).

Висновки. Таким чином, інноваційна наукова діяльність на факультеті машинобудування та транспорту ВНТУ охоплює одні з найбільш важливих напрямків відбудови промислових та цивільних об'єктів у воєнний та післявоєнний періоди і спрямована на подальший розвиток економіки України.

Список використаної літератури

1. Faculty of Mechanical Engineering and Transport, Vinnytsia National Technical University. (n.d.). Scientific activity. Retrieved July 2, 2026, from https://fmt.vntu.edu.ua/naukova-robota/naukova-robota
2. Vinnytsia National Technical University. (2026). Visnyk mashynobuduvannia ta transportu [Bulletin of Mechanical Engineering and Transport], 23(1) , from https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/951
3. Department of Industrial Mechanical Engineering, Vinnytsia National Technical University. (n.d.). Scientific activity of the department. Retrieved July 2, 2026, from https://gm.vntu.edu.ua/?page_id=13
4. Vinnytsia National Technical University. (2024, May 21). VNTU will participate in the Horizon Europe research and innovation project GREENE. Scientific Research Activity of VNTU, from https://science.vntu.edu.ua/2024/05/vntu-bratyme-uchast-v-doslidnytsko-innovatsijnomu-proyekti-programy-goryzont-yevropa-2/

РОЗРОБКА УНІВЕРСАЛЬНОГО ВИНАХІДНИЦЬКОГО ІНСТРУМЕНТАРІЮ В МЕЖАХ ДИСЦИПЛІНИ ПАТЕНТУВАННЯ ТА ЛІЦЕНЗУВАННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ МАГІСТРІВ ТЕХНІЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

Іван Назаренко, д.т.н., професор[1] (ORCID: 0000-0002-1888-3687),
Олег Дєдов, д.т.н., професор[1] (ORCID: 0000-0001-5006-772X),
Ігор Косминський, к.т.н., доцент[1] (ORCID: 0000-0003-0234-7166),
[1]Київський національний університет будівництва і архітектури, просп. Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. *У роботі розглянуто концептуальні засади модернізації освітньої дисципліни «Патентування і ліцензування наукової продукції» як обов'язкового компонента підготовки здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти. Обґрунтовано необхідність чіткого розмежування понять наукового результату, науково-технічної продукції та об'єкта права інтелектуальної власності. Запропоновано наскрізну методологію інженерно-винахідницької підготовки, що базується на синергії методів пошуку ідей, структурного й параметричного синтезу, а також принципів праксеології. Такий підхід дозволяє трансформувати класичну описову модель викладання у прикладний інструмент керованого проєктування патентоспроможних об'єктів для студентів технічних і архітектурно-будівельних спеціальностей.*

Ключові слова: *наукова продукція; патент; ліцензія; структурний синтез; винахід; праксеологія.*

Вступ. Сучасна вища освіта потребує постійного вдосконалення підготовки магістрів у контексті комерціалізації результатів науково-дослідницької діяльності. Інтелектуальна власність виникла як правова відповідь на економічну цінність нематеріальних результатів творчої праці. Під час вивчення профільних дисциплін важливо чітко розрізняти сам науковий результат, науково-технічну продукцію та безпосередньо об'єкт права інтелектуальної власності як юридичну форму охорони. Процес трансформації наукової ідеї в заявку на винахід вимагає глибокого викладення методології досліджень із застосуванням критеріїв ефективності, праксеології, а також структурного й параметричного синтезу. Головним аспектом формування навчальної дисципліни є розробка універсального інструментарію для студентів різних технічних напрямів, де винахідництво подається не як набір відокремлених теорій, а як єдиний послідовний інженерно-винахідницький процес.

Аналіз літературних джерел. Патентування технічних і технологічних результатів в Україні регулюється профільним законодавством і гармонізоване з міжнародними стандартами (Угодою ТРІПС та Угодою про асоціацію з ЄС), а експертизу забезпечує УКРНОІВІ. У сучасній літературі патентування та ліцензування найчастіше розглядаються крізь призму загального менеджменту [3, 4], науково-дослідних робіт [5] та інноваційних технологій навчання [6]. Значний внесок роблять праці з системного аналізу та структурного синтезу нових технічних рішень [7, 8]. Проте традиційний освітній процес здебільшого акцентується на правових аспектах захисту та оформленні заявок, залишаючи поза увагою першопричину виникнення об'єкта патентування – спрямований інженерний пошук. Спостерігається розрив між інструментами правової охорони та методологією створення патентоспроможних ідей, що зумовлює актуальність синергії методів пошуку ідей, синтезу та праксеології.

Мета роботи. Розробка та наукове обґрунтування концепції формування змісту дисципліни з патентування і ліцензування для магістрів на основі універсального інструментарію створення патентоспроможних технічних рішень.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

– обґрунтовано доцільність диференціації наукового результату, науково-технічної продукції та правової форми їх охорони;

– систематизовано методи пошуку нових винахідницьких ідей та правила опрацювання патентно-інформаційної бази;

– визначено роль структурного та параметричного синтезу у формуванні критеріїв новизни й

винахідницького рівня;

– адаптовано принципи праксеології та функціональних критеріїв до оцінки раціональності проєктних рішень;

– узагальнено класифікаційні ознаки ліцензійних договорів та сучасні форми комерціалізації (зокрема франчайзингу).

Виклад основного матеріалу. Формування змісту оновленої дисципліни спирається на глибоке розуміння відмінностей між фундаментальними і прикладними результатами. Якщо фундаментальні дослідження розширюють фундаментальні знання про закономірності й явища, то прикладні спрямовані на створення конкретної науково-технічної продукції.

1. Методи пошуку ідей та теорія винахідництва. На початковому етапі освітнього процесу майбутні магістри оволодівають методами генерування ідей, що базуються на системному аналізі минулого досвіду й прогнозуванні розвитку техніки. Ефективними інструментами тут є морфологічний аналіз, метод фокальних об'єктів, а також методи асоціацій і аналогій (зокрема біоніка, біоархітектура та антропоморфізація). Наприклад, принципи біоархітектури дозволяють запозичувати природні стільникові та монолітні структури для проєктування ефективних будівельних конструкцій чи просторових оболонок.

2. Патентно-інформаційні дослідження. Методична система передбачає глибоке вивчення структури патентної інформації (рис. 1), яка поділяється на первинні джерела (описи винаходів, корисних моделей, патентів) та вторинні джерела (реферати, огляди, анотації).

Рис.1. Патентна інформація

Наочне схематичне моделювання етапів патентного пошуку (рис.2) дозволяє здобувачам чітко засвоїти алгоритм визначення рівня техніки та виявлення патентних аналогів перед подачею заявки.

3. Структурний та параметричний синтез. Процес перетворення інженерної ідеї у патентоспроєкт реалізується через структурний і параметричний синтез. На етапі структурного синтезу здійснюється відсікання зайвих елементів, оптимізація взаємозв'язків між вузлами системи та формування ознак майбутнього об'єкта. Для фахівців у галузі архітектури та дизайну середовища це означає перехід від декоративності до функціональності (наприклад, створення багатофункціональних елементів на стику будівництва та енергетики). Параметричний синтез забезпечує кількісне обґрунтування оптимальних числових меж і характеристик технічного

рішення.

Рис.2. Патентна документація

4. Праксеологія та функціональні критерії. Оцінка доцільності та ефективності розроблених рішень здійснюється через призму праксеології. Ефективність розглядається як ступінь досягнення мети при мінімізації витрат і негативних ефектів. Окрім праксеологічних критеріїв, у навчальний курс інтегруються функціональні, технологічні, економічні та антропологічні критерії, адаптовані до специфіки конкретних освітніх програм.

В контексті патентування розглядається у працях з інноваційного менеджменту як інструмент оптимізації життєвого циклу наукової продукції. Існуючі підходи акцентують увагу на прагматичній цінності патенту – трансформації наукової ідеї у ліквідний ліцензійний актив. Проте методологія формування у магістрів системного розуміння «ефективної дії» від моменту задуму до ліцензійного договору залишається фрагментарною (рис.3).

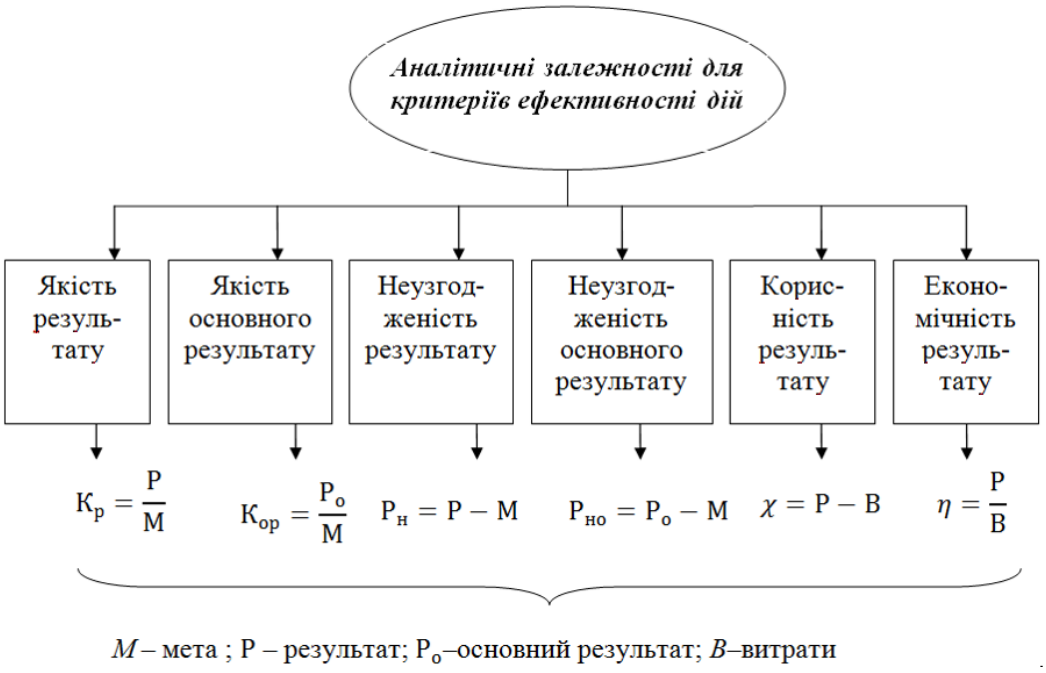


Рис.3. Аналітичні залежності критеріїв праксеології

5. Ліцензування та комерціалізація. Логічним завершенням винахідницького циклу є вивчення механізмів передачі прав на об'єкти інтелектуальної власності. У курсі детально розглядаються патентні та безпатентні ліцензії, виняткові, невиняткові, повні, перехресні й супровідні ліцензії. Окрему увагу приділено франчайзингу як сучасній формі ліцензування товарних знаків і технологій (виробничий, товарний та сервісний франчайзинг).

Обговорення. Запропонована наскрізна траєкторія винахідницької підготовки усуває розрив між теоретичним правом і практичним інженерним творчим процесом. Синергія методів пошуку ідей, патентного пошуку, якісного структурного моделювання новизни, параметричного доведення винахідницького рівня та праксеологічної оцінки ліквідності трансформує класичну дисципліну на дієвий методологічний інструмент створення конкурентоспроможного інтелектуального продукту.

Висновки.

1. Обґрунтовано необхідність відходу від вузькогалузевих описових підходів до викладання патентування на користь узагальнених системних критеріїв, придатних для підготовки магістрів різних технічних і архітектурно-будівельних спеціальностей.

2. Визначено роль універсальних методів пошуку ідей та системного патентно-інформаційного забезпечення як початкового етапу інженерної творчості.

3. Доведено, що застосування структурного і параметричного синтезу дозволяє безпосередньо формувати якісні ознаки та числові параметри майбутньої формули винаходу.

4. Використання критеріїв праксеології надає можливість комплексно оцінити раціональність спроєктованої технічної системи та її потенційну ліквідність у ринкових умовах.

Список використаних джерел:

1. Інтелектуальна власність: підручник за ред. О. Д. Святоцького, В. С. Дроб’язка. Київ : Ін Юре, 2023. 544 с.
2. Орлюк О. П. Право інтелектуальної власності: академічний курс : підручник. Київ : Ін Юре, 2021. 680 с.
3. Цибульов В. М., Чеботарьов В. П., Зінов З. А. Патентознавство та авторське право : навч. посіб. Київ : ІНКОС, 2020. 312 с.
4. Назаренко І. І., Кредісов А. І., Ракша В. О. Основи патентування і ліцензування. Київ : Знання України, 2006. 306 с.
5. Антонов В. М. Інноваційні технології навчання: евристичний та винахідницький підходи : навч. посіб. Київ : КНТЕУ, 2018. 232 с.
6. Системний аналіз складних систем управління / А. П. Ладанюк та ін. Київ : НУХТ, 2013. 274 с.
7. Назаренко І. І., Гарнець В. М., Свідерський А. Т. та ін. Системний аналіз технічних об’єктів : навч. посіб. / за заг. ред. І. І. Назаренка. Київ : КНУБА, 2009. 164 с.
8. Системне проектування та структурний синтез нових технічних рішень / уклад. А. П. Федоренко. Харків : ХПІ, 2022. 145 с.

СЕКЦІЯ 6
«ТЕОРЕТИКО-ПРАКТИЧНІ ТА КОГНІТИВНІ АСПЕКТИ РОЗВИТКУ ЕКОНОМІКИ І МЕНЕДЖМЕНТУ В БУДІВНИЦТВІ»

ЧЕТВЕРТА ПРОМИСЛОВА РЕВОЛЮЦІЯ В КОНТЕКСТІ РОЗВИТКУ ЕКОНОМІКИ В БУДІВНИЦТВІ

Юлія Чернявська, доцент, к.е.н., доцент [1] (ORCID: 0000-0003-1576-281X),
Галина Гаман доцент, к.е.н., доцент [1] (ORCID: 0000-0003-0224-4204),
Надія Лисиця доцент, к.е.н., доцент [1] (ORCID: 0000-0002-3353-8347),
[1]Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. У статті досліджуються тенденції четвертої промислової революції та концепції Індустрії 4.0 у контексті розвитку економіки в будівництві, зокрема через інтеграцію економіки, платформної та ексабайтової економіки. Показано, що цифровізація, залучення фахівців для моделі гіг-роботи, використання цифрових платформ між учасниками будівельного процесу та робота з великими даними (BIM-моделі, цифровий моніторинг, логістика, системи безпеки) дозволили підвищити гнучкість кадрової політики, ефективність управління проектами, прогнозування ризиків та контроль строків, витрат і якості. Виявлено, що зазначені моделі не замінюють одна одну, а доповнюють синергією економіки: гіг-для кадрів, платформна — для організації, ексабайтова — для даних і управління, що в цілому сприяє переходу до «розумних міст» і «розумних будинків» в умовах Індустрії 4.0.

Ключові слова: четверта промислова революція; Індустрія 4.0; гіг-економіка; платформна економіка; ексабайтова економіка; будівництво.

Вступ. Сучасний розвиток економіки нерозривно пов'язаний із цифровізацією, автоматизацією та трансформацією традиційних виробничих моделей, що виявляється в контексті четвертої промислової революції та концепції Індустрії 4.0. У будівництві цей процес набуває особливого значення оскільки галузь характеризується значним рівнем витрат, складною організацією процесів, високим рівнем ризиків і потребою у сталому розвитку. В останні роки все більше уваги в теоретичних та прикладних дослідженнях приділяється цифровим секторам, до яких належать гіг-економіка, платформна та ексабайтова економіка, які змінюють підходи до організації праці, управління проектами та використання інформаційних ресурсів у будівництві.

Аналіз літературних джерел показує, що четверта промислова революція в будівництві трактується як процес, спрямований на цифровізацію, платформні моделі й трансформацію ринку праці, який забезпечує гнучкість кадрових рішень та сталий розвиток у межах Індустрії 4.0 [1-5].

У цьому контексті актуалізується потреба в системному розгляді механізмів впровадження зазначених економічних моделей у практику будівництва, зокрема в умовах України, де відновлення та модернізація інфраструктури вимагають нових підходів до ефективного управління інвестиційними та ресурсними потоками.

Мета роботи полягає в теоретичному обґрунтуванні та практичному аналізі інтеграції гіг-, платформної та ексабайтової економік у будівельну галузь України в умовах Індустрії 4.0 для підвищення гнучкості, ефективності управління проєктами та синергії цифрових моделей на прикладі будівництва житлових комплексів.

Матеріали і методи дослідження. У процесі дослідження використано методи аналізу, синтезу, порівняння, узагальнення та систематизації наукових джерел, а також системний підхід та елементи моделювання для обґрунтування ролі гіг-, платформної та ексабайтової економіки в цифровій трансформації будівництва в умовах Індустрії 4.0. Основним матеріалом статті стали підручники, монографії та електронні джерела, що висвітлюють цифровізацію будівельного сектора, трансформацію ринку праці та принципи роботи платформних і екскабайтових моделей.

На підставі логіко-системного аналізу зібраних матеріалів було визначено механізми інтеграції зазначених моделей у практику будівництва та перспективи їх впровадження в умовах Індустрії 4.0.

Виклад основного матеріалу. Якщо розглядати історичний етап розвитку України, то ми наразі знаходимося і розвиваємося в багатьох галузях народного господарства, в тому числі і в будівництві в межах четвертої промислової революції, інформаційної економіки або епохи Індустрії 4.0.

Розглянемо три напрямки які охоплює ця економіка в будівництві:

1. Гіг-економіка у будівництві означає залучення окремих фахівців або бригад на конкретні роботи (проєктування, кошториси, технагляд, окремі етапи монтажу чи оздоблення). В даній галузі це може бути корисно для вузьких і нерегулярних робіт: креслення, кошториси, BIM-моделювання, фотофіксація, технічний нагляд, перегляд документації, маркетинг об'єкта або консультування вузьких спеціалістів. Такий підхід дає гнучкість у пікові періоди й допомагає не тримати в штаті рідкісні компетенції постійно [3,4].
2. Платформна економіка підходить для будівництва через цифрові платформи, які з'єднують замовників, підрядників, проєктантів, постачальників і контролерів якості [1].
3. Ексабайтова економіка у будівництві проявляється через роботу з великими даними, BIM-моделі, цифровий моніторинг, автоматизацію, логістику, кошториси і системи безпеки для прогнозування ризиків, контролю строків, витрат і якості, аналітику витрат і термінів, а також управління складними проєктами на основі цих даних. Наприклад, використання даних із датчиків, камер, дронів тощо [2].

Своє практичне застосування у будівництві дані цифрові платформи знаходять як в малих, середніх, так і в великих проєктах. Так, в невеликих проєктах гіг-модель допоможе швидко залучити потрібних спеціалістів без постійного штату. Платформна модель зручна для багатьох учасників будівельного процесу оскільки вона координує, спрощує комунікацію і контроль процесів. А для великих і складних об'єктів ексабайтова модель дозволить легко спрогнозувати ризики, логістику та точне планування на основі цифрових даних.

Варто зазначити, що в будівництві ці моделі не замінюють одна одну, а можуть працювати в симбіозі, посилюючи синергію: гіг-економіка – для кадрів, платформна – для організації, ексабайтова – для даних і управління.

Найкраще це видно в сучасних проєктах, де замовлення, виконавці, документи і технічні дані зведені в одну цифрову систему.

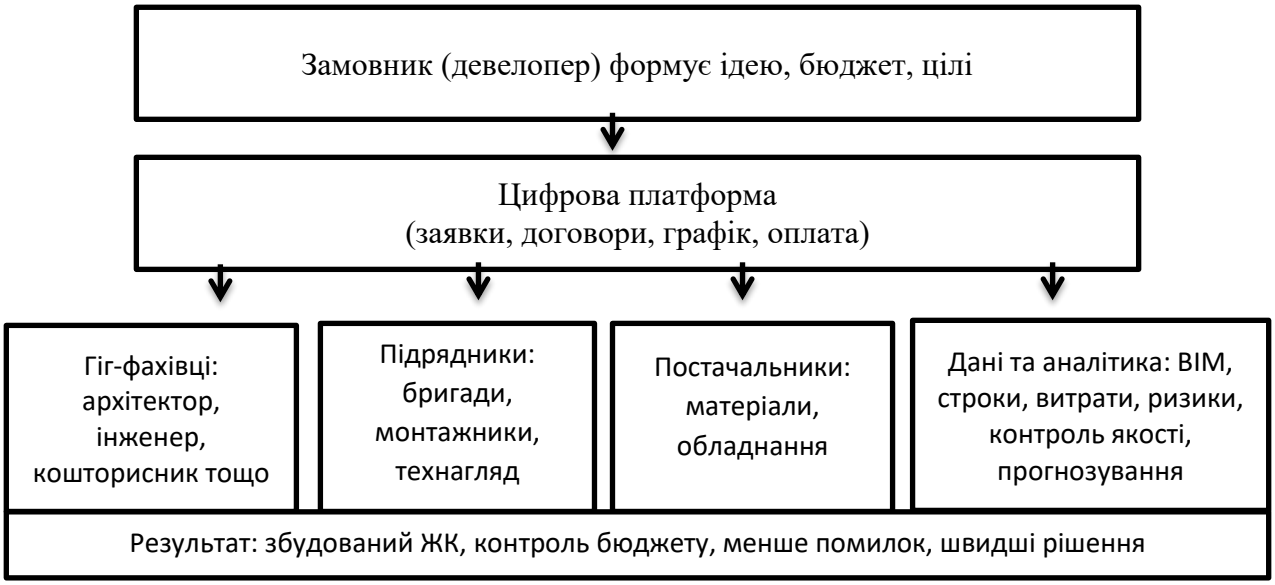


Рис.1. Архітектоніка цифрової трансформації будівництва в умовах Індустрії 4.0

Розглянемо принцип дії зазначених моделей на прикладі будівництва житлового комплексу. Замовник не тримає всіх вузьких фахівців у штаті, а залучає їх під конкретні етапи: архітектора на

проєкт, кошторисника на бюджет, технаглядача на контроль, окремих майстрів на монтаж чи оздоблення. Така гіг-економіка виправдана коли робота нерівномірна і потрібні різні спеціалісти в різний час. Платформна економіка дозволяє усім учасникам працювати через одну цифрову платформу: замовник виставляє завдання, підрядники подають заявки, постачальники додають матеріали, а менеджер бачить строки і оплату. Таким чином, платформа стає головним координатором будівництва. І завдячуючи ексабайтовій економіці проєкт може використовувати великі масиви даних: BIM-модель, графіки робіт, дані про поставки, витрати, погодні ризики, технічний контроль і енергоефективність. Такі дані допомагають точніше планувати, зменшувати помилки й краще керувати великим об'єктом.

Завдячуючи ексабайтовій економіці людство пізнало феномен «розумних міст» і «розумних будинків» з вбудованими сенсорами, автоматизованими системами освітлення, вентиляції, безпеки тощо, використання високошвідкісних мереж G5 і G6 IoT (інтернет-речей) у будівництві при роботі безпілотних машин, теле-керованих кранів, реал-тайм спостереження за виконанням проєкту, а також для збору і аналізу даних з багатьох точок на будмайданчику.

Висновки. Україна розвивається в межах Індустрії 4.0, тому будівництво все більше впроваджує цифрові технології, які вимагають змін організації праці та управління проектами. Гіг-економіка забезпечує кадрову гнучкість, не дозволяє замовникам залучати вузькопрофільні спеціалісти на окремі етапи й уникати нераціонального утримання постійного штату рідкісних компетенцій. Платформна економіка опирається на цифрові платформи, що об'єднують замовників, підрядників, проектантів, постачальників і контролерів якості, оптимізуючи комунікаційні та координаційні процеси. Ексабайтова економіка базується на роботі з великими даними, BIM-моделями, цифровим моніторингом, автоматизацією та системами безпеки, що дозволяє прогнозувати ризики та краще контролювати витрати, строки, якість і логістику. Ці три моделі доповнюють і підсилюють синергію: гіг-економіка працює з кадрами, платформна — з організаційними процесами, а ексабайтова — з даними та інтелектуальним управлінням. Саме їх комплексне впровадження в сучасних житлових та інших об'єктах, де всі учасники, документи та дані зведені в єдину цифрову систему, сприяє переходу до «розумних міст» і «розумних будинків» в умовах Індустрії 4.0.

Список використаних джерел:

1. Bystriakov, I. K., & Klynovyi, D. V. (2019). Platformna ekonomika prostorovykh biznes-ekosystem yak innovatsiinyi trend staloho rozvytku [Platform economy of spatial business ecosystems as an innovative trend of sustainable development]. *Science and Science of Science*, *3*(105). https://nasu-periodicals.org.ua/index.php/sofs/article/view/8915
2. Tatomyir, I. L., & Shulhyk, Yu. O. (Eds.). (2022). *Eksabaitova ekonomika: pidruchnyk* [Exabyte economy: a textbook]. Posvit.
3. Leta, A. V., Savka, K. M., & Bielova, M. V. (2025). Osoblyvosti trudovykh vidnosyn u gig economy: suchasni vyklyky ta perspektyvy [Features of labor relations in the gig economy: modern challenges and prospects]. *Analytico-Comparative Jurisprudence*, (1), 317–321.
4. Panchenko, V. H., Reznikova, N. V., Ivashchenko, O. A., & Rusak, D. M. (2024). Hih-ekonomika yak seredovyshche transformatsii mizhnarodnoho rynku pratsi [Gig economy as an environment for transformation of the international labor market]. *Investytsiyi: Praktyka Ta Dosvid*, (4), 12–18. https://doi.org/10.32702/2306-6814.2024.4.12
5. Simutina, Ya. V., & Shumylo, M. M. (Eds.). (2023). *Sotsialno-trudovi prava i vyklyky tsyfrovizatsii: monohrafiia* [Social and labor rights and challenges of digitalization: a monograph]. Nika-Tsentr.

АЛГОРИТМІЗАЦІЯ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БУДІВЕЛЬНОЇ ТЕХНІКИ НА БАЗІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Ігор Онофрійчук, аспірант кафедри економіки будівництва[1] (ORCID: 0000-0002-2363-4896),
Андрій Росинський, доцент, доктор філософії, доцент кафедри економіки будівництва[1] (ORCID: 0000-0003-4119-7463),
[1]Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних Сил, 31, 03037, м. Київ, Україна

АНОТАЦІЯ. *У роботі обґрунтовано об'єктивну необхідність інтеграції алгоритмічного інструментарію в системи підтримки прийняття управлінських рішень будівельних підприємств. Доведено, що на тлі переходу галузі до енергоощадних технологій та жорсткого регулювання ресурсного ціноутворення, застосування класичних детермінованих моделей фінансового планування втрачає свою релевантність. Запропоновано інноваційний організаційно-економічний підхід, що базується на апараті теорії нечітких множин, зокрема нечітких числах 2-го типу. Використання цього апарату дозволяє адекватно абсорбувати виробничу стохастичність та хеджувати ризики відхилень фактичних експлуатаційних витрат від кошторисних нормативів. Формалізовано предиктивний алгоритм, який виявляє асиметрію витратомісткості окремих видів енергоощадної техніки. Імплементація розроблених моделей створює наукове підґрунтя для оптимізації бюджетування та формування беззбиткових тендерних пропозицій.*

Ключові слова: *економіка будівництва; енергоменеджмент; виробнича стохастичність; нечіткі множини; загальновиробничі витрати; ціноутворення; предиктивний аналіз; ризик-менеджмент.*

Вступ. Динаміка сучасного поступу будівельного сектору детермінується магістральним макроекономічним вектором на впровадження енергоощадних засобів механізації. Даний тренд обумовлений не стільки екологічним порядком денним, скільки жорстким тиском фінансових чинників. У подібних реаліях для вітчизняних підрядних організацій менеджмент енергоефективності остаточно виходить за межі суто репутаційних декларацій. Він трансформується у фундаментальний важіль забезпечення фінансової стійкості та стає безальтернативним контуром контролю за операційними видатками в умовах агресивної ринкової конкуренції.

Особливої гостроти ця проблематика набуває в контексті масштабної післявоєнної відбудови цивільної та промислової інфраструктури України. Оскільки левова частка фінансування таких будівельних проєктів здійснюється за рахунок державних коштів або грантів міжнародних фінансових інституцій, вона підлягає суворому контролю із застосуванням ресурсного методу ціноутворення. Відповідно, будь-яке економічне обґрунтування застосування енергоощадної техніки вимагає фундаментальної аналітики чинних кошторисних нормативів та жорсткого дотримання лімітів витрачання ресурсів.

Найбільш ресурсоємною ланкою на будівельному майданчику є механізоване вертикальне переміщення вантажів. Підйомні крани генерують найвагоміший відсоток енергоспоживання об'єкта будівництва і, таким чином, формують значну частку прямих і накладних витрат у собівартості будівельно-монтажних робіт. Техніко-економічне обґрунтування вибору альтернативних типів засобів механізації – наприклад, баштових електрокранів чи дизельних гусеничних аналогів – відбувається у площині виробничої стохастичності. Тому детерміновані моделі планування втрачають свою прогностичну здатність через високу волатильність цін на енергоносії, зокрема комерційних тарифів на електроенергію, та кадровий дефіцит. Описана кон'юнктура ринку обґрунтовує необхідність формування адаптивного інструментарію управління вартістю експлуатації будівельних машин, здатного адекватно враховувати фактори ризику під час реалізації будівельних проєктів.

Аналіз літературних джерел. Економічні аспекти впровадження енергоощадних технологій у будівництві достатньо широко висвітлені у фаховій науковій літературі. Проте більшість дослідників традиційно фокусується на макроекономічній ефективності проєктів та інвестиційній

привабливості «зеленого» будівництва для кінцевого споживача [1]. Зокрема у праці [2] ґрунтовно досліджуються організаційні засади управління життєвим циклом об'єктів нерухомості.

Водночас у попередніх дослідженнях авторів [3, 4] було доведено визначальну роль оперативного контролю енергоспоживання як безпосереднього каталізатора розвитку економічного потенціалу девелоперської компанії. Попри це, прикладні механізми мікроекономічного контролю витрат під час щоденної експлуатації важкої будівельної техніки залишаються недослідженими. Наявний розрив між теоретичними концепціями «зеленого» будівництва та суворою практикою формування грошових потоків підрядної організації потребує вирішення із залученням інноваційного математичного апарату «м'яких обчислень», що дозволить формалізувати нечітку економічну інформацію.

Мета роботи. Розроблення організаційно-економічного алгоритму предиктивного оцінювання енергоефективності експлуатації будівельних машин із застосуванням математичного апарату теорії нечітких множин для оптимізації системи загальновиробничих витрат та підвищення рентабельності будівельного підприємства.

Виклад основного матеріалу. Економічна природа енергоефективності у будівельному виробництві характеризується вираженим дуальним характером. З інженерно-технічного боку, сучасні енергоощадні машини проєктуються для максимальної мінімізації фізичного споживання ресурсів на одиницю роботи (зниження витрат кіловат-годин або літрів палива). Однак з позиції економіки підрядного підприємства, релевантні індикатори фінансової ефективності категорично не можуть обмежуватися лише прямою матеріальною складовою.

Згідно з чинною Настановою з визначення вартості будівництва [5], економічна модель експлуатації машин є значно ширшою. Кожна відпрацьована машино-година підйомної техніки безальтернативно генерує залучення значних супутніх загальновиробничих витрат (ЗВВ). Особливу увагу тут привертає III блок ЗВВ, що формується підрядником для організації будівельного виробництва. Ці накладні витрати розраховуються як показник, пропорційний до нормативно-розрахункової трудомісткості [5, 6], і включають широкий спектр фінансових зобов'язань.

У цьому контексті нами ідентифіковано нетипову диспропорцію витратомісткості у будівництві. Імплементація складної, теоретично більш економної машини (наприклад, потужного козлового або баштового електрокрана) здатна призвести до такого стрімкого зростання зарплато-місткості процесів обслуговування (через потребу у залученні висококваліфікованих наладчиків електроніки, сертифікованих електриків вищих розрядів та фахівців з охорони праці та техніки безпеки), що загальна економічна ефективність процесу деградує. Уся фінансова економія, отримана за статтею «Матеріальні ресурси» (енергоносії), повністю нівелюється та перекривається мультиплікативним зростанням витрат за статтею «Оплата праці» та відповідним штучним масштабуванням загальновиробничих витрат.

Для математичного опису та прогнозування цього складного економічного зв'язку пропонується застосовувати нелінійну двофакторну мультиплікативну економетричну модель. Вона дозволяє економістам знаходити точку рівноваги між цільовою вантажопідйомністю крана та сукупними грошовими витратами підприємства на енергоресурси й організацію праці. Проте з огляду на турбулентність та стохастичність сучасного економічного середовища, використання жорстких точкових оцінок, отриманих класичними методами математичної статистики, є нерепрезентативним.

Відхилення від планової калькуляції виникають на об'єкті щоденно: через вимушені простої техніки під час повітряних тривог або відключень мережі, через динамічну зміну тарифних розрядів робітників або непередбачувані логістичні збої у постачанні палива. Класичний апарат нормального розподілу (статистика Гауса) під час економічного моделювання будівництва демонструє низьку релевантність, оскільки кожен інвестиційний проєкт відзначається унікальністю параметрів середовища. Саме тому для діджиталізації системи фінансового енергоменеджменту [3] нами розроблено багатокритеріальний алгоритм на основі нечітких множин 2-го типу, здатних ефективно абсорбувати слід невизначеності будівельного процесу.

Організаційно-економічний алгоритм предиктивного управління витратами охоплює чотири взаємопов'язані етапи:

1) *Агрегація первинної фінансової бази*. Планово-економічний відділ за допомогою ERP-системи підприємства фіксує вторинні показники енергомісткості (питомі витрати енергоносіїв на 1 машино-годину) та розраховує фактичний зарплато-коефіцієнт (добуток реальних трудовитрат на тарифну ставку відповідного кваліфікаційного розряду ланки робітників).

2) *Розрахунок економічного індексу масштабу.* Обчислюється відносний безрозмірний індикатор – коефіцієнт гальмування (або прискорення) витрат. Цей показник демонструє безпосередню економічну реакцію операційного бюджету проєкту на інтенсифікацію потужності залученої техніки.

3) *Фаззифікація фінансового результату.* Оцінка допустимості економічних відхилень фактичних витрат від жорстких кошторисних лімітів здійснюється через дзвоноподібну функцію належності:

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x - c}{\sigma} \right)^{2b}}, \tag{1}$$

де $\mu_A(x)$ – міра прийняття ефективності фінансового енергоменеджменту (набуває значень від 0 до 1, де 1 – ідеальна відповідність еталону);

x – фактичний економічний коефіцієнт зміни сукупних витрат на конкретному об'єкті;

c – мода нечіткого числа (еталонний нормативний показник для даного типу техніки);

σ – параметр розтягнення нечіткої множини (довірчий коридор коливань фінансового бюджету);

b – параметр крутизни (індикатор чутливості підрядного підприємства до фінансових ризиків та можливих бюджетних девіацій).

4) *Параметризація за Парето та прийняття рішень.* Головною методологічною перевагою запропонованого алгоритму є інноваційний спосіб визначення параметра σ. Замість класичних статистичних похибок використано економічний закон Парето (правило 20/80) та концепцію ABC-аналізу витрат [6]. Фінансовий коридор коливань розмежовується на дві зони: «внутрішнє розтягнення» (відповідає топ-20% найбільш оптимістичних та економних сценаріїв експлуатації техніки) та «зовнішнє розтягнення» (охоплює межу у 33% спостережень, що виступає критичною лінією беззбитковості для підрядника).

Практична управлінська цінність розробленого алгоритму полягає у його здатності генерувати випереджувальні стратегічні рішення. Якщо фахівець з ціноутворення фіксує, що розрахований показник μ опускається нижче критичної межі «зовнішнього розтягнення», це є чітким економічним маркером повної втрати фінансового контролю над об'єктом.

Як доводять розрахунки [6], при необґрунтованому залученні надпотужних електрокранів інтенсифікація їх роботи зумовлює експоненціальне зростання трудовитрат обслуговуючої ланки (прискорення в 1,72 рази), що деструктивно збільшує загальновиробничі витрати компанії та виводить об'єкт у зону збитковості. У такій ситуації інструментарій сигналізує, що економічно доцільніше оптимізувати ПВР і застосувати енергоощадні підйомні машини з дизельним приводом. Для останніх діє класичний економічний ефект економії на масштабі (із доведеним коефіцієнтом гальмування зростання витрат палива на рівні 0,573 та супутніх ЗВВ на рівні 0,750), що гарантує збереження маржинального прибутку та фінансову стабільність будівельного контракту.

Висновки. Запропонований організаційно-економічний алгоритм виступає якісним інструментом підтримки прийняття економіко-управлінських рішень у будівельному виробництві. Імплементація математичного апарату нечітких множин 2-го типу та диференційованих інтервалів Парето переводить процес формування кошторисної документації у площину хеджування фінансових ризиків. Це забезпечує врахування деструктивних впливів виробничої стохастичності та зовнішніх чинників, а також уможливлює предиктивну ідентифікацію та нівелювання нетипових диспропорцій витратомісткості експлуатації енергоощадних машин. Впровадження алгоритму дозволяє підряднику запобігти неконтрольованому розширенню загальновиробничих витрат і формувати математично збалансовані та конкурентоспроможні тендерні пропозиції.

Список використаних джерел

1. Vysochanska, M., & Bilotil, V. (2023). Ensuring energy efficiency in buildings as one of the advantages of green building. *Agrosvit*, 15, 29–42. https://doi.org/10.32702/2306-6792.2023.15.29.
2. Kozyk, V. V., Marushchak, U. D., & Marko, O. Y. (2024). Assessment of energy efficiency in the life cycle of residential building objects. *Business Inform*, 5(556), 201–207. https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-5-201-207.
3. Onofriichuk, I., & Rosynskyi, A. (2025). Justification of the components of a digitalized energy consumption control toolkit for contracting enterprises. *Ways to Improve Construction Efficiency*, 55(1), 259–272. https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(1).259-272
4. Rosynskyi, A., & Onofriichuk, I. (2020). Energy efficiency of construction processes as an instrument for economic potential growth of real estate development company. *Ways to Improve Construction Efficiency*, 44, 31–39. https://doi.org/10.32347/2707-501x.2020.44.31-39
5. Estimated standards of Ukraine. Guideline for determining the cost of construction, Order of the Ministry of Communities and Territories Development of Ukraine No. 281 (2021) (Ukraine).
6. Onofriichuk, I., & Rosynskyi, A. (2026). Justification of energy efficiency indicators in the energy management system of construction production. *Ways to Improve Construction Efficiency*, 57(2), 323–339. https://doi.org/10.32347/2707-501x.2026.57(2).323-339.

СЕКЦІЯ 7
«ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА»

АНАЛІЗ ВПЛИВУ НЕНАЛЕЖНОГО ПОВОДЖЕННЯ З ТВЕРДИМИ ПОБУТОВИМИ ВІДХОДАМИ НА ДОВКІЛЛЯ ТА ЗДОРОВ'Я НАСЕЛЕННЯ

Станіслав Душкін, доцент, канд. техн. наук, доцент[1],
[1]Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків 61002, Україна

АНОТАЦІЯ. *У роботі проведено ґрунтовний аналіз критичної проблеми неналежного поводження з твердими побутовими відходами, що на сучасному етапі розвитку суспільства становить масштабну загрозу для екологічної безпеки та фізичного здоров'я нації, особливо в регіонах із дефіцитом ефективної сміттєпереробної інфраструктури. Досліджено деструктивні екологічні наслідки, спричинені стихійним захороненням, неконтрольованим спалюванням та відкритим скиданням відходів, що призводить до тотального забруднення атмосферного повітря, водних ресурсів та родючих шарів ґрунту токсичними речовинами. Проаналізовано складні механізми міграції небезпечних забруднювачів та шляхи їх проникнення в організм людини через трофічні ланцюги, питну воду, інгаляційний шлях та безпосередній контакт із довкіллям. Робота містить результати дослідження широкого спектру патологій, що корелюють із рівнем забруднення ТПВ, включаючи респіраторні, онкологічні, інфекційні, серцево-судинні хвороби, а також глибокі психосоціальні наслідки проживання в екологічно несприятливих умовах. У роботі систематизовано прогресивні міжнародні підходи до менеджменту відходів, висвітлено успішні кейси залучення іноземної допомоги та впровадження інноваційних технологій переробки.*

Ключові слова: *тверді побутові відходи; екологічна безпека; інфекційні захворювання; спалювання; захоронення; переробка; рециклінг; токсичність; вразливі групи; сталий розвиток.*

Вступ. Життєдіяльність людини неминуче супроводжується утворенням твердих відходів, і з розширенням масштабів міст проблема поводження з ними стає дедалі гострішою. Тверді побутові відходи (ТПВ) включають харчові продукти та предмети побуту, що стали непридатними для подальшого використання. На сьогодні управління ТПВ є однією з найбільш критичних екологічних та соціальних проблем сучасності.

У багатьох країнах, що розвиваються, домінує практика відкритого скидання відходів через низькі капітальні та експлуатаційні витрати порівняно з інженерними методами утилізації. Проте такий несанітарний підхід, що не передбачає збору газу чи очищення фільтрату, призводить до масштабного забруднення атмосферного повітря, водних ресурсів та ґрунтів. Внаслідок неефективного менеджменту відходів населення піддається негативному фізичному, біологічному та психосоціальному впливу.

Забруднення довкілля сприяє розмноженню комах та гризунів, які є переносниками небезпечних інфекційних захворювань, таких як холера, дизентерія та лептоспіроз. Окрім біологічних загроз, продукти розпаду та спалювання відходів (метан, діоксиди сірки та азоту, хлорид водню) викликають серйозні порушення дихальної системи та імунітету. Таким чином, неналежне поводження з ТПВ спричиняє не лише екологічну деградацію та поширення хвороб, а й значні економічні втрати на відновлення екосистем та лікування населення.

Аналіз літературних джерел. Дослідження проблеми поводження з твердими побутовими відходами (ТПВ) у світовій практиці свідчить про пряму залежність між обсягами сміття та рівнем урбанізації та економічного розвитку [1]. Науковці наголошують, що відсутність сучасних технологій та ефективних політик у країнах, що розвиваються, веде до зростання смертності та захворюваності населення через неналежне управління відходами [2]. Глобальний аналіз демонструє, що різні фракції відходів мають кумулятивний негативний вплив на сталий розвиток та здоров'я суспільства [3].

В Україні питання ТПВ є однією з найбільш актуальних екологічних загроз, оскільки понад 90% відходів захоронюються без попереднього сортування чи переробки [4]. Дослідники вказують на низький технологічний рівень наявних методів утилізації та практичну відсутність інноваційних рішень у цій сфері [5]. Важливим етапом у вирішенні проблеми стало ухвалення Закону України «Про управління відходами», який спрямований на адаптацію національного законодавства до стандартів ЄС.

Сучасні наукові пошуки в Україні також зосереджені на впровадженні принципів циркулярної економіки та рециклінгу як альтернативи традиційному захороненню [6]. Зокрема, розглядаються можливості використання інформаційних та комп'ютерних технологій для моніторингу утворення відходів, що дозволить ефективніше використовувати їхній ресурсний потенціал [7]. Водночас експерти зауважують, що технічна модернізація неможлива без державної підтримки, інвестицій та формування високої екологічної свідомості населення [8].

Мета роботи – комплексне дослідження негативного впливу неналежного поводження з твердими побутовими відходами на екологічний стан довкілля та здоров'я населення в Україні. Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення таких основних завдань:

– проаналізувати сучасні технології утилізації та переробки ТПВ, що застосовуються у світовій та вітчизняній практиці;

– дослідити специфіку впливу чинників небезпеки на вразливі групи населення та виявити кореляцію між забрудненням ТПВ і розвитком захворювань;

– запропонувати стратегічні шляхи зменшення обсягів утворення відходів через впровадження принципів Zero Waste та циркулярної економіки для підвищення рівня екологічної безпеки.

Виклад основного матеріалу

Глобальний контекст та соціально-екологічні ризики. Проблема поводження з твердими побутовими відходами (ТПВ) у сучасному світі набула масштабів глобальної екологічної кризи. Стрімка урбанізація, зростання чисельності населення та зміна моделей споживання призводять до того, що обсяги генерованого сміття випереджають темпи розвитку інфраструктури для його переробки [9]. Для багатьох країн, особливо тих, що розвиваються, найпоширенішим методом «утилізації» залишається відкрите скидання на несанкціонованих звалищах, що зумовлено їхньою низькою вартістю порівняно з високотехнологічними сміттєпереробними заводами.

Неконтрольовані звалища функціонують як потужні джерела токсичного впливу на всі компоненти екосистеми. Ключовим фактором ризику є утворення фільтрату – високотоксичної рідини, що виникає внаслідок проходження атмосферних опадів крізь товщу відходів. Фільтрат містить важкі метали, аміак та органічні забруднювачі, які, просочуючись у ґрунт, отруюють підземні та поверхневі водні ресурси. Окрім рідких стоків, звалища є джерелом біогазу, значну частину якого становить метан.

Неналежне управління відходами створює прямі та опосередковані загрози для здоров'я населення [10].

– біологічні загрози: відкриті сміттєзвалища стають ідеальним середовищем для розмноження комах (мух, комарів) та гризунів (щурів), які виступають переносниками збудників холери, дизентерії, тифу та лептоспірозу;

– токсичний вплив: у процесі розкладання та частого самозаймання відходів у повітря викидаються діоксини, фурани, оксиди сірки та азоту, а також хлорид водню. Постійне вдихання цих сполук призводить до хронічних захворювань дихальних шляхів, серцево-судинних патологій та порушень імунної системи;

– психосоціальні аспекти: проживання поблизу звалищ спричиняє постійний стрес через неприємні запахи, візуальне забруднення ландшафту та усвідомлення екологічної небезпеки, що знижує загальну якість життя та добробут громади.

Економічний вимір цієї проблеми полягає у величезних витратах на лікування захворювань, спричинених забрудненням, та на подальшу рекультивацію земель, що часто перевищує вартість своєчасного впровадження систем роздільного збору та переробки сміття.

Стан управління ТПВ в Україні: виклики та реформи. Ситуація з управлінням твердими побутовими відходами в Україні тривалий час залишалася критичною через застарілу радянську модель «збір – вивезення – захоронення». На сьогодні понад 90% усіх побутових відходів в країні потрапляють на полігони та сміттєзвалища, значна частина яких перевантажена або не відповідає нормам екологічної безпеки. Ключовими проблеми галузі є:

– низький рівень переробки: частка відходів, що потрапляють на сортувальні лінії або вторинну переробку, залишається вкрай низькою, що призводить до безповоротної втрати цінних ресурсів, таких як папір, скло, полімери та метали;

– технологічна відсталість: більшість діючих сміттєзвалищ не обладнані системами збору фільтрату та дегазації, що створює постійну загрозу масштабних пожеж та отруєння водоносних горизонтів;

– інвестиційний дефіцит: через відсутність прозорих тарифів та гарантій для інвесторів будівництво сучасних сміттєпереробних заводів в Україні донедавна було поодиноким явищем.

Рішучим кроком до виправлення ситуації стало прийняття та вступ у дію Закону України «Про управління відходами», який базується на Директивах ЄС. Цей документ запроваджує ієрархію управління відходами, де пріоритет надається запобіганню утворенню сміття та його повторному використанню, а захоронення розглядається як крайній захід. Важливою новацією є запровадження принципу «розширеної відповідальності виробника», згідно з яким бізнес має забезпечити повну утилізацію пакування своєї продукції [11].

В умовах воєнного стану до загальних проблем додалася необхідність управління відходами руйнувань, що потребує нових підходів до сортування та переробки будівельного сміття безпосередньо на місцях.

Технологічні рішення та роль цифровізації. Сучасна стратегія поводження з ТПВ вимагає переходу від пасивного накопичення сміття до активного управління його потоками за допомогою інноваційних технологій. Одним із найбільш перспективних напрямів є цифровізація галузі, яка дозволяє мінімізувати логістичні витрати та підвищити прозорість процесів.

Роль IT та моніторингу:

– оптимізація збору: впровадження інтелектуальних систем моніторингу на основі датчиків заповненості контейнерів дозволяє будувати динамічні маршрути для сміттєвозів, що суттєво зменшує викиди CO_2 та витрати пального [7];

– інформаційні системи управління: створення єдиних баз даних на рівні територіальних громад забезпечує точний облік морфологічного складу відходів, що є критично важливим для планування будівництва сортувальних комплексів [5].

Технології переробки та енергогенерації:

Крім механічного сортування, велика увага приділяється методам термічної обробки та біоконверсії.

– енергія з біогазу: сучасні полігони оснащуються системами вертикальних та горизонтальних дрен для вилучення звалищного газу, який надалі використовується для виробництва електроенергії або тепла [8];

– сміттєспалювання з очисткою: використання сучасних фільтрів дозволяє безпечно утилізувати «хвости» (залишки, що не підлягають рециклінгу), перетворюючи їх на теплову енергію без шкоди для атмосфери [12].

Впровадження таких рішень в Україні дозволить не лише зменшити площі звалищ, а й частково замістити традиційні енергоносії альтернативними джерелами.

Висновки. У ході проведеного дослідження було проаналізовано сучасний стан та перспективи управління твердими побутовими відходами. На основі отриманих даних можна зробити такі висновки:

1. Традиційні методи захоронення відходів, особливо практика відкритого скидання, є джерелом критичного забруднення довкілля через утворення токсичного фільтрату та емісію парникових газів. Це створює пряму загрозу здоров'ю населення, сприяючи поширенню інфекційних та хронічних захворювань.

2. Поточна ситуація в Україні, за якої понад 90% ТПВ потрапляє на полігони, вимагає впровадження положень нового законодавства та переходу до ієрархії управління відходами, прийнятої в ЄС]. Пріоритетом має стати запобігання утворенню сміття та розширення відповідальності виробників.

3. Впровадження цифрових технологій для моніторингу та оптимізації логістики (Smart Waste Management) є ключовим фактором підвищення ефективності галузі на рівні громад. Енергетична утилізація біогазу та непереробних залишків може стати важливим кроком до енергонезалежності регіонів.

4. Сталий розвиток можливий лише за умови трансформації лінійної економіки в циклічну, де відходи стають ресурсом. Реалізація принципів Zero Waste та концепції 5R дозволить суттєво зменшити антропогенне навантаження на екосистеми та стимулювати економічне зростання.

Список використаних джерел:

1. Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management. Washington: World Bank.
2. Rinnie Mahajan (2023). Environment and health impact of solid waste management in developing countries: a review. Current World Environment, 18(1), 18–29. https://doi.org/10.12944/CWE.18.1.3.
3. Ferronato, N., & Torretta, V. (2019). Waste mismanagement in developing countries: a review of global issues. International Journal of Environmental Research and Public Health, 16(6), 1060. https://doi.org/10.3390/ijerph16061060.
4. Biliavskyi, O.O. (2023). Problemy utylizatsii tverdykh pobutovykh vidkhodiv v Ukraini ta metody yikh vyrishennia [Problems of municipal solid waste utilization in Ukraine and methods of their solution]. Strategy of Economic Development of Ukraine, 52, 72–83. https://doi.org/10.33111/sedu.2023.52.072.083 [in Ukrainian].
5. Pronko, L. (2022). Udoskonalennia informatsiinykh system управління tverdymy pobutovymy vidkhodamy v terytorialnykh hromadakh [Improvement of information systems for municipal solid waste management in territorial communities]. Economy and Society, 40. https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-40-20 [in Ukrainian].
6. Horbal, N.I., & Slipachyk, S.V. (2024). Tsyrkuliarna ekonomika: osoblyvosti ta perspektyvy vprovadzhennia v Ukraini v umovakh viiny [Circular economy: Features and prospects of implementation in Ukraine under war conditions]. Management and Entrepreneurship in Ukraine: Stages of Formation and Development Problems, 1(11), 92–100. https://doi.org/10.23939/smeu2024.01.092 [in Ukrainian].
7. Barun, M.V., Koversun, S.O., Lezhneva, O.I., & Lotarev, A.H. (2025). Vykorystannia komp'iuternykh ta informatsiinykh tekhnolohii na riznykh etapakh povodzhennia z TPV [Use of computer and information technologies at various stages of municipal solid waste management]. Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu, 108, 168–174. https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.108.0.168 [in Ukrainian].
8. Matvieiev, Yu.B., & Heletukha, H.H. (2019). Perspektyvy enerhetychnoi utylizatsii tverdykh pobutovykh vidkhodiv v Ukraini: Analitychna zapyska №22 [Prospects for energy utilization of municipal solid waste in Ukraine: Analytical note No. 22]. Bioenerhetychna Asotsiatsiia Ukrainy. https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/01/position-paper-uabio-22-ua.pdf [in Ukrainian].
9. Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Washington: World Bank. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0.
10. Alam, P., & Chowdhury, K. (2020). Impact of solid waste on health and the environment. International Journal of Sustainable Development and Green Economics (IJSDGE), 9(1), 40-46.
11. Caceres Ruiz, A. M., Sanches Pereira, A., & Zaman, A. (2025). Regionalising the circular economy: A three-step integrative review and gap analysis. Cleaner Environmental Systems, 19, 100371. https://doi.org/10.1016/j.cesys.2025.100371
12. Anagnostopoulos, T., Zaslavsky, A., Medvedev, A., & Khoruzhnikov, S. (2015). Top-k Query Based Dynamic Scheduling for IoT-enabled Smart Waste Management. 2015 IEEE International Conference on Data Mining Workshop (ICDMW), 50-57. https://doi.org/10.1109/MDM.2015.25

ОЦІНКА ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ПОЛІМЕРІВ ВІДХОДІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТА ЕЛЕКТРОННОГО ОБЛАДНАННЯ (ВЕЕО)

Євгеній Гречанюк, аспірант[1] (ORCID: 0009-0008-5687-2269),
Віталій Іщенко, докт. техн. наук, доцент, завідувач кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля[1] (ORCID: 0000-0002-8464-1096),
[1]Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21000, Україна

АНОТАЦІЯ. *У дослідженні здійснено комплексний аналіз впливу полімерних компонентів відходів електричного та електронного обладнання (ВЕЕО) на основні складові довкілля. Узагальнено сучасні уявлення щодо фізико-хімічних властивостей полімерів, закономірностей їх деструкції та процесів міграції пов'язаних із ними токсичних сполук. Особливу увагу приділено підходам до оцінювання екологічного ризику з урахуванням токсикокінетичних характеристик і положень концепції життєвого циклу. Показано, що полімерні компоненти ВЕЕО формують тривале та багатофакторне техногенне навантаження на атмосферне повітря, ґрунтовий покрив і водні об'єкти, а також є джерелом утворення мікропластикового забруднення. Обґрунтовано доцільність удосконалення систем управління відходами як ключового інструменту зниження негативного впливу.*

Ключові слова: *ВЕЕО; полімери; екологічний ризик; мікропластик; токсикокінетика; деградація полімерів; LCA.*

Вступ. Сучасний етап розвитку техносфери характеризується стрімким зростанням обсягів електронних відходів. За останні десятиліття ВЕЕО стали одним із найдинамічніших потоків відходів у світі. Значна частка у їх складі припадає на полімерні матеріали, які виконують конструкційні, ізоляційні та захисні функції. Згідно зі звітом *The Global E-waste Monitor*, обсяги генерації таких відходів продовжують зростати на мільйони тонн щороку (Forti et al., 2020).

Разом з тим, саме полімери є носіями значної кількості небезпечних добавок: бромованих антипіренів, стабілізаторів, пластифікаторів, які здатні вивільнятися у довкілля. Особливістю таких відходів є поєднання високої стійкості полімерної матриці та мобільності низькомолекулярних домішок. Проблема ускладнюється тим, що значна частина ВЕЕО в Україні та світі утилізується несанкціоновано - шляхом спалювання або захоронення, що призводить до неконтрольованого забруднення (Hassan et al., 2023).

Аналіз літературних джерел. Сучасні наукові дослідження свідчать про стале зростання інтересу до проблематики полімерних компонентів відходів електричного та електронного обладнання, що зумовлено як збільшенням обсягів їх утворення, так і складністю екологічних наслідків їх накопичення. У фокусі більшості робіт перебувають питання токсичності хімічних добавок, які входять до складу полімерів, зокрема бромованих антипіренів, що широко застосовуються для підвищення вогнестійкості матеріалів. Доведено, що ці сполуки здатні до персистенції в навколишньому середовищі та характеризуються високим рівнем біоакумуляції, що створює потенційні ризики для живих організмів і людини (Vaneetveld et al., 2023).

Значна кількість досліджень присвячена процесам термічної деструкції полімерів, які відбуваються під час несанкціонованого спалювання ВЕЕО. У таких умовах формуються високотоксичні сполуки, зокрема діоксини та фурани, що мають виражені канцерогенні та мутагенні властивості. Паралельно з цим у науковій літературі активно обговорюється проблема утворення мікропластику внаслідок фізико-хімічної деградації полімерних матеріалів (Santhanam et al., 2024). Встановлено, що мікрочастинки полімерів здатні тривалий час зберігатися в екосистемах, мігрувати між різними середовищами та включатися у трофічні ланцюги.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із вивченням процесів біоакумуляції токсикантів, які надходять у довкілля разом із полімерними компонентами ВЕЕО. При цьому особливу увагу приділяють не лише окремим речовинам, але й їх комбінованій дії, що може призводити до синергічних ефектів і посилення токсичності. Важливим науковим результатом є встановлення того,

що полімерні матеріали виконують не тільки роль джерела забруднення, але й виступають як своєрідні носії та транспортні середовища для інших небезпечних сполук, сприяючи їх поширенню у компонентах довкілля (Wagner et al., 2024).

Таким чином, аналіз літературних джерел підтверджує необхідність комплексного підходу до оцінки впливу полімерів ВЕЕО, який має враховувати як хімічний склад матеріалів, так і особливості їх трансформації у природному середовищі.

Мета роботи. Метою роботи є поглиблена оцінка впливу полімерних компонентів ВЕЕО на довкілля з урахуванням їх деградаційних процесів, токсикокінетики та екологічних ризиків.

Методи і матеріали. Методологічну основу дослідження становить поєднання загальнонаукових і спеціальних підходів, спрямованих на комплексну оцінку впливу полімерних компонентів відходів електричного та електронного обладнання на довкілля. Ключовим інструментом виступив системний аналіз, який дозволив розглядати полімери ВЕЕО як складову багаторівневої техногенно-екологічної системи з урахуванням взаємозв'язків між процесами їх утворення, трансформації та міграції в різних компонентах навколишнього середовища.

Для виявлення закономірностей впливу та визначення найбільш небезпечних факторів було застосовано порівняльний аналіз, що передбачав зіставлення різних типів полімерних матеріалів, умов їх експлуатації та утилізації, а також характеру утворення і поширення токсичних речовин. Це дало змогу ідентифікувати полімери з підвищеним екологічним ризиком та оцінити їх внесок у загальне техногенне навантаження.

У роботі також використано елементи математичного моделювання, зокрема для опису процесів деградації полімерів та прогнозування міграції токсикантів у системах «полімер – довкілля». Такий підхід дозволяє формалізувати складні процеси деструкції та оцінити швидкість змін концентрацій небезпечних речовин залежно від умов навколишнього середовища.

Важливе місце у дослідженні посідає узагальнення сучасних наукових джерел, що забезпечило формування достовірної інформаційної бази щодо фізико-хімічних властивостей полімерів, їх токсикологічних характеристик та особливостей екологічної поведінки. Це дозволило інтегрувати результати різних досліджень і сформувати цілісне уявлення про проблему.

Додатково використано концепцію життєвого циклу (LCA), яка дала змогу оцінити вплив полімерних компонентів ВЕЕО на довкілля на всіх етапах їх існування - від виробництва та експлуатації до утилізації або захоронення (Maragkos et al., 2021). Такий підхід є особливо важливим для визначення критичних стадій формування екологічного навантаження та обґрунтування ефективних заходів його зниження.

Загалом застосований комплекс методів забезпечив можливість всебічного аналізу досліджуваної проблеми та підвищив обґрунтованість отриманих результатів.

Виклад основного матеріалу. Полімерні компоненти відходів електричного та електронного обладнання представлені широким спектром матеріалів, які відрізняються як за фізико-хімічними властивостями, так і за характером впливу на довкілля. Найбільш поширеними є ABS-пластики, що використовуються для виготовлення корпусів техніки та містять бромовані антипірени як добавки для підвищення вогнестійкості. Полістирол застосовується переважно як ізоляційний матеріал і може бути джерелом виділення стиролу - токсичної органічної сполуки. Поліпропілен використовується у кабельній продукції, де до його складу вводяться стабілізатори, здатні мігрувати в навколишнє середовище. Особливу увагу привертає полівінілхлорид (ПВХ), який широко застосовується для ізоляції проводів і містить фталати та сполуки свинцю, що становлять підвищену екологічну небезпеку (Singh et al., 2020).

Після потрапляння у довкілля полімерні матеріали зазнають поступової деградації під впливом зовнішніх факторів. Найбільш значущими є процеси фотодеградації під дією ультрафіолетового випромінювання, термодеструкції при підвищених температурах та обмеженої біодеградації за участю мікроорганізмів. Швидкість зміни концентрації полімерного матеріалу або пов'язаних із ним добавок у часі може бути описана кінетичним рівнянням першого порядку:

$$\frac{dC}{dt} = -kC$$

де C - концентрація речовини, мг/кг або мг/м³; t - час, с; k - константа швидкості деградації, с⁻¹. Це рівняння дозволяє оцінити інтенсивність руйнування полімерів і прогнозувати накопичення продуктів їх розкладу.

Суттєвий негативний вплив полімерні компоненти ВЕЕО чинять на атмосферне повітря, особливо в умовах їх неконтрольованого спалювання. У процесі термічного розкладу утворюється широкий спектр токсичних речовин, серед яких найбільш небезпечними є діоксини, фурани, хлороводень (HCl, мг/м³) у випадку полівінілхлориду, а також поліциклічні ароматичні вуглеводні. Ці сполуки характеризуються високою токсичністю, канцерогенністю та здатністю до тривалого збереження в атмосфері.

У ґрунтовому середовищі полімери виконують роль джерела тривалого забруднення. У процесі їх старіння відбувається поступове вивільнення хімічних добавок, що призводить до підвищення токсичності ґрунту (мг/кг). Одночасно спостерігається накопичення мікропластикових частинок, які змінюють фізичну структуру ґрунтів, впливаючи на їх пористість і водопроникність. Додатково полімери можуть сприяти міграції важких металів, що обумовлює вторинне забруднення та ускладнює природні процеси самоочищення (Sun et al., 2023).

У водних екосистемах деградація полімерів супроводжується утворенням мікропластику, під яким розуміють частинки розміром менше 5 мм:

$$d < 5 \text{ мм}$$

Такі частинки мають значну питому поверхню та здатні адсорбувати токсичні речовини з водного середовища (мг/л). У подальшому вони включаються у харчові ланцюги, накопичуються в організмах гідробіонтів та можуть передаватися на вищі трофічні рівні, що підсилює ризики для біоти та людини.

З токсикокінетичної точки зору надходження небезпечних речовин, пов'язаних із полімерними матеріалами, відбувається інгаляційним, пероральним і дермальним шляхами. Після потрапляння в організм ці сполуки можуть накопичуватися в тканинах, що зумовлює ефект біоакумуляції. Кількісна оцінка цього процесу здійснюється за допомогою коефіцієнта біоакумуляції (BAF):

$$BAF = \frac{C_{\text{організм}}}{C_{\text{середовище}}}$$

де $C_{\text{організм}}$ - концентрація речовини в організмі, мг/кг; $C_{\text{середовище}}$ - концентрація в навколишньому середовищі, мг/л або мг/кг.

Оцінка екологічного ризику, пов'язаного з полімерними компонентами ВЕЕО, базується на інтеграції ймовірності впливу та тяжкості його наслідків:

$$R = P \times C$$

де R - інтегральний показник ризику (умовні одиниці або бали), P - ймовірність реалізації впливу (безрозмірна величина в інтервалі 0-1), C - величина наслідків (наприклад, у мг/м³, мг/кг або балах шкали впливу).

Аналіз існуючих підходів до поводження з полімерними відходами ВЕЕО показує, що кожен із методів має як переваги, так і суттєві обмеження. Захоронення відзначається технологічною простотою, проте супроводжується тривалим забрудненням довкілля. Спалювання дозволяє зменшити об'єм відходів, але пов'язане з утворенням токсичних викидів. Переробка (механічний рециклінг) є більш екологічно доцільною, оскільки забезпечує повернення ресурсів у господарський обіг, однак потребує складних систем сортування (Wagner et al., 2024). Піроліз, як сучасна технологія термічної переробки, дозволяє отримувати вторинне паливо, але обмежується високою вартістю реалізації.

Таким чином, полімерні компоненти ВЕЕО слід розглядати як складний багатофакторний чинник впливу на довкілля, який охоплює фізичні, хімічні та біологічні аспекти і потребує комплексного підходу до оцінки та управління.

Обговорення. Отримані результати підтверджують, що вплив полімерних компонентів відходів електричного та електронного обладнання має виражений системний характер і не обмежується окремими локальними проявами. Він реалізується одночасно в атмосферному повітрі,

ґрунтовому покриві та водних екосистемах, формуючи комплексне техногенне навантаження. Така багатовекторність впливу значною мірою зумовлена поєднанням високої стійкості полімерної матриці до природних факторів деструкції та здатності низькомолекулярних добавок до активної міграції. У результаті навіть за відсутності інтенсивного руйнування полімерної основи відбувається поступове вивільнення токсичних речовин, що підтримує тривалий рівень забруднення довкілля (Hassan et al., 2023).

Особливу занепокоєність викликає процес формування мікропластикового забруднення, який супроводжує деградацію полімерів у природних умовах. На відміну від традиційних забруднювачів, мікропластик практично не піддається ефективному контролю та вилученню з навколишнього середовища, що сприяє його глобальному поширенню. Його здатність адсорбувати токсичні сполуки та виступати переносником забруднювачів у трофічних ланцюгах істотно підсилює екологічні ризики, переводячи проблему з локального рівня у планетарний масштаб (Santhanam et al., 2024). У цьому контексті стає очевидним, що традиційні підходи до поводження з ВЕЕО, зокрема захоронення та спалювання, не забезпечують належного рівня екологічної безпеки та потребують перегляду з урахуванням сучасних викликів.

З огляду на зазначене, перспективи мінімізації негативного впливу полімерних компонентів ВЕЕО доцільно пов’язувати з переходом до інтегрованих підходів управління, заснованих на принципах циркулярної економіки (Maragkos et al., 2021). Такий підхід передбачає максимальне збереження матеріальних ресурсів у господарському обігу, зниження обсягів утворення відходів і повторне використання полімерних матеріалів після відповідної переробки. Важливим доповненням є впровадження екодизайну, який орієнтований на розроблення продукції з урахуванням її подальшої утилізації, зменшення вмісту небезпечних речовин та підвищення придатності до переробки. Не менш значущим напрямом є поступова заміна токсичних добавок на безпечніші альтернативи, що дозволить зменшити екологічні ризики ще на стадії виробництва матеріалів.

У цілому результати дослідження свідчать про необхідність переорієнтації існуючих систем управління ВЕЕО з ліквідації наслідків на попередження утворення екологічних загроз, що відповідає сучасним концепціям сталого розвитку та екологічної безпеки.

Висновки. Полімерні компоненти відходів електричного та електронного обладнання є одним із ключових факторів техногенного навантаження на довкілля, що обумовлено їх складним хімічним складом, стійкістю до деградації та здатністю до міграції токсичних речовин. Встановлено, що їх вплив реалізується через забруднення атмосферного повітря продуктами термічного розкладу, накопичення у ґрунтах та формування мікропластикового забруднення водних екосистем. Особливу небезпеку становить здатність полімерів виступати переносниками токсикантів та брати участь у процесах біоакумуляції.

Отримані результати підтверджують необхідність переходу до інтегрованих систем управління ВЕЕО, які мають включати сучасні технології переробки, екологічний моніторинг та оцінку життєвого циклу матеріалів. Реалізація таких підходів дозволить суттєво знизити екологічні ризики та забезпечити сталий розвиток у сфері поводження з електронними відходами.

Список використаних джерел

1. Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). *The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential*. United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR).
2. Hassan, S., Razzaq, A., Shahzad, M., & Zafar, M. (2023). Environmental and health impacts of e-waste: A review of the current status and future perspectives. *Environmental Science and Pollution Research, 30*(15), 42100–42118. https://doi.org/10.1007/s11356-023-25671-w
3. Maragkos, I., Eleftheriadis, K., & Angelakoglou, K. (2021). Life Cycle Assessment of plastic waste management from e-waste: A circular economy perspective. *Journal of Cleaner Production, 291*, 125915. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125915
4. Santhanam, N., Gopalakrishnan, S., & Raja, S. (2024). E-waste plastics as a source of microplastic pollution: Degradation mechanisms and environmental risks. *Science of The Total Environment, 906*, 167520. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167520
5. Singh, N., Li, J., & Zeng, X. (2020). Solutions and challenges in recycling of e-waste plastics. *Resources, Conservation and Recycling, 159*, 104882. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104882

6. Sun, J., Zhang, Y., & Liu, X. (2023). Impact of e-waste plastic particles on soil physical properties and microbial communities. *Chemosphere, 312*, 137250. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137250
7. Vaneetveld, A., Poma, G., & Covaci, A. (2023). Brominated flame retardants in e-waste plastics: Leaching, migration, and human exposure risks. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 40*, 100762. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2023.100762
8. Wagner, S., Scherer, C., & Klöckner, P. (2024). Management of polymer waste from EEE: From linear disposal to circular value chains. *Waste Management, 174*, 89–101. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.11.025

IMPORTANCE OF GRAPHIC COMPONENT OF ENERGY MANAGEMENT PROCESS OPTIMIZATION USING THE EXAMPLE OF KYIV REGION

Oleksiy Zabarylo, assoc. prof, cand. sc. (Physics and Mathematics), assoc. prof. [1] (ORCID: 0000-0003-4951-8882),
Yulia Korotkykh, senior lecturer [1] (ORCID: 0000-0002-9905-8151),
Pavlo Zabarylo, graduate student [1] (ORCID: 0009-0003-7712-3674),
[1] Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Air Force avenue 31, 03037, Ukraine

ABSTRACT. *The article voices the need to focus on prioritizing the use of alternative energy sources as a key to achieve energy independence. Using the graphics tools as one of the ways in optimizing renewable energy sources management is considered. Brief description of graphics as a science and its most suitable functions for abovementioned task is given. The potential of Ukraine is characterized in terms of renewable energy sources and the possibilities of their development, taking into account special features of different regions, is described against the background of need for prioritizing the gradual abandonment of imported fossil fuels. Database of existing energy generation sources by regions of Ukraine was formed and Kyiv region is used as an example for using graphical tools in energy resources management decision making. An analysis of statistical data reduced to single units of measurement was conducted. The prospects for further research to improve the management process of energy generation sources, including potential use of Sankey Diagrams, are voiced.*

Keywords: *alternative energy; energy efficiency; diversification; energy security; graphics; visualization tools; Sankey diagram.*

Introduction. The priority for the development of energy production from renewable energy sources has long been observed in the energy sector of European countries, as this approach has a number of undeniable advantages, among which it is worth noting the contribution to overcoming the economic and environmental problems of our time. Given the similarity of many pressing problems of the Ukrainian and European energy sectors, strategic decisions for Ukraine should take into account the relevant European experience [1]. The energy sector is one of the key sectors of the national economy, and uninterrupted and efficient energy supply has a direct impact on economic growth. Ukraine's economy, despite shifts in the right direction, still feels highly dependent on energy imports, not to mention the problems of excessive environmental pollution due to the use of outdated production equipment, so implementing new, diversified energy system is becoming more and more crucial task. Thus, increasing the level of domestic energy efficiency will contribute to the diversification of the supply of energy carriers to central and distributed energy generation systems, which, in turn, will ensure the creation of a low-carbon national economy and increase the role of the domestic energy sector in the system of international cooperation and, in the future, will contribute to entering international markets for energy goods and services. Given the long-term prospects for the development of Ukraine's energy sector, the role of renewable sources is a priority due to the presence of a significant energy potential of a practically inexhaustible and environmentally friendly resource of renewable energy sources. Methods for optimizing the management of the existing renewable energy resource base with the aim of gradually replacing a portion of traditional methods of energy production with renewable energy sources within the most appropriate realization of their potential are an important task for Ukraine [2] and the use of engineering graphics tools can contribute to its solution.

Analysis of recent research and publications. In recent years, Ukraine has seen a significant increase in the share of renewable energy in the energy sector, which is due not only to the obstacles caused by the full-scale invasion, but also to global trends in the energy sector of the economy. The problems and

prospects of the development of the energy sector, including alternative energy, as one of the potential and optimal directions of diversification are studied by such scientists as: Domashenko M.D., Domashenko V.S., Garkusha V.V., Shkola V.Yu., Shpak Y.N., Troyan M.Yu., Yakovenko V.S., Zaverbnyi A.S. and others. The problems of diversification of energy supply in the economy are devoted to the works of such specialists as Amosha O.I., Belopolsky N.G., Borisyak O.V., Fedorenko V.G., Ivanechko N.R., aforementioned Shpak Y.N., Turchenko D.K., aforementioned Zaverbnyi A.S. and others. The theoretical foundations of energy security as a general economic category and the main factors, that influencing it, are considered in the works of V.P. Kuhar, Shevtsov A.I., Shindlovsky A.K., Shlemko. V.T. and others.

Materials and methods. One of the tools, which may be applied to achieve abovementioned goals of solving energy problems is graphics science. Graphics can be identified as a set of means, methods and forms of graphical representation of information about engineering objects, and the subject of graphic technology is any organized, structured, and algorithmic description of a specific formalized object using graphic tools. There are a set of functions of graphic science, that are most effective in solving issues of optimizing the operation of energy generation sources [3], such as:

The information function of graphics is used as the most psychologically comfortable and visual way of presenting information;

The modeling function of graphics implemented as a component of geometric modeling, which is a subsystem of graphic and graph-analytical modeling;

The technological function of graphics is the ability to form technological platforms (design, calculations, research) on a graphical basis.

The main part of the study. For a comprehensive assessment of the region's energy supply capabilities and visualization of the process of selecting optimal solutions for their further implementation into practice, a database of existing energy generation sources by regions of Ukraine was formed. Four main areas of energy consumption were identified for the study:

- electricity (hydroelectricity, nuclear electricity, thermal electricity) in MW;
- petroleum products (motor gasoline, diesel fuel, fuel oil) in thousand tons;
- natural gas in million m^3;
- coal in thousand tons.

A database of energy potentials of alternative energy sources is also being formed. For a visual example, an analysis of statistical data collected for the Kyiv region as of 2018 and reduced to single units of measurement based on the conversion of MWh/year per 1000 population of the region for traditional and renewable energy sources was conducted. Energy potentials are tied to the possibility of replacing existing energy sources:

1. Total electricity potential of Kyiv region:
- Traditional electricity – 2590.94;
- Solar energy–50.86;
- Energy of small rivers – 12.72;
- Soil and groundwater temperature – 40.69;
- Thermal energy of wastewater – 404.13;
- Wind energy – 15.89.

2. Total energy potential of petroleum products of Kyiv region:
- Traditional fuel – 854.49;
- Livestock biomass potential – 418.8;
- Crop biomass potential – 155.46.

3. Total coal energy potential of Kyiv region:
- Coal – 1021.08;
- Plant biomass potential – 46.64;
- Peat – 31.05.

4. Total gas potential of Kyiv region:
- Natural gas – 3515.86;
- Livestock biomass potential – 604.39;
- Potential excess pressure of natural gas – 34.33;

Based on recommendations[4], the potentials of solar energy, small river energy, soil and groundwater heat, and wind energy are used to replace electricity; the potentials of livestock and plant biomass are partially used to replace oil products; the potentials of plant biomass and peat are partially used to replace coal; the potentials of livestock biomass, geothermal energy, excess pressure of natural gas, and blast furnace gas are partially used to replace natural gas. On Figure 1 described the results of system data processing according to open statistical data for 2018:

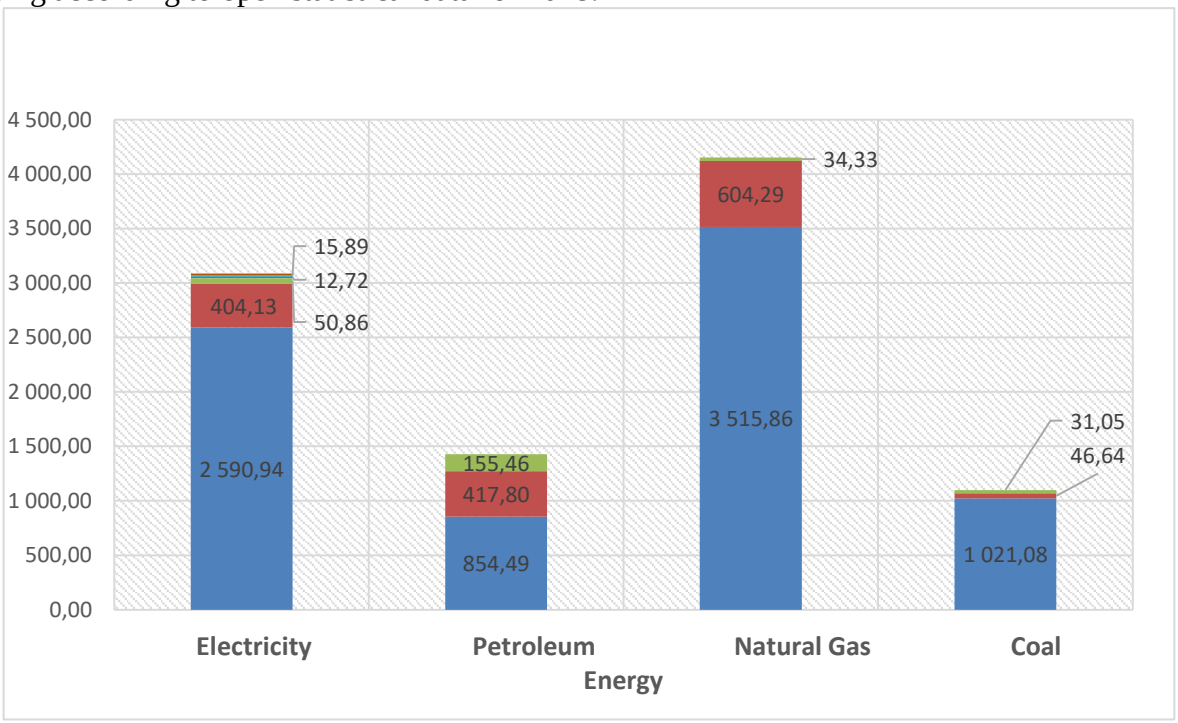


Figure 1. Total electricity consumption balance for Kyiv region (according to 2018 data)

To make optimal decisions, an analysis of energy consumption is carried out taking into account the possible use of energy potentials of alternative energy sources by regions of Ukraine in the form of an informative and illustrative synthesizing sectoral pie chart. It highlights sectors of possible replacement of existing energy sources with alternative ones in numerical and percentage values [5].

Conclusions. The above examples, simplifying the display of the potential for replacing traditional energy supply capacities, are only an intermediate stage in solving the issues of optimizing energy resource management. In the future, a more comprehensive analysis of energy consumption should be carried out using specialized tools, such as informatively illustrative technological Sankey diagrams, the capabilities of which allow you to visualize the entire process of graphical-analytical modeling of energy consumption and optimization of the optimal use of energy potentials, depending on the characteristics of each individual region of Ukraine. The essence of the decision-making process is to divide the total data set into flows, the value of which is illustrated in digital and percentage ratios. The key to solving the tasks is the ability to move flows to other places, change their value and attract new ones, which in turn allows you to continue the analysis in other directions and parameters [6].

References:

1. Kudrya S.O. (2025). *Atlas of the energy potential of renewable energy sources of Ukraine.* Kyiv: Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.36296/atlas-2025
2. Kostyuchenko Y.M. (2024). *The pole of the EU in ensuring the energy security of Ukraine*. Naukoviy Visnyk Uzhgorodskogo Natsionalnogo Universitetu, №85 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.24144/2307-3322.2024.85.4.39
3. Ploskiy V.O. (2019). *Functions of Graphics as a Methodological Basis of Graphics Science.* Journal for Geometry and Graphics, Vol.23. No. 1.
4. Getun G.V., Kosheva V.O. (2017). The relevance of the use of renewable energy sources in the construction sector in the conditions of Ukraine. Energy efficiency in construction and architecture №9 [in Ukrainian].
5. Zabarylo P.O., Zabarylo O.V., Korotkykh J.A. (2024). *Application of neural networks for the optimization in using of*

alternative energy sources processes. Proceedings of XIX international conference on modern achievements of science and education.

6. Sotnyk I.M., Kulyk L.A. (2017). *Energy efficiency in Ukraine: new challenges and major barriers to its implementation.* International Journal of New Economics and Social Sciences. https://doi.org/10.5604/01.3001.0010.4548

СУЧАСНІ СВІТОВІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ТА ОБРОБКИ ОСАДІВ У КОНТЕКСТІ ПЕРЕХОДУ ДО ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ

Сергій Проценко, доцент, канд. техн. наук, доцент[1],
Микола Кізєєв, доцент, канд. техн. наук, завідувач кафедри теплогазопостачання, вентиляції та енергоаудиту[1],
Ольга Новицька, доцент, канд. техн. наук, доцент[1],
Наталія Кравченко, доцент, канд. техн. наук, доцент[1],
[1]Національний університет водного господарства та природокористування, 11, вул. Соборна, м. Рівне, Україна, 33028

АНОТАЦІЯ. *В доповіді наведений огляд сучасних світових тенденцій у галузі очищення стічних вод та обробки осадів за останні роки. Розглянута фундаментальна зміна парадигми водної галузі – перехід від традиційного розуміння ролі очисних споруд як «витратних об'єктів видалення забруднень» до концепції «центрів рекуперації ресурсів та повторного використання води». На основі аналізу фахових публікацій 2021–2025 рр., індексованих у наукових базах Scopus, Web of Science та Google Scholar, систематизовані шість ключових напрямів розвитку галузі: проблема мікрозабруднювачів і забруднювачів нового покоління; перехід до засад циркулярної економіки з рекуперацією поживних речовин, енергії та очищеної води; досягнення вуглецевої нейтральності й енергетичної автономії; впровадження природоподібних рішень; мікробіологічна інтенсифікація процесів; цифрова трансформація управління. Охарактеризована нова редакція Директиви ЄС 2024/3019 щодо очищення міських стічних вод. Визначені перспективи розвитку водної галузі в напрямку створення повністю автономних, енергопозитивних систем очищення стічних вод, інтегрованих у міську інфраструктуру.*

Ключові слова: *очищення стічних вод; обробка осадів; циркулярна економіка; рекуперація ресурсів; вуглецева нейтральність.*

Вступ. В останні роки в галузі очищення стічних вод та обробки осадів відбуваються глибокі зміни. Тривалий час каналізаційні очисні споруди (КОС) розглядали виключно як витратні інфраструктурні об'єкти для видалення з води забруднень та патогенів. Проте стрімке зростання чисельності міського населення, підвищення вартості енергоносіїв, кліматичні зміни, дефіцит прісної води та виснаження природних запасів фосфору зумовили докорінну зміну підходів. Згідно із сучасними поглядами КОС мають перетворитися на «центри рекуперації ресурсів та повторного використання води» (Water Resource Recovery Facilities – WRRF) [1], де стічні води розглядаються як вторинні джерела води, енергії та біогенних елементів. Водночас водна галузь зіткнулася з новими викликами – появою «забруднювачів нового покоління»: фармацевтичних препаратів, засобів особистої гігієни, мікропластику, «вічних хімікатів» (пер- та поліфторалкільних сполук, або PFAS), з якими традиційні методи очищення не справляються [2]. Важливим регуляторним поштовхом у трансформації галузі стало прийняття в листопаді 2024 р. нової Директиви ЄС 2024/3019 щодо очищення міських стічних вод, яка вперше встановила для країн-членів ЄС обов'язкові вимоги щодо енергетичної нейтральності КОС, видалення мікрозабруднювачів та рекуперації фосфору [3]. Про важливість якнайшвидшого впровадження європейських підходів у нормативну базу України у сфері водовідведення автори відзначали у своїй статті [4].

Аналіз літературних джерел. Виконані авторами дослідження ґрунтуються на систематичному огляді наукових джерел за 2021-2025 роки. Аналіз охоплює бази даних Scopus, Web of Science та Google Scholar за такими ключовими запитами, як: «wastewater treatment», «resource

recovery», «circular economy», «micropollutants» тощо. Також враховані нормативні акти ЄС та аналітика Європейської Комісії.

Мета роботи. Метою даної роботи є аналіз сучасних ключових тенденцій розвитку технологій очищення стічних вод та обробки осадів, оцінка впровадження нових підходів у світовій практиці та визначення перспектив галузі в контексті переходу до циркулярної економіки.

Виклад основного матеріалу. Дослідження методом систематичного огляду фахових джерел дозволило виділити шість ключових тенденцій розвитку галузі.

Контроль та видалення мікрозабруднювачів. Фармацевтики, мікропластик та «вічні хімікати» (PFAS) стали головним технологічним викликом сьогодення, оскільки традиційні методи біологічного очищення стічних вод практично не здатні ефективно видаляти їх через біологічну стійкість та низькі концентрації. Вирішення цієї проблеми потребує впровадження четвертинного очищення: озонування, адсорбції на активованому вугіллі та передових окиснювальних процесів (AOPs). Особливе занепокоєння викликає мікропластик, який не тільки сам є забруднювачем, але ніби «губка» переносить інші токсичні речовини і подекуди навіть підсилює їхню дію [5]. Директива ЄС 2024/3019 вперше законодавчо закріпила вимоги до четвертинного очищення стічних вод.

Циркулярна економіка та рекуперація ресурсів. Рекуперація фосфору у формі струвіту ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) вже сьогодні є технологічно зрілим рішенням, яке широко застосовують у світі [6]. Директива ЄС 2024/3019 вперше зобов'язує країни-учасники забезпечити рекуперацію фосфору на великих КОС, визначивши його критично важливою сировиною для ЄС. Анаеробне зброджування осадів з виробництвом біогазу розглядають як ключовий метод рекуперації енергії на КОС, а застосування термофільного гідролізу перед зброджуванням підвищує вихід біогазу на 20–50% [7]. Цікавою є концепція «біорефінерії» на основі осаду стічних вод, яка передбачає послідовну рекуперацію ресурсів з різних фракцій осаду, перетворюючи тим самим КОС з витратного об'єкта на самоокупну інфраструктуру [8].

Декарбонізація та підвищення енергоефективності. Досягнення вуглецевої нейтральності КОС вважають цілком реалістичним завданням на найближче десятиліття. Інноваційна стратегія «carbon redirection», або перенаправлення переважної частки органіки стічних вод на зброджування задля виробітку біогазу замість її аеробного окиснення в аеротенках, у поєднанні з технологією PN/A (часткової нітритації/анамоксу) теоретично забезпечує не тільки нульовий, але й позитивний енергетичний баланс КОС [9]. Застосування штучного інтелекту для управління системою аерації здатне забезпечити зниження споживання електроенергії на очисних спорудах на 10–30% [10].

Природоподібні рішення. Штучні водно-болотні угіддя різних типів вважають ефективним та економічно привабливим доповненням до технологічного арсеналу галузі, особливо для децентралізованих систем водовідведення [11]. Додавання в них біовугільного субстрату, отриманого із сільськогосподарських відходів, підвищує ефективність видалення фармацевтичних препаратів до 80–95% [12].

Мікробіологічна інтенсифікація. Відзначають, що технологія PN/A потребує на 60% менше кисню та продукує на 80% менше надлишкового мулу порівняно з традиційним способом видалення азоту зі стічних вод шляхом нітрифікації-денітрифікації. Трирічний досвід її повномасштабного впровадження на муніципальних очисних спорудах підтвердив ефективність видалення загального азоту на рівні 91,8% [13]. Технологія гранульованого активного мулу (AGS/Nereda®), що вже впроваджена на понад 100 об'єктах у світі, забезпечує скорочення зайнятої очисними спорудами площі на 25–50%, зниження споживання електроенергії на 20–30% та ефективне видалення мікрозабруднювачів [14].

Цифрова трансформація. Впровадження цифрових двійників КОС дозволяє моделювати гідродинаміку та біохімічні реакції в реальному часі, тестувати різні сценарії без ризику для реальних процесів та оптимізувати енерговитрати, а мережі IoT-сенсорів та алгоритми машинного навчання забезпечують раннє виявлення порушень і прогнозування якості очищених стічних вод [15].

Висновки. 1. Водна галузь переживає нині докорінну зміну: традиційний погляд на КОС як на «витратний об'єкт» заміняється концепцією «центру рекуперації ресурсів» (WRRF), що функціонує за принципами циркулярної економіки. 2. Забруднювачі нового покоління є головним

технологічним викликом сьогодення. Їхнє видалення потребує четвертинного очищення, формування нормативної бази щодо нього розпочате з прийняттям Директиви ЄС 2024/3019. 3. Рекуперація ресурсів стічних вод (фосфору, азоту, біогазу, тепла) є найважливішим економічним аргументом переходу до концепції WRRF. 4. Технології AGS та PN/A є найперспективнішими мікробіологічними інноваціями, що вже впроваджені у повному масштабі на ряді КОС. Досвід їх експлуатації підтверджує високу ефективність цих методів очищення стічних вод. 5. Цифрова трансформація та природоподібні рішення є стратегічними напрямами підвищення операційної ефективності та сталості КОС. 6. На думку авторів, адаптація нормативної бази України до вимог Директиви ЄС 2024/3019 та впровадження передових технологічних рішень сприятиме якнайшвидшому переходу водогосподарського комплексу нашої країни до принципів функціонування циркулярної економіки.

Список використаних джерел

1. Ghimire, U., Sarpong, G., Gude, V. G. (2021). Transitioning wastewater treatment plants toward circular economy and energy sustainability. *ACS Omega*, *6*(18), 11794–11803. https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05827
2. Mary Ealias, A., Meda, G., & Tanzil, K. (2024). Recent Progress in Sustainable Treatment Technologies for the Removal of Emerging Contaminants from Wastewater. *Reviews in Environmental Contamination, 262*, 16. https://doi.org/10.1007/s44169-024-00067-z
3. Directive (EU) 2024/3019 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2024 concerning urban wastewater treatment (recast). OJ L, 2024/3019, 12.12.2024. Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/3019/oj/eng
4. Protsenko, S., Kizyeyev, M., Novytska, O., Kravchenko, N. (2025). Directions for updating the regulatory framework of Ukraine in the sphere of water disposal. *Problems of water supply, sewerage and hydraulics, 52*, 101-110. https://doi.org/10.32347/2524-0021.2025.52.101-110 [in Ukrainian]
5. McDougall, L., Thomson, L., Brand, S. et al. (2022). Adsorption of a Diverse Range of Pharmaceuticals to Polyethylene Microplastics in Wastewater. Science of The Total Environment, 808, 152071. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152071
6. Witek-Krowiak, A., Gorazda, K., Szopa, D. et al. (2022). Phosphorus Recovery from Wastewater and Bio-based Waste: An Overview. *Bioengineered*, *13*(5), 13474–13506. https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2077894
7. Cengiz, A. I., Guven, H., Ozgun, H. et al. (2024). Enhanced energy recovery in municipal wastewater treatment plants through co-digestion by anaerobic membrane bioreactors. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, *23*, 385–410. https://doi.org/10.1007/s11157-024-09691-6
8. Cecconet, D., & Capodaglio, A. G. (2022). Sewage sludge biorefinery for circular economy. *Sustainability*, *14*(22), 14841. https://doi.org/10.3390/su142214841
9. Song, X., Li, P., Zhang, B. et al. (2025). Realization approaches for constructing energy self-sufficient wastewater treatment plants: a review. *Carbon Neutrality*, *4*, 21. https://doi.org/10.1007/s43979-025-00133-y
10. Zamfir, F.-S., Carbureanu, M., & Mihalache, S. F. (2025). Application of Machine Learning Models in Optimizing Wastewater Treatment Processes: A Review. *Applied Sciences*, *15*(15), 8360. https://doi.org/10.3390/app15158360
11. Mittal, Y., Srivastava, P., Pandey, S., Yadav, A. K. (2023). Development of Nature-based Sustainable Passive Technologies for Treating and Disinfecting Municipal Wastewater. *Science of The Total Environment, 900*, 165320. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165320
12. Singh, A., Singh, S., Parashar, D. et al. (2025). A Review on Sustainable Enhancement in Microbial Dynamics and Pollutant Removal in Constructed Wetlands: The Role of Agricultural Waste-Derived Biochar. *Water, Air, & Soil Pollution, 236*, 897. https://doi.org/10.1007/s11270-025-08543-5
13. Zhang, S., Li, Q., Gu, P. et al. (2025). Full-scale mainstream partial nitritation/anammox process: A three-year demonstration for municipal wastewater treatment. *Water Research X, 29*, 100419. https://doi.org/10.1016/j.wroa.2025.100419
14. Kanadasan, G., Ng, C. A., Vadivelu, V. M., & Bashir, M. J. K. (2025). Advances in the Application of Aerobic Granular Sludge for the Removal of Emerging Contaminants in Municipal and Industrial Wastewater. *Molecules, 30*(17), 3522. https://doi.org/10.3390/molecules30173522
15. Shen, Y., Li, H., Zhang, B. et al. (2023). An Artificial Neural Network-Based Data Filling Approach for Smart Operation of Digital Wastewater Treatment Plants. *Environmental Research, 224*, 115549. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115549

ГЛОБАЛЬНІ ВОДНІ РЕСУРСИ: ОСНОВНІ ПРОБЛЕМИ

Ігор Прокопенко, аспірант 3-го року навчання [1] (ORCID: 0009-0009-0129-3283),
Олена Жукова доцент, к.т.н., доцент [1] (ORCID: 0000-0003-0662-9996),
Павло Старжинський, аспірант 3-го року навчання [1] (ORCID: 0009-0004-4495-9309),
[1] Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. *У представленій роботі проведено комплексний аналіз сучасного стану світових водних ресурсів, висвітлено ключові чинники, що зумовлюють загострення водної кризи, та окреслено стратегічні напрями подолання дефіциту прісної води. Вода є унікальним природним ресурсом, який протягом геологічної історії створив умови для існування життя на Землі. Проте сьогодні, в умовах інтенсивного науково-технічного прогресу та демографічного вибуху, питання забезпечення якісною водою стає одним із найгостріших викликів для людства. Хоча вода формально є відновлюваним ресурсом, її доступність у багатьох регіонах світу вже досягла критичної межі. Незважаючи на те, що планета вкрита водою, переважна її частина — це солоні води Світового океану. Прісна вода, необхідна для функціонування біосфери, становить лише 2,5% від загального обсягу. Найбільш тривожним фактором є те, що безпосередньо доступна для використання прісна вода складає лише 0,3% від цих запасів. Основним джерелом відновлюваної води є річковий стік, загальний обсяг якого становить 42 780 км³/рік.*

Ключові слова: *водні ресурси; дефіцит прісної води; річковий стік; забруднення підземних вод; раціональне водокористування; антропогенний вплив.*

Вступ. Серед природних ресурсів вода займає виняткове місце. Протягом багатовікової геологічної історії вона створила на нашій планеті умови, сприятливі для існування всього живого, зокрема і людей. Однак проблема забезпечення чистою водою та збереження водних ресурсів стає дедалі гострішою у процесі розвитку суспільства. З науково-технічним прогресом зростають масштаби впливу на природне середовище, що ускладнює ситуацію.

Вода є обмеженим і водночас потенційно відновлюваним природним ресурсом. Проте на сьогодні у багатьох регіонах світу бракує води, придатної для питного споживання, промислових потреб і зрошення. У зв'язку з розвитком промисловості та збільшенням чисельності населення виникла нагальна необхідність більш раціонально управляти водними ресурсами. Це важливо, аби запобігти негативному впливу на здоров'я людей і довкілля.

Забруднення підземних вод може залишатися непоміченим, оскільки забруднювальні речовини часто розчиняються у воді, проникаючи спершу в ґрунт, а потім у підземні резервуари. Основними джерелами значного забруднення вод є житлово-комунальна діяльність, сільське господарство, видобуток і переробка нафти, хімічна промисловість, енергетика, целюлозно-паперове виробництво, сміттєзвалища та неправильно організовані сховища хімічних відходів.

Аналіз літературних джерел. В джерелі [3] дані основні залежності змін показників якості води на прикладі р. Дніпро в межах міста Києва, що показує негативні зміни у якості води за останні роки.

Мета роботи. Проведення комплексного аналізу сучасного стану глобальних водних ресурсів, виявлення ключових чинників дефіциту прісної води та обґрунтування стратегічних підходів до раціонального управління водокористуванням..

Матеріали і методи. Для розробки цієї теми було використано наступні матеріали та методи дослідження: картографічні та графічні джерела, звіти міжнародних організацій, статистичні дані, статистичні методи, порівняльний аналіз, прогностичний метод.

Виклад основного матеріалу. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), найбільш серйозними неорганічними забруднювачами питної води у світі визнано миш'як та фтор. Металоїд миш'як часто трапляється у природних умовах у ґрунтових водах, особливо в Азії — зокрема, в Китаї, Індії та Бангладеш. На рівнині Ганг, що розташована на півночі Індії й у Бангладеш, сильне природне забруднення підземних вод миш'яком зачіпає близько 25% свердловин на мілководді у двох регіональних водоносних горизонтах. Крім природних причин, миш'як може

потрапляти у воду через гірничодобувну діяльність або утилізацію шахтних відходів.

Також викликає тривогу природний фторид, здебільшого через поширення використання більш глибоких водоносних шарів: понад 200 мільйонів людей наражаються на ризик через питну воду з підвищеним вмістом фтору. Цей елемент може виділятися з кислих вулканічних порід або вулканічного попелу за умов низької жорсткості води. Високий рівень фтору у воді є серйозною проблемою для таких регіонів, як аргентинські пампаси, Чилі, Мексика, Індія, Пакистан, Східно-Африканський розлом і деякі вулканічні острови, наприклад Тенерифе. У таких місцях флюороз зубів і скелета є поширеним і часто важким явищем.

Підземні води залишаються важливим джерелом прісної води, але водночас вони є досить вразливими до впливу забруднень. Через це необхідно ретельно стежити за будь-якими навіть найменшими змінами у їхньому складі й приділяти більше уваги їх захисту.

Незважаючи на величезний обсяг води на планеті, основна її частина представлена солоними водами Світового океану. Лише 2,5% від загальної кількості води становить прісна вода, життєво необхідна для існування біосфери. Причому доступна для використання прісна вода складає лише 0,3% цього мізерного обсягу. Однак, навіть за такого обмеженого ресурсу, його щорічне використання людством не перевищує 9-9,4% від обсягу світового річкового стоку.

Теоретично це свідчить про те, що загальна кількість водних ресурсів залишається достатньою. Але водночас питання дефіциту води на планеті було визнано одним із найбільших глобальних ризиків — це було офіційно підтверджено під час Всесвітнього економічного форуму в Давосі.

Для розуміння цієї проблематики міжнародні експерти виділили дев’ять ключових екологічних викликів сучасності:

- зміна клімату,
- руйнування озонового шару,
- підкислення океанів,
- використання прісної води,
- порушення циклів азоту і фосфору,
- утрата біорізноманіття,
- трансформація землекористування,
- забруднення атмосфери аерозолями,
- хімічне забруднення довкілля.

До більшості з цих проблем сформульовано граничні планетарні межі. У випадку з використанням прісної води такою межею вважається рівень у 4000 км³/рік. Хоча це лише приблизна оцінка, вона наголошує на критичній ситуації: обсяг споживання води уже наближається до цієї межі, що створює серйозні виклики для суспільства і вимагає нових підходів до управління водними ресурсами.

Річковий стік є найбільш доступним і відновним джерелом водних ресурсів. Об’єм води в річках змінюється протягом 2-3 тижнів, поповнюється опадами та підземними водами, а використовується через стік у моря, випаровування та поповнення підземних водоносних шарів. Його обсяг залежить від опадів, випаровування, проникності ґрунтів, а також наявності озер, заболочених територій і водосховищ у зоні водозбору. Основним обмеженням у використанні є середня кількість опадів у басейні за рік. Загальний обсяг річкового стоку становить 42 780 км³/рік, однак розподілений нерівномірно: Азія (32 %), Південна Америка (28 %), Північна Америка (18 %), Африка (9 %), Європа (7 %), Австралія та Океанія (6 %). При цьому на душу населення показники помітно змінюються через густоту населення, зокрема в Азії.

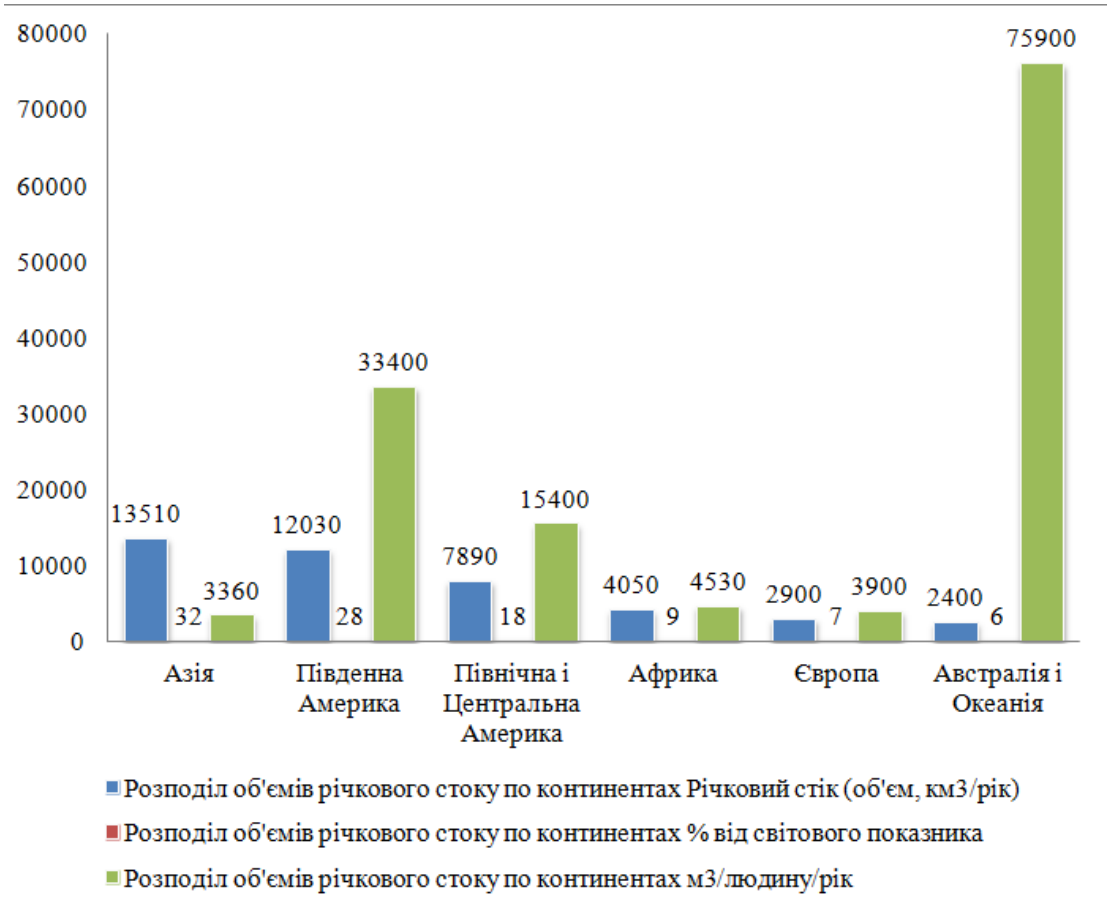


Рис.1. Розподіл об’ємів річкового стоку по континентам

Найбільший річковий стік на планеті спостерігається у таких країнах, із середньорічними об’ємами (км³/рік): Бразилія – 8233, Росія – 4508, США – 3069, Канада – 2902, Китай – 2738, Колумбія – 2132, Індонезія – 2019, Перу – 1913 та Індія – 1911 (рис. 1). Ці держави є справжніми водними гігантами, адже на їхню частку припадає близько 60% світових відновлюваних водних ресурсів.

Обмежений доступ до традиційних водних ресурсів змушує шукати альтернативні джерела води для глобальної стратегії. У регіонах із дефіцитом води вже необхідно впроваджувати нові технології. Серед таких підходів є:

1) опріснення морської та солоних підземних вод;
2) використання ґрунтових вод у зонах із глибокими водоносними шарами;
3) транспортування води танкерами чи айсбергами;
4) збір дощової води у малих масштабах;
5) конденсація роси спеціальними пристроями;
6) очищення стічних вод, використання сірої та зливової води;
7) збір і застосування дренажних вод із сільського господарства.

Для розв'язання проблеми дефіциту водних ресурсів необхідно забезпечити широке міжнародне співробітництво як на регіональному, так і на глобальному рівнях. Починаючи з 1992 року, 22 березня щорічно відзначається як Всесвітній день водних ресурсів. У 1996 році створено Всесвітню водну раду, яка базується у французькому місті Марсель. Раз на три роки проводиться Всесвітній водний форум, який є важливою платформою для вдосконалення співпраці у вирішенні водних проблем. Завдання Форуму полягають не лише в обговоренні актуальних питань і опрацюванні пропозицій для їх розв’язання, а й у формуванні політичних зобов’язань та механізмів міжнародного співробітництва. Разом з тим, як і в інших питаннях глобального масштабу, часто виникають суперечності між загальними інтересами людства та економічними чи політичними пріоритетами окремих країн.

Одним із ключових кроків у врегулюванні цієї проблеми є зміна підходів до водокористування. Нагальною потребою є ізоляція антропогенного водного циклу від природного. По суті це означає впровадження замкнених систем водопостачання, перехід на маловодні або маловідходні технології, а в перспективі — на «сухі» чи безвідходні виробничі процеси. Це сприятиме суттєвому зменшенню обсягів споживаної води і кількості стічних вод, які потребують очищення. Важливо також впроваджувати постійний моніторинг якості вод.

Крім того, необхідно звернути увагу на проблему сміттєвих островів у відкритих водоймах. Це потребує покращення методів переробки відходів і вдосконалення полігонів для складування сміття відповідно до найсучасніших стандартів. Також важливим є посилення нормативів щодо використання води та контролю над скиданням відпрацьованих вод. У цьому контексті особлива увага має бути приділена модернізації очисних споруд і забезпеченню суворого контролю за їх ефективною роботою.

Висновки. Проблема водного дефіциту виникла внаслідок інтенсивного розвитку водного господарства, яке характеризується постійним збільшенням споживання води, забрудненням як поверхневих, так і підземних вод, а також зменшенням водності річок. Для багатьох країн обмеженість водних ресурсів є одним із ключових викликів, що потребує невідкладних і ефективних рішень. Наукові дослідження підтверджують невтішний висновок: глобальне зростання населення та внутрішня міграція сприятимуть посиленню проблеми водного дефіциту. Це призведе до виснаження доступних водних запасів, погіршення санітарно-гігієнічної ситуації та зростання рівня дитячої смертності. Для подолання водної кризи необхідно розробити нові сценарії розвитку водогосподарських інфраструктур на глобальному, державному та регіональному рівнях. Крім того, потрібні інноваційні підходи до управління водними ресурсами.

Список використаних джерел

1. Romashchenko, M. I., Yatsiuk, M. V., & Dehtiar, O. O. Kontseptualni zasady reformuvannia vodnoho hospodarstva Ukrainy [Conceptual principles of reforming water management in Ukraine]. Visnyk ahrarnoi nauky. [in Ukrainian].
2. Zhukova, O., Korduba, I., Prokopenko, I., & Starzhynskyi, P. (2026). Otsinka vplyvu voiennykh dii na vodni ekosystemy [Assessment of the impact of hostilities on aquatic ecosystems]. Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliky, 53, 27–35. https://doi.org/10.32347/2524-0021.2026.53.27-35 [in Ukrainian].
3. Starzhynskyi, P., & Prokopenko, I. (2025). Dynamika zmin pokaznykiv yakosti vody r. Dnipro v mezhakh m. Kyiv [Dynamics of changes in water quality indicators of the Dnipro River within Kyiv]. Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliky, 49, 61–73. https://doi.org/10.32347/2524-0021.2025.49.61-73 [in Ukrainian].
4. Hopchenko, Ye. D., Didenko, H. V., & Dovhych, M. I. (2007). Osoblyvosti bahatorichnoi minlyvosti richnoho stoku deiakykh richok Ukrainy [Features of long-term variability of annual runoff of some rivers of Ukraine]. Naukovi pratsi UkrNDHMI, 256, 223–232. [in Ukrainian].
5. Hrebin, V. V. Otsinka suchasnykh zmin stoku richok baseinu Dnipra (v mezhakh Ukrainy) [Assessment of current changes in river runoff of the Dnipro basin within Ukraine]. Meteorolohiia, klimatolohiia ta hidrolohiia, 50(2), 108–113. [in Ukrainian].

IMPACT OF LEAKS FROM EXTERNAL UTILITY NETWORKS ON CHANGES IN THE HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS OF THE TERRITORY OF THE NATIONAL KYIV-PECHERSK HISTORICAL AND CULTURAL RESERVE

Taranenko Arsenii, Postgraduate (ORCID: 0009-0004-9043-3252)[1],
Iryna Cherevko Candidate of Geological Sciences**,** Head of the Scientific Monitoring Sector (ORCID: 0000-0001-7083-6119)[2],
[1]National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" 37 Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03056, Ukraine
[2]National Kyiv-Pechersk Historical and Cultural Reserve, 9 Lavrska St., Kyiv, 01015, Ukraine

Abstract. *The impact of leaks from external utility networks on changes in the hydrogeological conditions of the territory of the Kyiv-Pechersk Lavra National Reserve was investigated. It was established that accidents in water supply, heating, and sewerage networks cause a rise in groundwater levels, soil waterlogging, and the formation of anthropogenic water flows. Based on the results of hydrogeological monitoring, temperature, and chemical studies, anthropogenic groundwater contamination has been confirmed, specifically an increase in ammonia and salt content, which creates an additional environmental burden on the Reserve's territory. The impact of these processes on the intensification of flooding, subsidence, and landslides, as well as the threat of deformation of architectural monuments, has been identified. The need for comprehensive reconstruction of external utility networks and the application of environmentally safe solutions to preserve the natural environment and cultural heritage sites has been substantiated.*

Key words: *hydrogeological conditions; groundwater contamination; utility network leaks; anthropogenic flooding; groundwater monitoring; environmental impact; cultural heritage preservation; ammonium contamination; landslide processes; waterlogging.*

Introduction. The territory of the Kyiv-Pechersk Lavra National Reserve is characterized by complex engineering-geological and hydrogeological conditions, which are due to the presence of landslide-prone slopes, underground cavities, historic buildings, and an extensive network of utility lines. One of the most dangerous factors for this area is soil waterlogging, caused by both natural processes and man-made leaks from water supply systems. Rising groundwater levels can intensify flooding, subsidence, and landslide processes, posing a threat to architectural monuments, basements, building materials, and wall paintings. At the same time, such leaks pose an environmental hazard, as they contribute to the entry of mineralized wastewater, ammonium compounds, chlorides, heavy metals, and other pollutants into the groundwater, which degrades the condition of the soil, aquifers, and the surrounding natural environment.

Literature Review. The issue of changes in the hydrogeological conditions of the Kyiv-Pechersk Lavra site is addressed in studies devoted to the geotechnical stability of cultural heritage sites, the engineering-geological assessment of adjacent areas, and the chemical composition of groundwater. In particular, study [1] summarizes the results of long-term monitoring of the impact of hydrogeological conditions on the stability of the Kyiv-Pechersk Lavra complex, while report [2] analyzes the engineering-geological and hydrogeological conditions of the territory adjacent to the "Mystetskyi Arsenal" complex. Also of significant importance are the materials on the chemical composition of the groundwater at the NZKPL [3], which allow for the assessment of signs of anthropogenic pollution. Studies [4] and [5] reveal the causes of scale formation in pipelines and the potential for using environmentally safe inhibitors, which is important for understanding the failure rates of utility networks. The regulatory framework for assessing water quality is provided by the State Sanitary Rules and Standards [6]. A synthesis of these sources indicates that changes in groundwater levels, temperature, and chemical composition may be associated with leaks from utility networks, causing flooding and landslides, as well as creating environmental risks due to the entry of ammonium, chlorides, hardness salts, heavy metals, and other pollutants.

Objective of the Study. The aim of this study is to investigate the impact of leaks from external utility networks on changes in the hydrogeological conditions of the Kyiv-Pechersk Lavra National Reserve, as well as to assess the associated engineering, heritage preservation, and environmental risks. To achieve this

goal, the study aims to characterize the current hydrogeological conditions of the territory, analyze natural and anthropogenic factors affecting groundwater regime changes, identify signs of anthropogenic recharge based on water levels, temperature, and chemical composition of the water, assess the connection between the deteriorated condition of the networks along Ivan Mazepa Street and the development of flooding, and justify the need for a comprehensive reconstruction of external water supply systems to reduce threats to architectural monuments and the environment.

Presentation of the Main Material. The hydrogeological regime of the Kyiv-Pechersk Lavra National Reserve is shaped by both natural and anthropogenic factors. The Upper Lavra is characterized by significant depths of the aquifer, seasonal fluctuations in groundwater levels, and a general flow direction from the northwest to the southeast. At the same time, long-term observations indicate that the natural amplitude of groundwater level fluctuations can vary significantly due to leaks from water supply networks, which cause sharp local rises in water levels and the formation of areas of anthropogenic flooding [1]. In the territory of the Lower Lavra, the situation is complicated by the shallow depth of groundwater, the influence of atmospheric recharge, and retaining walls and building foundations, which can act as barriers to underground flow. To gain a spatial understanding of these processes, it is important to consider not only individual wells, but also the overall configuration of groundwater flows, areas of elevated levels, and possible directions of anthropogenic pollution spread. A summary of the hydrogeological situation within the Reserve is presented in Figure 1.

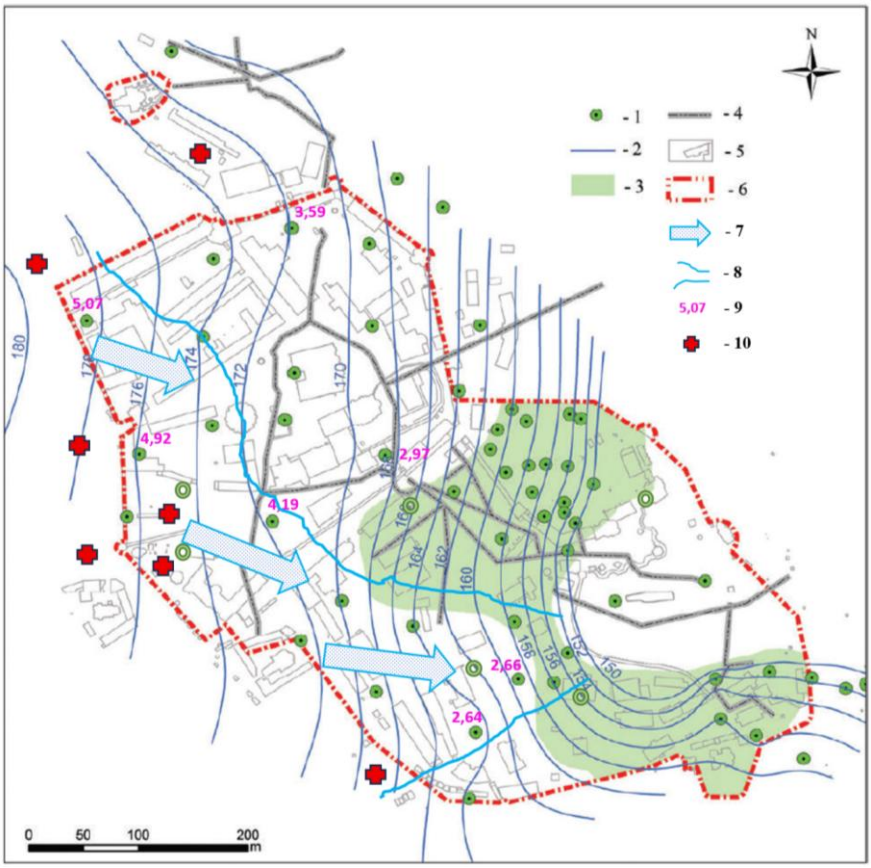


Fig. 1. Hydrogeological situation as of March 2026.

Based on routine monitoring data, it has been determined that one of the most problematic areas is the section along Ivan Mazepa Street, where external utility lines run. It is here that elevated groundwater levels, repeated rises following accidents and repairs, as well as signs of the formation of domes of spreading man-made water are recorded. An analysis of accidents on water-bearing utilities in recent years shows that even after local repairs, the rise in groundwater levels may continue, indicating the inadequacy of “patchwork” damage repairs and the persistence of hidden recharge of the aquifer. Such processes increase the area of flooding, intensify pressure gradients, and create conditions for the intensification of subsidence and landslide processes [1].

Further evidence of human impact is the temperature regime of the groundwater. The dynamics of

these changes can best be traced through the graphs of monitoring observations. They demonstrate that the rise in groundwater levels is not random but recurrent in nature and may persist after local repairs of utility networks. The corresponding changes in groundwater levels in the monitoring wells are shown in Figure. 2.

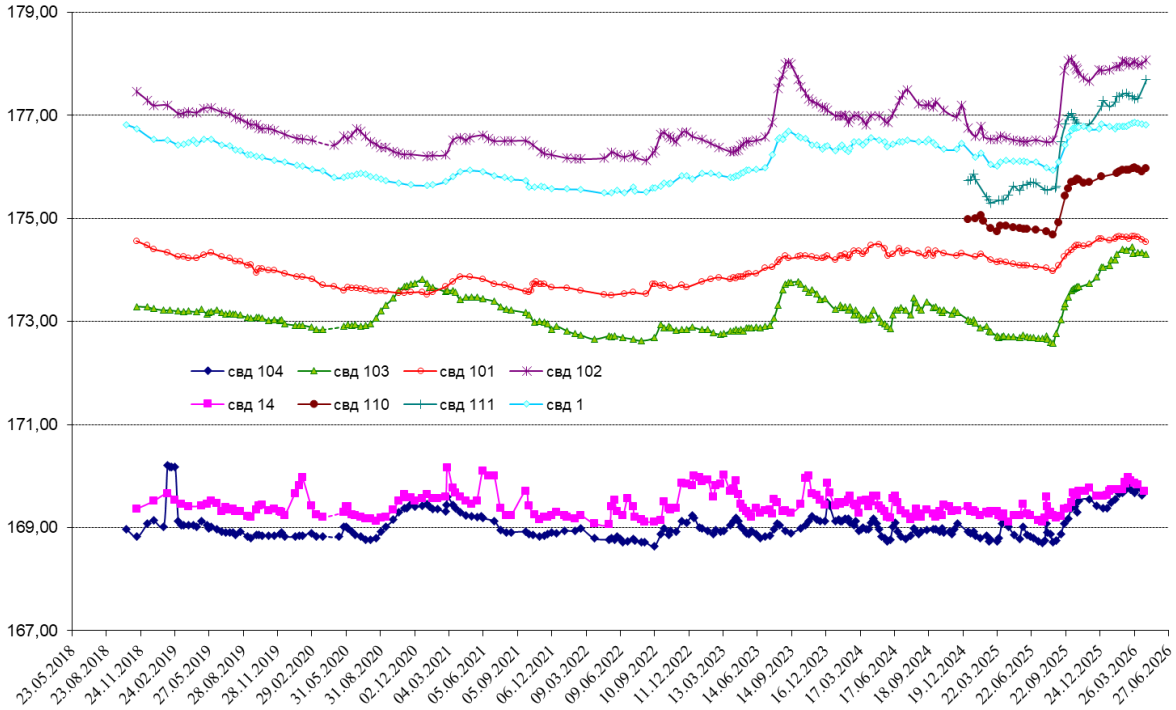


Fig. 2. Groundwater regime within the territory of the Preserve

Under natural conditions, the temperature of groundwater within the Reserve's territory is predominantly 8–13 °C, whereas significantly higher values have been recorded at the bottom of several wells, particularly near Ivan Mazepa Street and the former infectious diseases hospital. Temperatures exceeding 20 °C in well GSS-111 and around 17 °C in GSS-102 may indicate the inflow of water from heating networks and its spread across the groundwater surface in the form of a local dome. Such temperature anomalies are an important indicator of hidden leaks, which do not always manifest on the surface but significantly alter the hydrogeological conditions of the area.

Hydrochemical studies confirm the presence of anthropogenic groundwater contamination. Water samples showed elevated concentrations of ammonium, chlorides, nitrates, sulfates, iron, lead, hardness salts, and total mineralization, indicating the inflow of contaminated water from sewer, water supply, and heating networks [3; 6]. The ammonium content is of particular importance, as its elevated concentrations are often associated with leaks from sewer networks or with anaerobic processes in the aquifer. The spread of ammonium contamination primarily along Ivan Mazepa Street and further in the direction of the underground flow indicates the persistence of anthropogenic sources outside or on the border of the Zapovidnyk territory. From an ecological standpoint, such processes are dangerous because pollutants do not remain localized at the source of the leak, but are carried by the underground flow, altering the natural chemical composition of the aquifer and potentially worsening soil conditions in flood-prone areas.

Another factor contributing to the failure rate of utility networks is the high hardness and mineral content of the water. Elevated levels of calcium and magnesium salts contribute to scale formation on the inner walls of pipes, reduce their flow capacity, increase system pressure, and can lead to deformation or failure of pipelines [4]. This creates a closed technogenic-ecological cycle: the deterioration of the pipeline networks causes leaks, leaks alter the quality of groundwater, and increased water mineralization, in turn, exacerbates the risks of further pipe damage. Under such conditions, it is important to use environmentally safe scale inhibitors, in particular biopolymers based on polyaspartate and other "green" antiscalants, which are biodegradable, do not contain phosphorus, and, if they enter groundwater, should not further increase the anthropogenic load on the environment [5].

Conclusions. The analysis shows that the hydrogeological conditions of the Kyiv-Pechersk Lavra National Reserve depend significantly not only on natural factors but also on the condition of external utility networks. Leaks from water-carrying utilities alter the natural groundwater regime, causing local increases in the water table, the formation of areas of anthropogenic flooding, and an increased risk of subsidence and landslides. The most vulnerable area is along Ivan Mazepa Street, where elevated groundwater levels, temperature anomalies, and signs of anthropogenic recharge of the aquifer have been recorded. Temperature and hydrochemical indicators confirm that the sources of impact may include not only water supply networks but also heating and sewerage networks. Elevated concentrations of ammonium, chlorides, hardness salts, heavy metals, and total mineralization indicate the inflow of contaminated water into the subsurface environment. This has significant ecological implications, as pollution spreads with the groundwater flow, degrades the condition of aquifers and soils, and increases the anthropogenic load on the site and adjacent areas. The data obtained show that the problem of leaks is complex: it simultaneously concerns engineering safety, the preservation of cultural heritage sites, and environmental protection. Local repairs to damaged sections do not address the root cause of the disruption to the hydrogeological regime; therefore, a comprehensive reconstruction of the external water supply networks is advisable, followed by systematic monitoring of groundwater levels, temperature, and chemical composition. This approach will help reduce the risk of flooding, stabilize the hydrogeological situation, and limit further anthropogenic environmental pollution.

References

1. Cherevko, I., Kril, T., Bugai, D., & Shekhunova, S. (2024). Impact of hydrogeological factors on geotechnical conditions of the Kyiv-Pechersk Lavra Monastery complex: lessons from three decades of monitoring. Acque Sotterranee-Italian Journal of Groundwater, 13(3).
2. Kryzkyi, M.M., Koshliakov, O.Ye., & Mandryk, B.M. (2006). Otsinka inzhenerno-heolohichnykh i hidroheolohichnykh umov ta prohnoz mozhlyvosti vynyknennia i rozvytku nehatyvnykh heolohichnykh protsesiv u mezhakh budivelnoho maidanchyka i prylehloi do noho terytorii u zviazku z pidsylenniam fundamentiv ta budivnytstvom dvopoverkhovoi pidzemnoi chastyny Kulturno-mystetskoho ta muzeinoho kompleksu «Mystetskyi Arsenal» [Assessment of engineering-geological and hydrogeological conditions and forecast of the possibility of occurrence and development of negative geological processes within the construction site and adjacent territory in connection with strengthening of foundations and construction of the two-storey underground part of the Cultural-Artistic and Museum Complex “Mystetskyi Arsenal”]: Zvit pro NDR. Kyiv [in Ukrainian].
3. Dramaretskyi, Ye.O., Yaroshenko, K.K., Saprykin, V.Yu., Koliabina, I.L., & Cherevko, I.A. (2025). Osoblyvosti khimichnoho skladu pidzemnykh vod Natsionalnoho zapovidnyka «Kyievo-Pecherska Lavra» [Features of the chemical composition of groundwater of the National Preserve “Kyiv-Pechersk Lavra”]. Materialy XII naukovo-praktychnoi konferentsii «Mineralno-syrovynni bahatstva Ukrainy: shliakhy optymalnoho vykorystannia». Khoroshiv, 34–40. https://doi.org/10.59911/978-617-95457-7-1.2025.5 [in Ukrainian].
4. Hoang, T. A., Ang, M., & Rohl, A. L. (2011). Effects of process parameters on gypsum scale formation in pipes. Chemical engineering & technology, 34(6), 1003-1009.
5. Gao, Y., Fan, L., Ward, L., & Liu, Z. (2015). Synthesis of polyaspartic acid derivative and evaluation of its corrosion and scale inhibition performance in seawater utilization. Desalination, 365, 220-226.
6. Derzhavni sanitarni pravyla i normy 2.2.4-171-10 [State sanitary rules and norms 2.2.4-171-10]. Kyiv: MOZ, 2022 [in Ukrainian].

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ АРЕАЛІВ ЗАБРУДНЕНЬ У ГІДРОСФЕРІ У ЗОНІ ВПЛИВУ ТЕС В УМОВАХ ВОЄННОГО ВПЛИВУ

Наталія Василів, асистент кафедри технології захисту навколишнього середовища та безпеки праці[1] (ORCID: 0000-0002-1561-1141),
[1]Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019

АНОТАЦІЯ. *У роботі досліджено фізико-хімічні процеси формування ареалів забруднення у гідросфері в зоні впливу теплоелектростанцій в умовах воєнного впливу. Проаналізовано закономірності фільтрування та міграції забруднювальних речовин у системі «ґрунт – підземні води – поверхневі води». Розглянуто особливості конвективного переносу, молекулярної дифузії, поздовжньої та поперечної дисперсії під час поширення полютантів у пористих і тріщинуватих середовищах. Встановлено вплив швидкості фільтраційного потоку, гідравлічного градієнта, сорбційних властивостей порід та фізико-хімічних характеристик водного середовища на інтенсивність міграції забруднювачів. Досліджено процеси сорбції, десорбції, механічного затримання та іонообміну, які визначають накопичення і трансформацію токсичних речовин у водоносних горизонтах. Визначено особливості формування зон змішаних вод і розширення ареалів забруднення внаслідок неоднорідності порового середовища та нерівномірності локальних швидкостей руху підземних вод. Обґрунтовано, що в умовах воєнного впливу додаткову небезпеку становить надходження у водне середовище важких металів, продуктів горіння, паливно-мастильних матеріалів та компонентів вибухових речовин, які формують вторинні осередки техногенного забруднення.*

Ключові слова: *гідросфера; міграція полютантів; фільтрація; дисперсія; сорбція; підземні води; техногенне забруднення; екологічний моніторинг.*

Вступ. В умовах воєнного стану та посилення техногенного навантаження особливої актуальності набувають дослідження впливу воєнних дій на об’єкти енергетичної інфраструктури, що є критично важливими для функціонування держави. Руйнування енергетичних об’єктів, ракетні ураження та аварійні ситуації призводять до формування нових джерел забруднення й активізації процесів міграції полютантів у компонентах довкілля. Особливу небезпеку становить поєднання традиційного техногенного забруднення із продуктами воєнного ураження та їх вторинними трансформаціями у системі «ґрунт – вода».

Одним із ключових завдань дослідження є визначення умов міграції забруднювальних речовин у пористих і тріщинуватих породах. Науковою основою таких процесів є теорія масопереносу, яка використовується для опису переміщення полютантів у водоносних горизонтах. Процеси міграції забруднювачів залежать від швидкості фільтрації, градієнта концентрації речовин, структури порового простору та фізико-хімічних характеристик водного середовища.

Основними фізичними процесами, що визначають поширення забруднювальних речовин у підземних водах, є конвективний перенос і дифузійна міграція. Конвективний перенос пов’язаний із рухом забруднювачів разом із потоком підземних вод, тоді як дифузійне перенесення відбувається під впливом градієнта концентрації речовин. Інтенсивність цих процесів може суттєво змінюватися залежно від гідрогеологічних умов, швидкості фільтраційного потоку та характеру техногенного навантаження.

Міграція забруднювальних речовин супроводжується процесами дисперсії, сорбції, окиснення, відновлення та іншими фізико-хімічними перетвореннями, що виникають унаслідок взаємодії полютантів із гірськими породами та підземними водами. У результаті цього формуються ареали забруднення різної конфігурації та інтенсивності, а прогнозування їх поширення ускладнюється неоднорідністю порового середовища і зміною локальних швидкостей руху води.

Однією з причин розсіювання забруднювальних речовин є нерівномірність локальних швидкостей конвективного потоку у пористому середовищі. У різних порах і тріщинах швидкість руху води може істотно відрізнятися, що спричиняє нерівномірне перенесення полютантів і поступове розширення меж забруднення. Унаслідок цього навіть локальне надходження

забруднювальних речовин здатне призводити до формування значних ареалів техногенного впливу у водоносних горизонтах.

Аналіз літературних джерел. Сучасні дослідження підтверджують, що військові дії спричиняють надходження токсичних речовин у довкілля, зокрема важких металів, продуктів згоряння палива та вибухових сполук, які забруднюють ґрунти, підземні та поверхневі води. Вибухи та руйнування інфраструктури викликають не лише хімічне, але й фізичне порушення ґрунтового покриву, зміну його структури, водно-повітряного режиму та посилення міграційних процесів. В Україні ці процеси посилюються попереднім техногенним навантаженням, особливо в промислових регіонах і зонах енергетичних об'єктів. Обстріли теплоелектростанцій спричиняють комбіноване забруднення, що поєднує промислові викиди, теплове навантаження та продукти воєнного ураження. Це формує ризики вторинного забруднення водних ресурсів і довготривалі екологічні загрози. Забруднення ґрунтово-водного середовища в зоні впливу ТЕС в умовах війни є багатофакторною проблемою, пов'язаною з накопиченням золи і шлаків, інфільтрацією забруднених стічних вод та атмосферним перенесенням полютантів. Особливу небезпеку становить міграція важких металів, сульфатів і нітратів у системі «ґрунт – підземні води», що зумовлює деградацію екосистем і погіршення якості водних ресурсів. Система екологічного моніторингу в Україні характеризується фрагментарністю та недостатньою інтегрованістю. Моніторинг вод здійснюється за басейновим принципом, однак контроль ґрунтів обмежений і не забезпечує належної просторово-часової репрезентативності, що ускладнює встановлення причинно-наслідкових зв'язків між джерелами забруднення та станом довкілля.

У країнах ЄС застосовуються інтегровані підходи до моніторингу, що поєднують гідрохімічні, геохімічні та біоіндикаторні методи, використання ГІС і математичного моделювання. Це забезпечує більш точне оцінювання стану довкілля та прогнозування динаміки забруднення. Порівняльний аналіз свідчить, що в Україні недостатньо розвинуті методи комплексного оцінювання взаємодії ґрунтового та водного середовищ у зоні впливу енергетичних об'єктів, зокрема, в умовах військових дій. Існуючі дослідження здебільшого зосереджені на окремих компонентах, що обмежує повне оцінювання екологічного впливу [1–7].

Мета роботи. Дослідження фізико-хімічних процесів формування ареалів забруднення у гідросфері в зоні впливу теплоелектростанцій та визначення закономірностей міграції забруднювальних речовин у системі «ґрунт – підземні води – поверхневі води» в умовах воєнного впливу.

Матеріали і методи. У роботі використано методи аналізу та узагальнення наукових джерел, підходи механіки суцільного середовища, положення закону Дарсі та методи гідрогеологічного аналізу процесів фільтрації і міграції забруднювальних речовин у водоносних горизонтах. Для оцінювання процесів поширення полютантів застосовано фізико-хімічні методи дослідження конвективного переносу, молекулярної дифузії, дисперсії, сорбції та іонообміну у системі «ґрунт – підземні води – поверхневі води».

Виклад основного матеріалу. Одним із ключових процесів формування ареалів забруднення у водоносних горизонтах є фільтрування рідин у пористому середовищі. Під час фільтрації у порах і тріщинах гірських порід формується складна структура потоку, яка визначає закономірності перенесення забруднювальних речовин та їх накопичення у компонентах гідросфери. У природних умовах рух фільтраційного потоку характеризується нерівномірністю та залежить від структури порового простору, гранулометричного складу порід, проникності середовища та фізико-хімічних характеристик забруднювачів.

Для оцінювання закономірностей перенесення полютантів застосовують підходи механіки суцільного середовища, які дозволяють перейти від розгляду локальних потоків у поровому просторі до аналізу узагальненого руху фільтраційного потоку у водоносному горизонті. Основною кінематичною характеристикою фільтрування є швидкість фільтрації ϑ, що визначається як відношення витрати потоку θ до площі поперечного перерізу ω:

$$\vartheta = \frac{\theta}{\omega} \qquad (1)$$

Величина ϑ має розмірність швидкості, проте фактично характеризує витрату фільтраційного потоку і не відображає реальної швидкості руху води, оскільки при її визначенні враховується повна площа поперечного перерізу середовища, а не лише площа порового простору, через який безпосередньо відбувається фільтрація.

Фізико-хімічні процеси сорбції, дифузії, розчинення та хімічної трансформації забруднювачів істотно впливають на характер поширення полютантів у водному середовищі.

Значну роль у формуванні ареалів забруднення відіграють зміни кислотності середовища, мінералізації води та окисно-відновних умов, що визначають рухомість важких металів і токсичних сполук.

В умовах воєнного впливу ці процеси ускладнюються надходженням продуктів горіння, паливно-мастильних матеріалів та компонентів вибухових речовин, які можуть формувати вторинні осередки забруднення.

Процеси фільтрування у водоносних горизонтах описуються законом Дарсі, який встановлює залежність між витратою фільтраційного потоку та градієнтом напору. Для більшості природних умов, рух підземних вод має ламінарний характер, що дозволяє застосовувати основні положення закону Дарсі для оцінювання міграції забруднювальних речовин у пористому середовищі.

Відповідно до закону Дарсі витрата фільтраційного потоку є пропорційною площі поперечного перерізу потоку та градієнту напору. Швидкість фільтрування визначається коефіцієнтом фільтрації та величиною гідравлічного градієнта, що характеризує інтенсивність руху води у водоносному горизонті:

$$\theta = k\omega I, I = \frac{\Delta H}{l} \qquad (2)$$

де θ – витрата фільтрувального потоку з поперечним перерізом ω при градієнті напору I, що являє собою відношення втрати напору ΔH до довжини шляху фільтрування l;

k – коефіцієнт пропорційності (коефіцієнт фільтрування).

Коефіцієнт фільтрації є однією з основних характеристик гірських порід і залежить від гранулометричного складу, пористості, тріщинуватості та фізико-хімічних властивостей середовища.

З урахуванням швидкості фільтрування, закон Дарсі можна представити так:

$$\vartheta = kI \qquad (3)$$

Тобто, швидкість фільтрування пропорційна градієнту напору.

У природних геосистемах процеси фільтрування мають анізотропний характер, тобто швидкість руху потоку може відрізнятися залежно від напряму поширення. Це зумовлено неоднорідністю будови порід, наявністю тріщин, шаруватістю та змінами фізико-хімічних характеристик середовища. В умовах воєнно-техногенного навантаження додатковий вплив на процеси міграції полютантів здійснюють руйнування інженерних споруд, зміна гідрогеологічних умов та надходження нових типів забруднювальних речовин.

Особливу небезпеку становить потрапляння у водне середовище важких металів, продуктів горіння, паливно-мастильних матеріалів і компонентів вибухових речовин, які здатні активно мігрувати у системі «ґрунт – підземні води – поверхневі води». Інтенсивність їх поширення значною мірою визначається швидкістю фільтраційного потоку, сорбційними властивостями порід та фізико-хімічними параметрами водного середовища.

Переміщення забруднювачів у підземних водах значною мірою визначається фізико-хімічними процесами конвективного переносу, молекулярної дифузії та дисперсії.

Забруднені стічні води, атмосферні опади та поверхневі води, що містять техногенні домішки, потрапляючи у водоносний горизонт, витісняють чисті підземні води та переміщуються відповідно до напрямку загального фільтраційного потоку. Такий процес перенесення забруднювальних речовин разом із потоком підземних вод називають конвективним переносом, який є одним із головних факторів формування ареалів забруднення. Інтенсивність поширення полютантів залежить від швидкості фільтрації, коефіцієнта проникності порід та фізико-хімічних характеристик середовища [8-10].

Поширення забруднювальних речовин можливе також унаслідок молекулярної дифузії, яка відбувається під дією градієнта концентрації речовин у різних ділянках водоносного горизонту. Проте швидкість такого перенесення є відносно низькою, тому в більшості випадків дифузійні процеси мають суттєве значення лише за тривалого часу або за умов незначної швидкості фільтрації. Особливо важливими ці процеси є при дослідженні проникнення забруднювальних речовин через ущільнені глинисті шари та інші слабкопроникні середовища.

Важливу роль у формуванні ареалів забруднення відіграє поперечна мікродисперсія, яка виникає внаслідок змішування окремих струменів води у порах і тріщинах гірських порід. Через неоднорідність порового середовища та різну швидкість руху води відбувається переміщення забруднювальних речовин не лише за напрямком фільтраційного потоку, а й у поперечному напрямку.

Поздовжня дисперсія виникає вздовж напрямку руху підземних вод і характеризується розтягуванням фронту забруднення у напрямку потоку. Поперечна дисперсія зумовлює поширення полютантів у напрямках, перпендикулярних до основного потоку, що сприяє розширенню ареалів забруднення. В умовах воєнного впливу ці процеси можуть посилюватися через зміну гідрогеологічних умов, утворення тріщин у породах та надходження нових типів забруднювачів. У результаті, поступово розширюються межі зон забруднення та ускладнюється прогнозування міграції полютантів у системі «ґрунт – підземні води – поверхневі води».

Одним із важливих фізико-хімічних процесів, що визначають формування ареалів забруднення у водному середовищі, є сорбція забруднювальних речовин під час фільтрування підземних вод у пористих середовищах. У процесі руху води через пори та тріщини гірських порід значно збільшується площа контакту водного потоку з поверхнею мінеральних частинок, що сприяє поглинанню та затриманню забруднювальних речовин.

Інтенсивність сорбційних процесів залежить від складу та концентрації домішок, фізико-хімічних властивостей води, гранулометричного складу порід і характеру надходження забруднювачів. Під час фільтрування грубодисперсних і колоїдних частинок може відбуватися їх механічне затримання у поровому просторі, що спричиняє кольматацію порід та зміну фільтраційних характеристик водоносного горизонту. В інших випадках, затримання забруднювачів пов’язане з процесами фізичної адгезії або хімічної сорбції на поверхні мінеральних частинок.

Сорбційні процеси мають важливе значення для поширення техногенного забруднення у системі «ґрунт – підземні води – поверхневі води», оскільки визначають швидкість міграції полютантів та рівень їх накопичення у природному середовищі. Особливо небезпечними є випадки надходження у водоносні горизонти важких металів, нафтопродуктів, продуктів горіння та компонентів вибухових речовин, які можуть тривалий час утримуватися у породах і формувати вторинні осередки забруднення [10-13].

До процесів, подібних до сорбції, належать також явища затримання речовин у так званих «тупикових» порах, а також іонообмінні процеси, які суттєво впливають на зміну хімічного складу підземних вод. У результаті цього змінюються умови міграції забруднювальних речовин, їх рухомість та здатність до накопичення у водному середовищі.

Процеси сорбції під час фільтрування забруднених підземних вод характеризуються складною кінетикою та залежать від великої кількості фізико-хімічних факторів. Інтенсивність поглинання забруднювальних речовин визначається концентрацією домішок у воді, мінералогічним складом порід, структурою порового простору та тривалістю контакту водного потоку із сорбуючою поверхнею. Для опису процесів сорбції застосовують кінетичні залежності, які дозволяють оцінювати швидкість накопичення забруднювальних речовин у породах та прогнозувати їх подальшу міграцію у водоносних горизонтах.

Нелінійний характер сорбційних процесів значно ускладнює математичний опис міграції забруднювачів у підземних водах. Це зумовлено різноманітністю механізмів поглинання, серед яких важливу роль відіграють фізична адгезія, хімічна сорбція, іонообмінні реакції та процеси механічного затримання дрібнодисперсних частинок у поровому просторі. У зв’язку з цим для

прогнозування поширення техногенного забруднення часто використовують узагальнені кінетичні моделі, що враховують основні закономірності сорбційного поглинання під час фільтрування.

У випадку, коли швидкість сорбції обмежується процесами конвективно-дифузійної міграції речовин, параметри кінетичних рівнянь можуть характеризувати інтенсивність поглинання забруднювачів і ступінь їх розподілу між рідкою та твердою фазами. Такі залежності є важливими для оцінювання процесів накопичення полютантів у водоносних горизонтах та визначення потенційної небезпеки вторинного забруднення водного середовища.

Особливе значення процеси сорбції мають у зоні впливу теплоелектростанцій, де у водне середовище можуть надходити важкі метали, нафтопродукти, зольні компоненти, продукти горіння та інші токсичні сполуки. Частина цих речовин здатна тривалий час утримуватися у породах, формуючи приховані осередки техногенного забруднення. За зміни гідрогеологічних або фізико-хімічних умов можливі процеси десорбції, унаслідок яких накопичені забруднювальні речовини знову переходять у водний розчин і продовжують міграцію у системі «ґрунт – підземні води – поверхневі води».

Під час надходження забруднювальних речовин у водоносний горизонт відбувається поступове витіснення природних підземних вод. Унаслідок цього формується зона змішаних вод, у межах якої концентрація забруднювальних речовин змінюється від початкових значень до концентрації потоку забруднення. Межі такої перехідної зони визначаються інтенсивністю фільтраційного потоку, процесами дисперсії та фізико-хімічною взаємодією між забруднювачами і компонентами геологічного середовища.

Особливістю формування ареалів забруднення є те, що навіть за відносно стабільного джерела надходження полютантів конфігурація зони поширення може суттєво змінюватися внаслідок неоднорідності пористого середовища та різної швидкості руху підземних вод. Значний вплив на процеси міграції мають також додаткові джерела інфільтрації, атмосферні опади та зміна гідрогеологічних умов у межах території дослідження.

У зоні впливу теплоелектростанцій такі процеси можуть супроводжуватися надходженням у підземні води продуктів горіння, важких металів, нафтопродуктів та інших токсичних сполук. В умовах воєнного впливу ризики формування великих ареалів забруднення суттєво зростають через пошкодження інженерних споруд, накопичувачів відходів і порушення природних умов дренування територій.

Обговорення. Результати дослідження свідчать, що формування ареалів забруднення у гідросфері в зоні впливу теплоелектростанцій є складним багатофакторним процесом, який визначається поєднанням гідродинамічних, фізико-хімічних та техногенних чинників. Встановлено, що інтенсивність міграції забруднювальних речовин значною мірою залежить від швидкості фільтраційного потоку, неоднорідності порового середовища, сорбційних властивостей порід та фізико-хімічних характеристик водного середовища.

Важливу роль у поширенні полютантів відіграють процеси конвективного переносу, дифузії та дисперсії, які спричиняють розширення зон забруднення у водоносних горизонтах.

Особливу небезпеку в умовах воєнного впливу становить надходження у водне середовище важких металів, продуктів горіння, паливно-мастильних матеріалів та компонентів вибухових речовин, які можуть формувати вторинні осередки техногенного забруднення. Нерівномірність локальних швидкостей руху підземних вод і неоднорідність пористого середовища ускладнюють прогнозування напрямків та інтенсивності поширення полютантів.

Встановлено, що процеси сорбції та десорбції суттєво впливають на накопичення і подальшу трансформацію забруднювальних речовин у водоносних горизонтах. Частина токсичних сполук здатна тривалий час утримуватися у породах, а за зміни гідрогеологічних умов повторно переходити у водний розчин, що підвищує ризик вторинного забруднення гідросфери.

Отримані результати підтверджують необхідність комплексного врахування процесів фільтрації, дифузії, дисперсії та сорбції під час оцінювання екологічного стану водного середовища в зоні впливу теплоелектростанцій. Це є важливою передумовою для вдосконалення системи екологічного моніторингу, прогнозування поширення техногенного забруднення та розроблення ефективних природоохоронних заходів в умовах воєнно-техногенного навантаження.

Висновки. У роботі досліджено особливості формування ареалів забруднення у гідросфері в зоні впливу теплоелектростанцій в умовах воєнного впливу. Встановлено, що процеси міграції забруднювальних речовин у системі «ґрунт – підземні води – поверхневі води» визначаються поєднанням фільтраційних, дифузійних, дисперсійних та сорбційних процесів.

Визначено, що швидкість поширення полютантів залежить від гідравлічного градієнта, фільтраційних властивостей порід, неоднорідності порового середовища та фізико-хімічних характеристик водного середовища. Встановлено важливу роль сорбційно-десорбційних процесів у накопиченні та вторинній міграції токсичних речовин у водоносних горизонтах.

Обґрунтовано, що в умовах воєнного впливу додаткову небезпеку для гідросфери становлять важкі метали, продукти горіння, паливно-мастильні матеріали та компоненти вибухових речовин, які можуть формувати вторинні осередки техногенного забруднення.

Отримані результати можуть бути використані для оцінювання екологічного стану водного середовища, прогнозування поширення забруднювальних речовин та вдосконалення системи екологічного моніторингу в зоні впливу теплоелектростанцій.

Список використаних джерел

1. Koshliakova, T., Zlobina, K., & Kuraieva, I. (2023). Ecological and geochemical aspects of interlayer water use for potable water supply of urban population: A case study in the Dnieper–Donetsk aquifer system, Ukraine. Acta Geochimica, 42, 1–17. https://doi.org/10.1007/s11631-023-00604-y
2. Kuraieva, I. V., Koshliakova, T. O., Vovk, K. V., & Zlobina, K. S. (2021). Osoblyvosti rozpodilu vazhkykh metaliv u komponentakh dovkillia parkovykh urbolandshaftiv mista Kyieva [Features of the distribution of heavy metals in environmental components of urban park landscapes of Kyiv]. Mineralohichnyi zhurnal, 43(2), 58–73. https://doi.org/10.15407/mineraljournal.43.02.058 [in Ukrainian].
3. Mykytsei, M., Kundelska, T., Yatsyshyn, T., & Hrytsuliak, H. (2024). Research on the level of "urban stream syndrome" in small streams of urbanized areas using the example of the Mlynivka River (Ivano-Frankivsk City). In V. Babak & A. Zaporozhets (Eds.), Systems, Decision and Control in Energy VI: Volume II. Power Engineering and Environmental Safety (Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 552, pp. 613–627). Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-67091-6_29
4. Kundelska, T. V., Mykytsei, M. T., Gritsylak, G. M., & Yatsyshyn, T. M. (2024). Assessment of aesthetic and ecological functions of the urbanized part of small watercourses of Mlynivka and Radchanka by the indicator of visual quality of the environment. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1415, Article 012092. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1415/1/012092
5. Keegan, T. J., Farago, M. E., Thornton, I., Hong, B., Colvile, R. N., Pesch, B., Jakubis, P., & Nieuwenhuijsen, M. J. (2006). Dispersion of As and selected heavy metals around a coal-burning power station in central Slovakia. Science of the Total Environment, 358(1–3), 61–71. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.03.020
6. Kotsyubynsky, A., Kozan, N., Hrytsuliak, H., Dovhalyuk, O., Marych, T., Hryshchuk, M., & Kotsyubynska, J. (2025). Assessment of the chemical composition of contaminated soils around bases for long-term storage of rocket oxidizers and petroleum products. In Systems, Decision and Control in Energy VII: Volume II. Power Engineering and Environmental Safety (pp. 637–646). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90466-0_28
7. Lopushniak, V., Hrytsuliak, H., Lynnyk, D., Shymanskyi, V., Solodjuk, Y., Kostyshyn, A., & Kostyshyn, Z. (2025). Innovative approaches to cleaning the soil from oil products. In Systems, Decision and Control in Energy VII: Volume II. Power Engineering and Environmental Safety (pp. 627–636). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90466-0_27
8. Khobotova, E. B., Larin, V. I., & Hraivoronska, I. V. (2020). Evaluation of soil contamination by heavy metals in the zone of TPP influence. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, 51, 243–253. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-51-18
9. Krainiukov, O., Kryvytska, I., & Naidonova, O. (2023). Ekoloho-toksykolohichna otsinka yakosti gruntiv, yaki znakhodiatsia pid vplyvom Zmiivskoi TES [Ecological and toxicological assessment of the quality of soils affected by Zmiivska TPP]. Molodyi vchenyi, 12(124), 12–16. https://doi.org/10.32839/2304-5809/2023-12-124-22 [in Ukrainian].
10. Hrytsuliak, H., Kotsyubynsky, A., Zaritskyy, V., Solomchak, D., Lynnyk, D., Kalyn, T., & Bohdan, H. (2025). Revitalization of oil-polluted soils by growing phytoremediation plants. In Systems, Decision and Control in Energy VII: Volume II. Power Engineering and Environmental Safety (pp. 617–625). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90466-0_26
11. Koshliakova, T. O., Koshliakov, O. Ye., & Shvaika, I. D. (2022). Ekoloho-heokhimichnyi stan poverkhnevykh i prypoverkhnevykh vod mista Kyieva [Ecological and geochemical state of surface and near-surface waters of Kyiv]. Heokhimiia tekhnohenezu, 7(35), 61–64. https://doi.org/10.32782/geotech2022.35.11 [in Ukrainian].
12. Shlikhter, O., Kosohina, I., & Kosohin, O. (2024). Monitorynh yakosti vody v Ukraini ta vplyv viiny na yii yakist [Water quality monitoring in Ukraine and the impact of war on its quality]. Tekhnichni nauky ta tekhnolohii, 4(38), 234–244. https://tst.stu.cn.ua/article/view/323811 [in Ukrainian].

13. Mandryk, O. M., Okhariev, V. O., Trysniuk, T. V., & Mykhailiuk, R. Y. (2022). Monitorynh zabrudnennia baseinu Dnistra vnaslidok pidtoplen ta inshykh nadzvychainykh sytuatsii [Monitoring of pollution of the Dniester basin due to flooding and other emergencies]. Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia, 43(3), 35–42. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.3.35-42 [in Ukrainian].

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ІОННОГО ОБМІНУ ПРИ ДЕМІНЕРАЛІЗАЦІЇ ВОДИ

Давід Ковтун, аспірант[1], (ORCID: 0009-0001-8911-4148),
[1] Національний університет цивільного захисту України, вулиця Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, Україна

АНОТАЦІЯ. *З метою підвищення рівня екологічної безпеки процесу демінералізації природних вод у системах водопідготовки запропоновано технологію інтенсифікації методів іонного обміну, яка полягає у модифікації іонообмінної установки магнітним полем. Розроблено лабораторну установку, яка включає іонообмінну колонку електромагніт та блок керування. Встановлено параметри установки для проведення експериментальних досліджень, визначено основні характеристики магнітної котушки та режими її роботи. Представлено математичну модель на основі поліноміальної функції. Побудова математичної моделі розроблялась за методом центрально-композиційного планування для збору, аналізу експериментальних даних та оптимізації процесів технології. Запропонований підхід дозволяє оцінити вплив магнітного поля на процеси іонного обміну, визначити раціональні параметри роботи установки та може бути використаний для подальшого вдосконалення технологій водопідготовки й очищення природних вод.*

Ключові слова: *іонний обмін; магнітне поле; інтенсифікація; лабораторна установка, демінералізація.*

Вступ. Використання іонного обміну при демінералізації природних вод є найбільш ефективним та економічно доцільним. Необхідність регенерації іонообмінних матеріалів, не достатня ефективність видалення забруднюючих елементів із води, викликають додаткове навантаження на оточуюче середовище. Територія України регулярно піддається впливу значного забруднення, через агресію росії проти України. Як зазначається в дослідженнях такі області, як Харківська та Миколаївська стикаються із значним забрудненням водних об'єктів та не достатньою кількістю придатної для споживання води за рахунок руйнування логістичних шляхів доставки та систем водопостачання [1,2]. Здобувають поширення використання магнітного іонного обміну. Суть полягає у використання іонообмінних смол модифікованиц частичками магнетиту. За рахунок використання магнітно підсиленої аніонообмінна смола та звичайної катіонообмінної смоли, обробка підземних вод досягла підвищення рівня видалення розчиненого вуглецю та іонів жорсткості [3]. Як зазначається в роботі [4], використання магнітного поля у системах водопідготовки є актуальним методом для підвищення рівня екологізації процесу очищення води

Аналіз літературних джерел. Питання інтенсифікації хімічних процесів є актуальним напрямом наукових досліджень [5-9]. Технологія магнітного впливу може застосовуватись у системах водоочищення та водопідготовки, сприяючи кристалізації $CaCO_3$, зниженню росту патогенних організмів і підвищенню ефективності очищення води за рахунок зменшення навантаження на іонообмінні матеріали. Вплив магнітного поля пов'язаний зі зміною фізико-хімічних властивостей дисперсних частинок. Водночас використання лише магнітного поля без поєднання з іншими методами очищення не забезпечує достатнього рівня демінералізації води [10,11]. Магнітне поле впливає переважно на фізичні властивості води та перебіг іонообмінних процесів, зокрема сприяє утворенню молекулярних кластерів, зміні розчинності солей і кінетики обміну. Також магнітна активація може модифікувати гідратні оболонки іонів, впливаючи на їх рухливість та взаємодію з іонообмінними матеріалами. Наукові погляди щодо ефективності магнітної обробки води залишаються неоднозначними. Частина дослідників вказує на зміну фізичних властивостей води під дією магнітного поля, тоді як інші не підтверджують його впливу на pH, електропровідність чи жорсткість води [12]. Результати досліджень свідчать, що

електромагнітне поле переважно сприяє формуванню об'ємних кристалів і зменшує їх осадження на поверхнях обладнання. Водночас ефективність магнітної обробки значною мірою залежить від складу води, параметрів потоку та конструктивних особливостей системи [13,14]. Вплив магнітного поля на рідину та розчинені в ній іони пояснюється комплексом фізико-хімічних механізмів, зокрема дією сили Лоренца та сил Кельвіна, які визначають зміну кінетичних і термодинамічних характеристик водних систем під дією магнітного поля [15].

Мета роботи. Підвищення рівня екологічної безпеки процесів демінералізації природних вод у системах водопідготовки шляхом інтенсифікації іонообмінних процесів під впливом магнітного поля. Розроблення модифікованої магнітним полем іонообмінної установки для дослідження впливу магнітного поля на процеси іонного обміну.

Матеріали і методи. В межах проведення дослідження було використано науково-технічну та довідникову літературу. Розроблена іонообмінна установка, обладнана мангітною котушкою, з елементами електронного керування та контролювання. Для виконання роботи використано метод аналізу та узагальнення літератури, метод інженерного моделювання та конструювання.

Виклад основного матеріалу. Відповідно до завдання роботи, спрямованого на підвищення рівня екологічної безпеки процесу демінералізації природних вод у системах водопідготовки, обрано напрям інтенсифікації процесів іонного обміну.

З цією метою запропоновано метод інтенсифікації із застосуванням магнітного поля, яке впливає як на іонообмінні матеріали, так і на воду, що підлягає очищенню. Для дослідження двофакторної системи з урахуванням нелінійних ефектів обрано центрально-композиційний план експерименту (ЦКП). Визначений план є одним із найбільш поширених і теоретично обґрунтованих методів побудови регресійних моделей другого порядку та широко застосовується у фізико-хімічних і технологічних дослідженнях.

Методика реалізації. Побудовано центрально-композиційний план експерименту для двох факторів: концентрації іонів (X_1) та напруженості магнітного поля (X_2). План дає можливість оцінити лінійні, квадратичні та взаємодіючі ефекти факторів у регресійній моделі другого порядку, а також виміряти чисту похибку [16]. Для оцінки впливу магнітного поля на процеси іонного обміну запропоновано математичну модель на основі поліноміальної функці (1)

$$Y(X_1,X_2)=F_1\cdot X_1\cdot X_2^2+F_2\cdot X_1\cdot X_2+F_3\cdot X_2^2+F_4\cdot X_1+F_5\cdot X_2+F_6, \quad (1)$$

де: Y - повна обмінна ємність іоніту; X_1 - вміст іонів; X_2 - напруженість магнітного поля; $F_1 \dots F_6$ - коефіцієнти моделі, визначені методом найменших квадраті.

Схему технологічної установки, що реалізує запропонований підхід, наведено на рис.1.

Рис.1. магніто-модифікована іонообмінна лабораторна установка.

Опис рисунка 3.2: 1 – акрилова колона; 2 – обмотка котушки; 3 – цифровий вольтметр; 4 – водяний насос, 5 – модуль XL4015; 6 – металевий сердечник; 7 – ПВХ-трубки для подачі та відведення розчинів: Ø 5 мм та Ø 8 мм

Визначена максимальна потужність магнітної котушки P = 4,8W,силі струму I = 2 A. Розрахован магнітне поле B = $2{,}01\cdot10^{-3}$ T.

Обговорення. Вплив магнітного поля зумовлений не окремим механізмом, а сукупною дією

електромагнітно-індукованих змін у прикордонній області, дегідратації оболонок іонів, перерозподілу іонів, у приповерхневій зоні та мікрогідродинамічних збурень у пористому середовищі.

Таким чином, інтенсифікація масопереносу має багатофакторну природу і не може бути інтерпретована як наслідок одного домінуючого механізму, а є результатом їх взаємного накладання в умовах дії магнітного поля. Експериментальні дослідження на розробленій лабораторній установці дають змогу підтвердити, або спростувати визначені твердження.

Висновки. Для підвищення рівня екологічної безпеки процесу демінералізації природних вод запропоновано метод інтенсифікації іонообмінних процесів шляхом модифікації іонообмінної установки магнітним полем. Для дослідження впливу магнітного поля на процеси іонного обміну обрано центрально-композиційний план експерименту та запропоновано математичну модель другого порядку, яка дозволяє аналізувати експериментальні дані й оптимізувати параметри процесу демінералізації води. Розроблено лабораторну магніто-модифіковану іонообмінну установку, що включає іонообмінну колонку, магнітну котушку та систему електронного керування. Визначено основні параметри установки для проведення експериментальних досліджень, зокрема максимальну потужність котушки 4,8 Вт, силу струму 2 А та магнітну індукцію $2{,}01 \cdot 10^{-3}$ Т.

Список використаних джерел

1. Shumilova, O., Tockner, K., Sukhodolov, A., et al. (2023). Impact of the Russia–Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. Nature Sustainability, 6, 578–586. https://doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x [in English].
2. Noorali, H., Zaki, Y., Campana, M., et al. (2025). Hydropolitics of Russian-Ukrainian war: Analyzing water governance conflicts in the Dnieper River basin through remote sensing techniques. GeoJournal, 90, 115. https://doi.org/10.1007/s10708-025-11338-0 [in English].
3. Comstock, S. E. H., & Boyer, T. H. (2014). Combined magnetic ion exchange and cation exchange for removal of DOC and hardness. Chemical Engineering Journal, 241, 366–375. https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.10.073 [in English].
4. Dushkin, S., & Shevchenko, T. (2020). Applying a modified aluminum sulfate solution in the processes of drinking water preparation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(10(106)), 26–36. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.210096 [in English].
5. Stankiewicz, A. I., & Moulijn, J. A. (2000). Process intensification: Transforming chemical engineering. Chemical Engineering Progress, 96(1), 22–34. Available at: https://rapid.aiche.org/sites/default/files/news/files/010022_cep_stankiewicz.pdf [in English].
6. Becht, S., Franke, R., Geißelmann, A., & Hahn, H. (2009). An industrial view of process intensification. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 48(1), 329–332. https://doi.org/10.1016/j.cep.2008.04.012 [in English].
7. Lutze, P., Gani, R., & Woodley, J. M. (2010). Process intensification: A perspective on process synthesis. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 49(6), 547–558. https://doi.org/10.1016/j.cep.2010.05.002 [in English].
8. Ponce–Ortega, J. M., Al–Thubaiti, M. M., & El–Halwagi, M. M. (2012). Process intensification: New understanding and systematic approach. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 53, 63–75. https://doi.org/10.1016/j.cep.2011.12.010 [in English].
9. Reay, D., Ramshaw, C., & Harvey, A. (2013). Process intensification: Engineering for efficiency, sustainability and flexibility (2nd ed.). Butterworth–Heinemann. Available at: https://books.google.com.ua/books?hl=en&lr=&id=QV_U0Kbhh1UC&oi=fnd&pg=PP1 [in English].
10. Zaidi, N. S., Sohaili, J., Muda, K., & Sillanpää, M. (2013). Magnetic field application and its potential in water and wastewater treatment systems. Separation & Purification Reviews, 43(3), 206–240. https://doi.org/10.1080/15422119.2013.794148 [in English].
11. Li, Q., Wu, J., Hua, M., et al. (2017). Preparation of permanent magnetic resin crosslinking by diallyl itaconate and its adsorptive and anti–fouling behaviors for humic acid removal. Scientific Reports, 7, 17103. https://doi.org/10.1038/s41598-017-17360-8 [in English].
12. Cai, R., Yang, H., He, J., & Zhu, W. (2009). The effects of magnetic fields on water molecular hydrogen bonds. Journal of Molecular Structure, 938(1–3), 15–19. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2009.08.037 [in English].
13. Alimi, F. (2024). Influence of Magnetic Field on Calcium Carbonate Precipitation: A Critical Review. Magnetochemistry, 10(11), 83. https://doi.org/10.3390/magnetochemistry10110083 [in English].
14. Kovtun, D. E., & Dushkin, S. S. (2024). Magnetic modification of ion exchange processes. Technogenic and Ecological Safety, 15(1/2024), 75–79. https://doi.org/10.52363/2522-1892.2024.1.8 [in Ukrainian].

15. MIT OpenCourseWare. (2009). Electromagnetic forces [Chapter 5]. In 6.013 Electromagnetics and applications. Massachusetts Institute of Technology. Available at: https://ocw.mit.edu/courses/6-013-electromagnetics-and-applications-spring-2009/d3be4ea78b036a6362230fb41780cf54_MIT6_013S09_notes.pdf [in English].
16. Kvietnyi, R. N., Bohach, I. V., Boiko, O. R., Sofina, O. Yu., & Shushura, O. M. Komp'iuterne modeliuvannia system ta protsesiv [Computer modeling of systems and processes]. Vinnytsia National Technical University. Available at: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/2kvetnyj_komp%27yuterne_modelyuvannya_system_procesiv/t2/514..htm [in Ukrainian].

РОЛЬ ЕКОЛОГІЧНОЇ БІОТЕХНОЛОГІЇ У ПЕРЕХОДІ ДО НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ ЕКОНОМІКИ (НА ПРИКЛАДІ КУЛЬТИВУВАННЯ CHLORELLA VULGARIS)

Любов Венгер, доцент, к.т.н., доцент [1, 2] (ORCID: /0000-0002-3758-7891),
Каріна Бєлоконь, доцент, к.т.н., доцент [1] (ORCID: / 0000-0003-2000-4052),
Катерина Розсоха, здобувач вищої освіти[1] (ORCID: /0009-0006-5291-6047),
Марія Брик, здобувач вищої освіти[1],
[1] Запорізький національний університет, вул. Університетська, 66, 69600, Україна
[2] Національний університет «Львівська політехніка», площа Св. Юра 3/4, 79013, Україна

АНОТАЦІЯ. *Глобальне потепління є однією з найактуальніших екологічних проблем сучасності, що супроводжується підвищенням середньої температури планети, зміною кліматичних режимів, деградацією екосистем та зростанням частоти екстремальних погодних явищ. Основною причиною цих змін є зростання концентрації парникових газів, насамперед вуглекислого газу (CO_2), в атмосфері. У роботі розглянуто можливості застосування біотехнологій для зниження антропогенного навантаження на довкілля, зокрема використання мікроводоростей для біологічної фіксації CO_2. Проаналізовано сучасні методи культивування мікроводоростей, особливості використання фотобіореакторів та перспективи застосування мембранних фотобіореакторів для підвищення ефективності газообміну. Встановлено, що використання мікроводоростей є перспективним напрямом у боротьбі зі зміною клімату завдяки високій швидкості фотосинтезу, здатності до інтенсивного поглинання CO_2 та можливості подальшого використання отриманої біомаси.*

Ключові слова: *глобальне потепління; біотехнологія; мікроводорості; CO_2; фотобіореактор; зміна клімату.*

Вступ. Глобальна зміна клімату є наслідком інтенсивного зростання концентрації парникових газів у атмосфері, що зумовлено промисловим розвитком, спалюванням викопного палива, транспортом та неефективним поводженням з відходами. Підвищення рівня CO_2 призводить до посилення парникового ефекту, зміни гідрологічного режиму, танення льодовиків та втрати біорізноманіття.

У зв'язку з цим актуальним є впровадження екологічно безпечних технологій скорочення викидів парникових газів. Одним із перспективних напрямів є використання біотехнологічних методів, зокрема мікроводоростей, здатних ефективно поглинати CO_2 у процесі фотосинтезу.

Аналіз літературних джерел. Сучасні дослідження свідчать про високий потенціал мікроводоростей у зниженні концентрації CO_2 та виробництві біомаси для подальшого використання в енергетиці, фармацевтиці та харчовій промисловості. Вивчаються різні методи культивування мікроводоростей: відкриті системи, фотобіореактори, мембранні біореактори та гібридні технології.

Мета роботи. Дослідити можливості застосування біотехнологій для запобігання наслідкам глобального потепління шляхом використання мікроводоростей для біологічної утилізації вуглекислого газу.

Матеріали і методи. Основними матеріалами дослідження є наукові публікації з біотехнології, екології та кліматичних змін, а також результати експериментальних досліджень культивування Chlorella vulgaris у фотобіореакторах.

У роботі використано:

– аналіз і синтез наукової літератури;

– порівняльний аналіз технологій культивування;

– оцінку ефективності поглинання CO_2.

Виклад основного матеріалу. Біотехнологія охоплює широкий спектр екологічних рішень: виробництво біопалива, очищення стічних вод, біоремедіацію забруднених територій та переробку відходів.

Біопаливо другого та третього покоління, отримане з біомаси та мікроводоростей, характеризується нижчим вуглецевим слідом порівняно з викопним паливом. Генетична інженерія дозволяє створювати культури з покращеною здатністю до фіксації вуглецю та стійкістю до кліматичних стресів.

Мікроводорості є високоефективними фотосинтезуючими організмами, здатними поглинати великі обсяги CO_2 та перетворювати його на органічну речовину.

Основні етапи фотосинтезу:

– поглинання світла хлорофілом;

– фотоліз води;

– фіксація CO_2 у циклі Кальвіна.

Отримана біомаса може використовуватися для:

1. виробництва біопалива;
2. кормових добавок;
3. фармацевтичної продукції;
4. біологічно активних речовин.

Для культивування мікроводоростей застосовують відкриті та закриті системи вирощування. До відкритих систем належать ставки, лагуни та канали, які характеризуються відносно низькими експлуатаційними витратами та простотою конструкції. Проте їх використання супроводжується низкою обмежень, серед яких недостатній контроль параметрів середовища, ризик контамінації сторонніми мікроорганізмами та залежність від кліматичних умов.

Більш ефективними вважаються закриті системи культивування, зокрема фотобіореактори, які забезпечують можливість точного регулювання основних технологічних параметрів, таких як температура, інтенсивність освітлення, концентрація вуглекислого газу, рівень pH та аерація культурального середовища. Це створює оптимальні умови для росту мікроводоростей, підвищення продуктивності біомаси та інтенсифікації фотосинтетичних процесів.

Особливу увагу в сучасних дослідженнях приділяють мембранним фотобіореакторам, які забезпечують покращення газообміну завдяки використанню порожнистих волоконних мембран. Застосування таких систем сприяє збільшенню площі контакту газової фази з культуральним середовищем, що підвищує ефективність масопереносу CO_2 та оптимізує процес фотосинтетичної фіксації вуглекислого газу.

Експериментальні дослідження із застосуванням Chlorella vulgaris показали, що оптимальна концентрація CO_2 у вхідному газовому потоці становить близько 1,0 %. За таких умов швидкість фіксації вуглекислого газу зростає з 80 до 260 мг/л·год, що свідчить про значне підвищення ефективності процесу порівняно зі звичайними фотобіореакторами.

Крім того, мембранні системи забезпечують ефективне видалення надлишкового кисню, який накопичується внаслідок фотосинтезу та може пригнічувати ріст клітин мікроводоростей.

Як показано на рис. 1, застосування мембранного фотобіореактора дозволяє суттєво підвищити швидкість фіксації CO_2 порівняно зі звичайною системою культивування.

Мембранні фотобіореактори можуть бути використані на промислових підприємствах для очищення газових викидів, у закритих приміщеннях для регулювання концентрації CO_2, а також у біорегенеративних системах життєзабезпечення.

Окрім фіксації CO_2, біомаса мікроводоростей здатна асимілювати оксиди азоту (NO_x), перетворюючи їх на нітратне живлення, та частково зв'язувати діоксид сірки (SO_2).

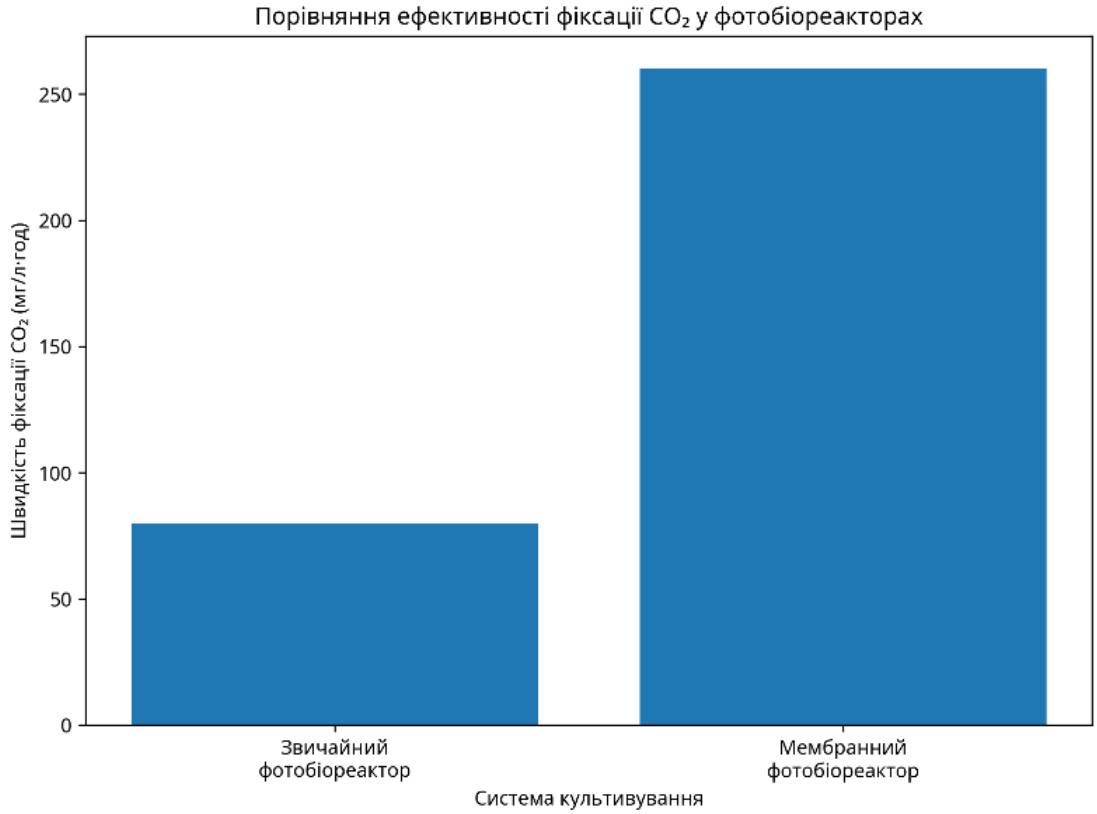


Рис. 1. Порівняльна ефективність фіксації CO_2 у звичайному та мембранному фотобіореакторах при культивуванні Chlorella vulgaris

Таким чином, мембранний фотобіореактор долає головний недолік класичної біотехнології – обмеження за швидкістю дифузії газів у рідині. Контрольований масоперенос крізь мембрану робить мікроводорості масштабованим інструментом як для важкої промисловості, так і для систем автономного життєзабезпечення майбутнього.

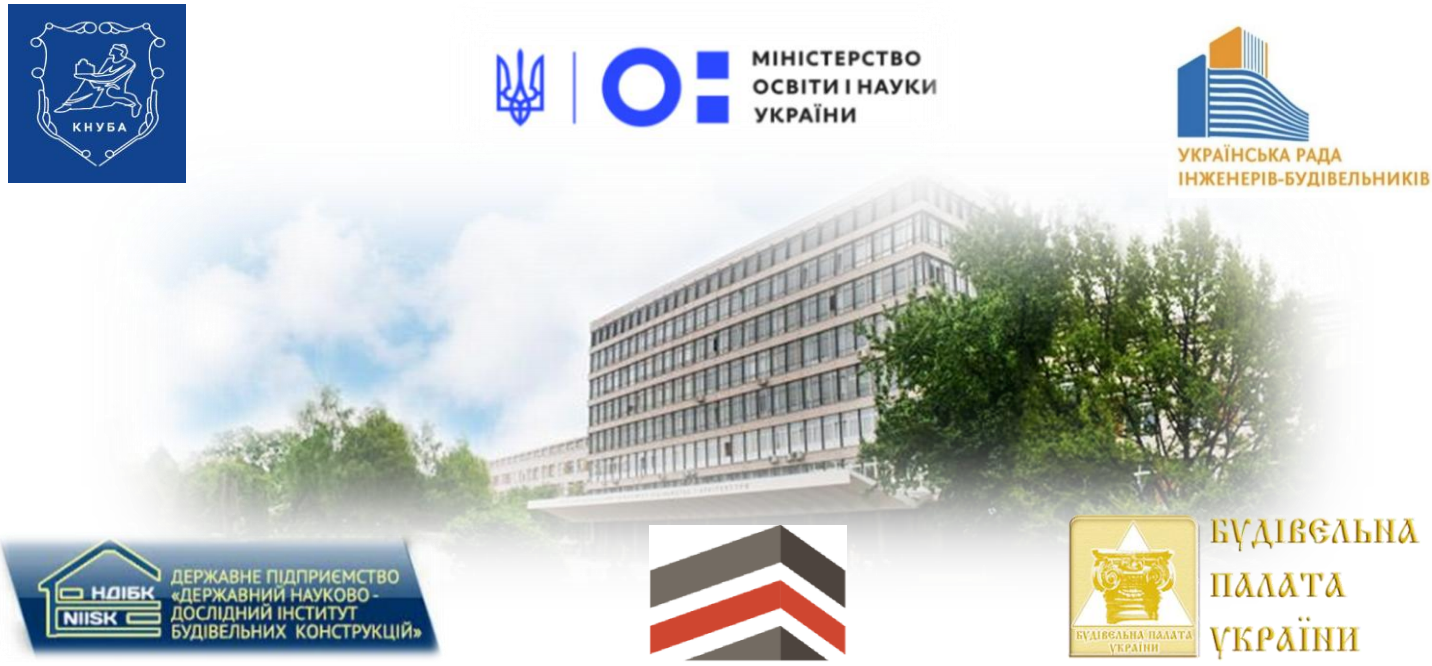
Висновки. Біотехнології є перспективним інструментом запобігання негативним наслідкам глобального потепління. Використання мікроводоростей для біологічної фіксації CO_2 дозволяє одночасно знижувати концентрацію парникових газів в атмосфері та отримувати цінну біомасу для подальшого промислового використання.

Найбільш перспективними системами культивування є мембранні фотобіореактори, які забезпечують оптимальні умови росту мікроводоростей, інтенсифікацію газообміну та високі показники поглинання вуглекислого газу. Подальший розвиток і вдосконалення цих технологій може стати важливою складовою переходу до низьковуглецевої економіки та реалізації принципів сталого розвитку.

Список використаних джерел

1. IPCC. (2023). Climate change 2023: Synthesis report. IPCC.
2. Khan, M. I., Shin, J. H., & Kim, J. D. (2018). The promising future of microalgae: Current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. Microbial Cell Factories.
3. Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. Biotechnology Advances.
4. Singh, J., & Gu, S. (2010). Commercialization potential of microalgae for biofuels production. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
5. Wang, B., et al. (2008). CO_2 bio-mitigation using microalgae. Applied Microbiology and Biotechnology.
6. Zhu, L., et al. (2019). Cultivation of microalgae in photobioreactors: A review. Bioresource Technology.
7. UNEP. (2024). Emissions gap report 2024. UNEP.

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
KYIV NATIONAL UNIVERSITY OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE
ACADEMY OF CONSTRUCTION OF UKRAINE
STATE ENTERPRISE "STATE RESEARCH INSTITUTE OF BUILDING CONSTRUCTIONS"
UKRAINIAN COUNCIL OF CIVIL ENGINEERS
CONSTRUCTION CHAMBER OF UKRAINE



Conference proceedings

of

VII International scientific-practical conference

«ENERGY-SAVING MACHINES AND TECHNOLOGIES»

19-20.05.2026

Kyiv 2026