



Міністерство освіти і науки України
Київський національний університет
будівництва і архітектури
Кафедра технологій захисту навколишнього середовища
та охорони праці КНУБА
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного
простору НАН України
Київська обласна рада

Підкомітет з питань містобудування, благоустрою та земельних
відносин у межах території забудови Комітету Верховної ради
України з питань організації державної влади, місцевого
самоврядування, регіонального розвитку та містобудування
Державне підприємство «Науково-дослідний та
конструкторсько-технологічний інститут міського
господарства»

Національний університет «Львівська політехніка»
Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні
Запорізького національного університету
Донбаська національна академія будівництва і архітектури
(Краматорськ)

ВГО «Жива планета»
Академія будівництва України
Академія технічних наук України
Українська академія архітектури
Національна спілка журналістів України
Лекторій «Наукові зустрічі/Scientific Meetings»
International Technology Transfer Association (ITTA)
Агенція відбудови України
Ченстоховська політехніка
Університет прикладних наук у Нисі
Азербайджанський архітектурно-будівельний університет
Грузинський технічний університет



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

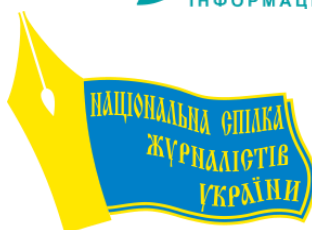


AIMM



Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Green Construction» («Зелене будівництво») 20-21 травня 2026 року

Медійна підтримка



[https://www.youtube.com/
@scientificmeetings](https://www.youtube.com/@scientificmeetings)



Київ 2026
20-21 травня 2026 року

Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Green Construction» («Зелене будівництво»). Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури. 2026, 400 с.

Видається за рішенням оргкомітету конференції.

V Міжнародна науково-практична конференція «Green Construction» («Зелене будівництво») проведена кафедрою технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури.

У роботі конференції взяли участь представники вищих та загальноосвітніх навчальних закладів, приватних компаній.

У збірнику наведені матеріали, які висвітлюють головні питання «Зеленого будівництва»

Відповідальна за випуск: д.т.н., проф. Тетяна ТКАЧЕНКО

Матеріали друкуються в авторській редакції і відповідальність за їх зміст несуть автори. Оргкомітет конференції претензії з цього приводу не приймає.

© Київський національний університет
будівництва і архітектури, 2026

Зміст

Абракітов В., Кукленко Б. ЗЕЛЕНЕ БУДІВНИЦТВО ЯК ОДИН ІЗ СПОСОБІВ ЗАХИСТУ ВІД МІСЬКОГО ШУМУ	10
Бойко В. ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ АЗС В УМОВАХ ВОЄННИХ ЗАГРОЗ	15
Андрєєвська Г. ЕФЕКТИВНЕ ВИКОРИСТАННЯ ПРИБЕРЕЖНИХ РЕСУРСІВ: АБРАЗІЙНА ДІЯЛЬНІСТЬ ТА БЕРЕГОУКРІПЛЕННЯ	19
Бурда Ю. ВИТІСНЮВАЛЬНА ВЕНТИЛЯЦІЯ ЧИСТИХ ПРИМІЩЕНЬ: АНАЛІЗ ФОРМУВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ В ЗЕЛЕНОМУ БУДІВНИЦТВІ	24
Веркалець С. ЗЕЛЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЯК ЗАСІБ ІНЖЕНЕРНОГО МАСКУВАННЯ	30
Давиденко Г., Василенко Л. ДОЩОВІ САДИ ЯК ПРИРОДООРІЄНТОВАНА СИСТЕМА ОЧИЩЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ СТІЧНИХ ВОД ВІД ВАЖКИХ МЕТАЛІВ: ОГЛЯД ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ДЛЯ УМОВ УКРАЇНИ	33
Жукова О., Старжинський П., Прокопенко І., Костюченко М. ВПЛИВ ЯКОСТІ ВОДИ НА СТАН ЗДОРОВ'Я НАСЕЛЕННЯ	37
Моргун А., Записов Д. МОДЕЛЮВАННЯ ЗА МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КІНЕМАТИКИ ПІДСИЛЕННЯ ФУНДАМЕНТІВ ПЕРЕХРЕСНИМИ ПАЛЯМИ	41
Жукова О., Юхимець М. ПРОБЛЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОННИМИ ВІДХОДАМИ	46
Ковальська О., Мітрясова О. СТІЙКІСТЬ ВОДНИХ СИСТЕМ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВІЙНИ	51
Котовенко О., Мірошніченко О., Кравчук М. ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ТА РОЛЬ КАНІВСЬКОЇ ГАЕС В ЕНЕРГЕТИЦІ УКРАЇНИ	57
Котовенко О., Мірошніченко О., Шувалова Ю. ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ КИЇВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА	62
Котовенко О., Мірошніченко О., Носач М., Гетьман Є. ДОСЛІДЖЕННЯ І ЗНИЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЇ ГАЛЬВАНІЧНОГО МІДНЕННЯ	65
Кравченко М., Ткаченко Т., Василенко Л. ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ КОНСТРУКЦІЇ ДОЩОВОГО САДУ ТА ЗЕЛЕНОГО ПОКРИТТЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРОГРАМНОГО СЕРЕДОВИЩА OPENLCA	69
Кравченко М., Шувалова Ю. СУЧАСНІ ПІДХОДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ В ЗЕЛЕНОМУ БУДІВНИЦТВІ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ	74
Кравченко М., Мякохліб В. АНАЛІЗ СТРАТЕГІЙ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЯКОСТІ ВНУТРІШНЬОГО	78

СЕРЕДОВИЩА В ЗЕЛЕНИХ БУДІВЛЯХ

Кравчук О., Кравчук А. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОСТІЙНОЇ ШВИДКОСТІ РУХУ РІДИНИ У ЗБІРНИХ ДРЕНАЖНИХ ТРУБОПРОВОДАХ З УРАХУВАННЯМ ТРАНЗИТУ	83
Кривомаз Т., Александрова С. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ПУБЛІЧНИХ ПРОСТОРІВ НА ПРИКЛАДІ ВРЕЕАМ СЕРТИФІКОВАНОЇ БІБЛІОТЕКИ БІРМІНГЕМА	86
Кривомаз Т., Циба А. ЗЕЛЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ВІДБУДОВИ ЗАСТАРІЛОГО ТА ЗРУЙНОВАНОГО ЖИТЛА	90
Кушка О., Синенко А. ВИЗНАЧЕННЯ ПЛОЩІ ТОНКОШАРОВИХ МОДУЛІВ В ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ВІДСТІЙНИКАХ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД КАЛАМУТНОСТІ СИРОЇ ВОДИ	93
Маїло М., Конопліна Д., Василенко О. ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТІ ТА ВІДНОВЛЮВАНІ МАТЕРІАЛИ У СУЧАСНОМУ ЗЕЛЕНОМУ БУДІВНИЦТВІ	96
Максименко Н., Калашніков Р. СЕКВЕСТРАЦІЯ ВУГЛЕЦЮ ЗЕЛЕНИМИ НАСАДЖЕННЯМИ ПРИБУДИНКОВИХ ТЕРИТОРІЙ М. ХАРКОВА	100
Микитенко М. ПЕРСПЕКТИВИ ОПТИМІЗАЦІЇ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У БАГАТОЯРУСНИХ ВІДЦЕНТРОВИХ СИСТЕМАХ РОЗПИЛЕННЯ РІДИНИ	103
Моргун А., Колесник А. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У ГЕОТЕХНІЧНОМУ ПРОЄКТУВАННІ БУРОНАБИВНИХ ПАЛЬ У КОНТЕКСТІ ЗЕЛЕНОГО БУДІВНИЦТВА	106
Мороз М., Михайлова Є. ВПЛИВ МІЖНАРОДНИХ КЛІМАТИЧНИХ УГОД НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЗЕЛЕНЕ БУДІВНИЦТВО В УКРАЇНІ	112
Мягкохліб В., Кравченко М. ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ (LCA) МАТЕРІАЛІВ – ЯК ІНСТРУМЕНТ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ ESG-СТРАТЕГІЇ В БУДІВНИЦТВІ	115
Мягкохліб В. ІНФОРМАЦІЙНІ БАР'ЄРИ LCA ТА ЇХ ПОДОЛАННЯ В УМОВАХ ЦИФРОВІЗАЦІЇ БУДІВНИЦТВА	120
Омельченко М., Панченко О. АПАРАТ З ЙОРЖАМИ ДЛЯ РЕАГЕНТНОГО ПОМ'ЯКШЕННЯ ПРИРОДНОЇ ВОДИ	126
Пітак І., Себко К. ІМПЕДАНСНИЙ МЕТОД ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНИХ ЗБИТКІВ ҐРУНТІВ ВНАСЛІДОК ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ	131
Марценюк В., Савченко А. МІЖНАРОДНІ СТАНДАРТИ ЗЕЛЕНОГО БУДІВНИЦТВА І ОСОБЛИВОСТІ ЇХ ВПРОВАДЖЕННЯ В УКРАЇНІ	132
Святогоров І., Ткаченко Т., Волошкіна О. ФОРМУВАННЯ	

СТАЛОГО БІОКЛІМАТИЧНОГО ПРОСТОРУ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ТЕПЛОВОГО КОМФОРТУ НАСЕЛЕННЯ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ	136
<i>Сорочинська О.</i> РЕЦИКЛІНГ ВІДХОДІВ РУЙНАЦІЇ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО БУДІВНИЦТВА	139
<i>Степанюк Р.</i> ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ МОНІТОРИНГ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПРОДОВЖЕННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ТА ЗНИЖЕННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО СЛІДУ ОБ'ЄКТІВ БУДІВНИЦТВА	144
<i>Трофимчук О., Триснюк В.</i> ЕКСПЕРТИЗА ТА МОНІТОРИНГ ЕКОЛОГІЧНИХ ЗБИТКІВ ВІД ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ НА ОСНОВІ АЕРОКОСМІЧНИХ ТА ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ	147
<i>Триснюк Т., Шумейко В., Белоус Р., Дзюба В., Мосійчук Д.</i> ОЦІНЮВАННЯ ВІЙСЬКОВО-ОБУМОВЛЕНИХ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ НА ОСНОВІ АЕРОКОСМІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ТА ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ	151
<i>Трохименко Д., Кравченко М.</i> БІО-ОРІЄНТОВАНІ НАНОМАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО ВИДАЛЕННЯ АРСЕНУ З ЗАБРУДНЕНИХ ПІДЗЕМНИХ ВОД: ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ	155
<i>Уряднікова І.</i> ЖИТТЄСТІЙКІСТЬ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ В КОНЦЕПЦІЇ GREEN CONSTRUCTION	159
<i>Василенко Л., Федоренко С., Ліпатов В.</i> ЕКОБРУТАЛІЗМ ЯК НАПРЯМ ЗЕЛЕНОГО БУДІВНИЦТВА: ПОЄДНАННЯ АРХІТЕКТУРНОЇ СПАДЩИНИ ТА СУЧАСНИХ ЕКОЛОГІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ	162
<i>Шайдюк Є.</i> КОМПЛЕКСНЕ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ ДЛЯ ПЕРСОНАЛУ ІТ-ІНФРАСТРУКТУРИ: ПСИХОЕМОЦІЙНА БЕЗПЕКА ТА ПРИНЦИПИ ЗЕЛЕНОГО БУДІВНИЦТВА В УМОВАХ РОЗВИТКУ ДАТА-ЦЕНТРІВ	165
<i>Шинкарчук М., Савченко А.</i> РЕЦИКЛІНГ БУДІВЕЛЬНИХ ВІДХОДІВ І ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В СУЧАСНИХ АРХІТЕКТУРНИХ РІШЕННЯХ	168
<i>Шумбар К.</i> ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ АКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕЛЕНОГО ФАСАДУ НА ОСНОВІ PARTHENOCSISSUS QUINQUEFOLIA	171
<i>Телима С., Калугін Ю.</i> ЧИСЕЛЬНІ РОЗРАХУНКИ ТОВЩИНІ БІОПЛІВКИ ПРИ ОЧИСТЦІ СТІЧНИХ ВОД В БІОРЕАКТОРАХ	174
<i>Кожевніков С.</i> УДОСКОНАЛЕННЯ НОРМАТИВНО-ПРАВОВОЇ БАЗИ РОЗВИТКУ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕРОБКИ ПВХ-ПРОФІЛІВ	179
<i>Аміров М.</i> ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТИПОВИХ ЛЮДСЬКИХ ПОМІШКАНЬ У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	184

Бугай В. АРХІТЕКТУРА ЗДОРОВ'Я: ПРОЄКТУВАННЯ ЗЕЛЕНИХ ПАРКІВ ЯК ПРОСТОРІВ ДЛЯ АКТИВНОГО ВІДПОЧИНКУ	187
Булавка І. ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СВІТЛОВОГО РЕЖИМУ У СКВЕРІ І. СТАРОВА (М. ДНІПРО)	190
Чернов Л. РУДЕРАЛЬНІ БІОТОПИ У КОНТЕКСТІ ЗЕЛЕНОГО ВІДНОВЛЕННЯ МІСЬКИХ ТЕРИТОРІЙ: РИЗИКИ ПОШИРЕННЯ ІНВАЗІЙНИХ РОСЛИН ТА ПІДХОДИ ДО МОНІТОРИНГУ	195
Цапко Ю., Цапко О., Бердник О., Галіца В. ФОРМУВАННЯ БІОКОМПЗИТИВ ДЛЯ ТЕПЛОІЗОЛЮВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ	197
Цапко Ю., Цапко О., Бердник О., Бондаренко О. МЕХАНІЗМ ВОГНЕЗАХИСТУ ДЕРЕВИНИ РЕАКЦІЙНИМ ПОКРИТТЯМ	200
Цапко Ю., Цапко О., Бердник О., Галіца В. ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ ВОГНЕСТІЙКИХ БІОКОМПЗИТИВ НА ОСНОВІ ГІБРИДНОГО В'ЯЖУЧОГО	203
Цапко Ю., Цапко О., Бердник О., Галіца В. ОКРЕМІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ ВОГНЕСТІЙКИХ БІОКОМПЗИТИВ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА	205
Волох Ю., Кириченко М. ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕРМОАКТИВНИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ (ТАВС)	208
Прусов Д., Яловий Д., Кравченко Г. ОСОБЛИВОСТІ БУДІВНИЦТВА ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ СИСТЕМ З ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ З ВІДХОДІВ У МЕЖАХ ТЕХНОЛОГІЇ "WASTE-TO-ENERGY" В СУЧАСНИХ УМОВАХ ОТГ	212
Гламаздін П., Вакуленко Є. ВПЛИВ ОКСИГЕНІЗАЦІЇ ДУТТЬОВОГО ПОВІТРЯ НА СКЛАД ПРОДУКТІВ ЗГОРАННЯ ВУГІЛЛЯ В ПРОМИСЛОВИХ ПАРОГЕНЕРАТОРАХ	216
Запальський В. ВИКОРИСТАННЯ ІШ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ МІСЬКИХ МЕРЕЖ В УМОВАХ ВІЙСЬКОВОГО ЧАСУ	223
Казакова О., Запальський М. ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ФАКТОРІВ ДЕКОРБАНІЗАЦІЇ ПЛАСТИКУ У МЕРЕЖАХ ВОДОПОСТАЧАННЯ МІСТА МИКОЛАЄВА У ВОЄННИЙ ЧАС	227
Міщук Д., Міщук Є., Балака М. ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЮ В ДВИГУНАХ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАШИН ЯК ШЛЯХ ДО ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ У ЗЕЛЕНОМУ БУДІВНИЦТВІ	232
Морковник С., Мілейковський В. ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ ФОРМУВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ ІНТЕГРОВАНИХ ТЕПЛИЦЬ У СКЛАДІ БУДІВЕЛЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ВТОРИННИХ ТА ПОНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ	235
Недострелова Л., Боровська Г. КЛІМАТИЧНА ПРОДУКЦІЯ ДЛЯ ОЦІНКИ РИЗИКІВ В ГАЛУЗІ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ	239

Губа М., Непошивайленко Н., Кремінь В. ГІС-МОНІТОРИНГ ТА ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ ЯК ІНСТРУМЕНТАЛЬНА ОСНОВА СТАЛОГО УПРАВЛІННЯ ЗЕМЕЛЬНИМИ РЕСУРСАМИ ПРОМИСЛОВОГО МІСТА	243
Шевченко С., Скрипник О., Опашинюк А. ВИКЛАДАННЯ АЛГОРИТМІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ПОПЕРЕЧНОГО РОЗКРОЮ ПИЛОМАТЕРІАЛІВ НА ЗАГОТОВКИ ДЛЯ СТОЛЯРНИХ І БУДІВЕЛЬНИХ ВИРОБІВ	245
Максименко В., Безсонний В. ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ ГІДРОЕКОЛОГІЧНИХ ЗБИТКІВ ВІД ВОЄННИХ ДІЙ ЯК ІНФОРМАЦІЙНА ОСНОВА ЗЕЛЕНОГО ПІСЛЯВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ ТЕРИТОРІЙ	249
Белюженко М. ВПЛИВ ЛУЖНИХ МЕТАЛІВ У БІОМАСІ НА ПРОЦЕСИ ЗАБРУДНЕННЯ КОНВЕКТИВНИХ ПОВЕРХОНЬ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРІВ	252
Данова К., Малишева В., Колибельнікова Л. ЗЕЛЕНЕ БУДІВНИЦТВО ТА УНІВЕРСАЛЬНИЙ ДИЗАЙН: СТРАТЕГІЇ СОЦІАЛЬНОЇ АДАПТАЦІЇ ОСІБ З ІНВАЛІДНІСТЮВ ПОВОЄННИЙ ПЕРІОД	256
Ковальова А., Вісяний В. ЗЕЛЕНІ ПІДХОДИ В ТЕПЛИЧНОМУ ГОСПОДАРСТВІ ЯК СКЛАДОВА СТАЛОГО АГРОВИРОБНИЦТВА	259
Ланшина Ю., Клімова І., Мірошніченко О. АНАЛІЗ ВПЛИВУ ДЖЕРЕЛ ВИКИДІВ ЦЕМЕНТНОГО ВИРОБНИЦТВА НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ	262
Максименко А., Клімова І. АНАЛІЗ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШУМУ НА ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВАХ	267
Моздолевський В. СТАЛІ РОЗУМНІ БУДИНКИ В КОНТЕКСТІ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТА СТАЛОГО РОЗВИТКУ	271
Москвітін А. ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ПРИМІЩЕНЬ З VAV-СИСТЕМОЮ ВЕНТИЛЯЦІЇ ТА ЗЕЛЕНОЮ СТІНОЮ	274
Мішук К., Пастухова С., Кузнєцов В. ПОВОЄННА «ЗЕЛЕНА» ВІДБУДОВА З УРАХУВАННЯМ ВОЄННИХ РИЗИКІВ: ПРИНЦИПИ, ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ДЛЯ УКРАЇНИ	278
Телима С. ВПЛИВ КОНЦЕНТРАЦІЇ БІОМАСИ НА ФОРМУВАННЯ ТОВЩИНИ БІОПЛІВКИ	283
Тємченко М. ОЦІНКА СОНЯЧНОГО ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ КІРОВОГРАДСЬКОЇ ОБЛАСТІ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ ПРОЄКТІВ	287
Ченчева О. РОЗУМНІ БУДИНКИ ТА УКРИТТЯ НОВОГО	

ПОКОЛІННЯ В УМОВАХ ЕКОЛОГІЧНОЇ СТІЙКОСТІ	291
<i>Бондаренко О., Каверин К.</i> ВПЛИВ ДОБАВОК ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ДІЇ НА МІЦНІСТЬ ЛУЖНОГО ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТУ	294
<i>Касьянова О.</i> УДОСКОНАЛЕНИЙ БАГАТОШАРОВИЙ ВОГНЕЗАХИСНИЙ ТЕКСТИЛЬ: МАТЕРІАЛИ, ГІБРИДНІ АРХІТЕКТУРИ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ФУНКЦІОНАЛІЗАЦІЯ	297
<i>Кравчук М., Кривомаз Т.</i> ПРОБЛЕМИ ОНОВЛЕННЯ ЖИТЛОВОЇ ЗАБУДОВИ ДЛЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА	302
<i>Попеску С., Сахно Т., Василенко Л.</i> ВИКОРИСТАННЯ ДОЩОВОЇ ВОДИ В БУДІВЛЯХ: ЕКОЛОГІЧНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ ПЕРЕВАГИ	307
<i>Кацан Р.</i> БЕЗПЕКА ПРАЦІ В УМОВАХ ЗЕЛЕНОГО БУДІВНИЦТВА	311
<i>Буличов Д., Кириченко М., Чепурна Н.</i> ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ, ВЕНТИЛЯЦІЇ ТА КОНДИЦІОНУВАННЯ	317
<i>Кузнєцова Л., Перебинос А.</i> ДИНАМІКА ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ПІД ЧАС АНАЕРОБНОГО КОМПОСТУВАННЯ БІОВІДХОДІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕМ-ПРЕПАРАТУ БОКАШІ	323
<i>Гетьман Є. Носач М., Перебинок А.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО КОМПОСТУВАННЯ БІОВІДХОДІВ ЗА ДОПОМОГОЮ РІДКИХ ЕМ-ПРЕПАРАТІВ	326
<i>Задорожна Р., Димань Т., Димань Н.</i> ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ РИНКУ ПРОЄКТІВ ЗЕЛЕНОГО БУДІВНИЦТВА В КОНТЕКСТІ ЗМІНИ КЛІМАТУ	330
<i>Кришук Д.</i> ВИКОРИСТАННЯ РЕЦИКЛЬОВАНИХ ПЛАСТИКІВ З БУДІВЕЛЬНИХ ВІДХОДІВ ДЛЯ 3D-ДРУКУ НЕСТАНДАРТНИХ КРІПЛЕНЬ ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ: ВІД ВІМ-МОДЕЛІ ДО ВИРОБУ	333
<i>Попова Л., Скочко С.</i> БАГАТОШАРОВІ КОНСТРУКЦІЇ ЗНИЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ КОНТРАСТІВ ДЛЯ БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ ТА ТИМЧАСОВИХ СПОРУД	339
<i>Попова Л., Скочко С.</i> ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ БАГАТОШАРОВІ СИСТЕМИ ТЕПЛОВОГО МАСКУВАННЯ ТА РЕГУЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ КОНТРАСТІВ У ЗЕЛЕНОМУ БУДІВНИЦТВІ ТА ЦИВІЛЬНОМУ ЗАХИСТІ	341
<i>Цибитовський С., Ткаченко Т.</i> ПРИШВИДШЕННЯ ВИПРОБУВАННЯ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ОБ'ЄКТІВ ПІДВИЩЕНОЇ НЕБЕЗПЕКИ МЕТОДОМ АБСОЛЮТНОГО ТИСКУ	346
<i>Попова Л., Скочко С.</i> МАСКУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ТА ЛЮДЕЙ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД ТЕПЛОВІЗІЙНИХ ПРИСТРОЇВ У КОНТЕКСТІ ЗЕЛЕНОГО БУДІВНИЦТВА	349

Дяченко Х., Березницька Ю. ФОНОВИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРІНГ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО ЗЕЛЕНОГО БУДІВНИЦТВА	352
Предун К., Ейсмонт В. ЗАХОДИ З ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА БІОСФЕРНОЇ СУМІСНОСТІ ВНУТРІШНЬОБУДИНКОВИХ СИСТЕМ ГАЗОПОСТАЧАННЯ	356
Предун К., Почка О. ЗАХОДИ З ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА БІОСФЕРНОЇ СУМІСНОСТІ ГАЗОРОЗПОДІЛЬНИХ СИСТЕМ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ	360
Пушкарьова К., Кочевих М., Гончар О., Семенюк І. РЕЦИКЛІНГ КЕРАМІЧНИХ БУДІВЕЛЬНИХ ВИРОБІВ З ВІКОРИСТАННЯМ ОСНОВНИХ ПРИНЦИПІВ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ	364
Суханевич М., Бондаренко О., Самченко Д., Ластівка О., Цапко О., Чахоян В. ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ЦЕЛЮЛОЗОВМІСНИХ ВІДХОДІВ ТА ВІДХОДІВ СКЛОБОЮ ЯК КОМПОНЕНТІВ СУМІШЕЙ ДЛЯ 3D-ДРУКУ БЕТОНОМ	369
Суханевич М., Бондаренко О., Ластівка О., Самченко Д., Цапко О., Смоглій А. ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ РУЙНУВАННЯ БУДІВЕЛЬ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА НОВОГО ЖИТЛА ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ 3D-ДРУКУ	374
Корбут В., Тетяна Т., Мілейковський В., Морковник С. НОВИЙ ПІДХІД ДО ОРГАНІЗУВАННЯ ВІТІСНЯЮЧОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМФОРТУ Й ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ З КОРИСНИМ ВИКОРИСТАННЯМ ВИДІЛЕНОГО ВУГЛЕЦЬ	379
Ткаченко Т., Мілейковський В., Чжан А., Цюрюпа Ю. ЛІХЕНОІНДИКАЦІЯ ЯК ЗАСІБ ОЦІНЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ	385
Ткаченко Т., Мілейковський В., Цюрюпа В., Мороз С. ЕКОЛОГІЧНІ ТА ГЕОПОЛІТИЧНІ ВИКЛИКИ ФОРМУВАННЯ ВЕЛИКОЇ ТИХООКЕАНСЬКОЇ СМІТТЄВОЇ ПЛЯМИ	387
Ходавковський В., Цюрюпа Ю., Ткаченко Т., Мілейковський В. ВПЛИВ НАНОПЛАСТИКУ НА ВОДНІ ЕКОСИСТЕМИ: ОЦІНЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ТА ВИКЛИКИ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ	390
Березницька Ю., Литовченко О. ТЕОРІЯ ПРОВАДЖЕННЯ ЗЕЛЕНОГО БУДІВНИЦТВА В ПРИРОДНО-ЗАПОВІДНИЙ ФОНД УКРАЇНИ	393
Березницька Ю. ЗАГАЛЬНИЙ ОГЛЯД МОЖЛИВОСТЕЙ ВПРОВАДЖЕННЯ ESG-ПІДХОДУ В УПРАВЛІННЯ ОХОРОНОЮ ПРАЦІ В ЗЕЛЕНОМУ БУДІВНИЦТВІ	397

ЗЕЛЕНЕ БУДІВНИЦТВО ЯК ОДИН ІЗ СПОСОБІВ ЗАХИСТУ ВІД МІСЬКОГО ШУМУ

Володимир Абракітов¹, Богдан Кукленко¹

*¹Харківський національний університет міського господарства імені
О. М. Бекетова, abrakitov@kname.edu.ua*

У сучасних містах проблема шумового забруднення набула особливої гостроти через стрімке зростання урбанізації, інтенсифікацію транспортних потоків та ущільнення забудови [1, 2]. Надмірний рівень шуму негативно впливає на фізичне та психічне здоров'я населення, знижує якість життя, спричиняє розлади сну, серцево-судинні захворювання, підвищує рівень стресу та знижує продуктивність. Традиційні методи боротьби з міським шумом (акустичні екрани, ізоляційні матеріали, містобудівне зонування) часто є дорогими, мають обмежену ефективність або створюють додаткові проблеми для міського ландшафту.

Водночас, розвиток концепції сталого розвитку та «зеленої» архітектури стимулює пошук природоорієнтованих рішень, які поєднують екологічну, соціальну та економічну ефективність. Одним із таких рішень є зелене будівництво — впровадження зелених дахів, вертикального озеленення, зелених зон, використання природних матеріалів тощо. Ці елементи не лише покращують мікроклімат, зменшують викиди парникових газів і підвищують біорізноманіття, а й мають значний потенціал для зниження рівня міського шуму.

Метою цієї наукової роботи є комплексний аналіз впливу елементів зеленого будівництва на зниження рівня шуму в міському середовищі. У роботі розглядаються механізми акустичної дії рослинності, ефективність різних типів зелених рішень (дахи, фасади, зони, бар'єри), дендрологічні рекомендації, використання природних матеріалів, інтеграція з традиційними акустичними заходами, методики вимірювання шуму, нормативні документи (українські та міжнародні), а також екологічні, соціальні та економічні переваги зеленого будівництва. Особливу увагу приділено аналізу практичних кейсів з України та світу, порівнянню ефективності різних рішень і визначенню напрямів подальших досліджень.

Рослинність впливає на акустичне середовище міста через кілька основних механізмів: відбиття, розсіювання, поглинання та екранування звукових хвиль. Деревя, чагарники та трав'янисті рослини мають складну структуру, яка сприяє багатократному відбиттю та розсіюванню звуку, а також поглинанню акустичної енергії листям, стовбурами, гілками та ґрунтом. Особливо ефективними є багаторядні та багатоярусні посадки з густою кроною та щільним підкороновим чагарником.

Дослідження показують, що листя дерев поглинає близько 25% звукової енергії, а ще 49% — відбиває. Газони знижують рівень шуму на 6 дБ, а

вертикальне озеленення (ліани на стінах) може збільшити звукоізоляцію в 6–8 разів порівняно з голою стіною. Ефективність шумозахисту залежить від ширини смуги насаджень, їхньої структури, виду рослин, густоти крони, наявності підліску та чагарників, а також від сезону (наявність листя).

Зелені дахи — це багатошарові конструкції, які включають ізоляційний, дренажний, ґрунтовий та рослинний шари. Вони поділяються на екстенсивні (тонкий шар субстрату, невибагливі рослини) та інтенсивні (товстий шар, можливість висадки чагарників і навіть дерев). Акустичний ефект зелених дахів полягає у поглинанні та розсіюванні звукових хвиль ґрунтовим шаром і рослинністю. Дослідження показують, що зелений дах може знизити рівень шуму на 5–13 дБ у низько- та середньочастотному діапазоні (50–2000 Гц), а також на 2–8 дБ у високочастотному діапазоні.

Польові вимірювання в Бельгії, Німеччині, США та Україні [1] підтверджують, що інтенсивні зелені дахи з товстим шаром субстрату забезпечують кращу звукоізоляцію, ніж екстенсивні. Водночас навіть екстенсивні дахи з тонким шаром субстрату та низькорослими рослинами демонструють значний акустичний ефект, особливо для високих частот.

Вертикальне озеленення фасадів — це система, в якій рослини висаджуються на стінах будівель за допомогою спеціальних конструкцій (каркасних, модульних, гідропонних тощо). Акустичний ефект таких систем полягає у поглинанні та розсіюванні звукових хвиль рослинністю та субстратом. Дослідження показують, що вертикальні зелені стіни можуть знижувати рівень шуму на 10–15 дБ, особливо у середньо- та високочастотному діапазоні.

Експериментальні вимірювання в лабораторних і реальних умовах (Париж, Мілан, Валенсія, Київ) підтверджують, що коефіцієнт звукопоглинання вертикальних зелених стін може досягати 0,5–1,0, а ефективність системи залежить від типу субстрату, вологості, густоти рослинності та конструкції.

Зелені смуги та бар'єри вздовж транспортних магістралей — це багаторядні посадки дерев і чагарників, які створюють природний акустичний екран між джерелом шуму та житловою забудовою. Ефективність таких смуг залежить від ширини (10–30 м і більше), кількості рядів, виду рослин, густоти крони, наявності підліску та чагарників. Дослідження у Львові, Сумах, Києві та інших містах України показують, що правильно спроектована зелена смуга може знизити рівень шуму на 10–20 дБ, а в окремих випадках — до 43% від початкового рівня.

Для створення ефективних шумозахисних насаджень рекомендується використовувати густокронні, швидкозростаючі дерева з низьким штамбом (липа, клен, тополя, ясен, дуб, береза, ялина, сосна) та чагарники (бузок, калина, спірея, жимолость, глід, туя, ялівець). Особливо ефективними є багаторядні посадки з чергуванням дерев і чагарників, а також поєднання листяних і хвойних порід для забезпечення шумозахисту протягом усього

року.

Використання природних матеріалів (дерево, пробка, мінеральна вата, деревоволокнисті плити, акустичні бетони) у конструкціях будівель підвищує їхню звукоізоляційну здатність. Наприклад, пробка має високий коефіцієнт звукопоглинання, є екологічною, гіпоалергенною та довговічною. Мінераловатні та деревоволокнисті плити, акустичні бетони з пористими заповнювачами також широко використовуються для підвищення акустичного комфорту в зеленому будівництві.

Сучасна практика передбачає поєднання зелених рішень із традиційними акустичними екранами (металевими, скляними, комбінованими) для досягнення максимального ефекту шумозахисту, особливо в умовах щільної міської забудови. Комбіновані екрани типу «зелена стіна» поєднують акустичні панелі та рослинність, забезпечуючи не лише зниження шуму, а й покращення естетики міського ландшафту.

Вимірювання рівня шуму здійснюється відповідно до національних (ДСТУ, ДБН) та міжнародних (ISO, EN) стандартів із використанням шумомірів, аналізаторів спектру, ревербераційних камер тощо. Основними акустичними показниками є L_{Aeq} (еквівалентний рівень шуму), L_{den} (денний-вечірній-нічний рівень), L_{night} (нічний рівень), а також зниження шуму в дБ. Для моделювання та прогнозування шумового забруднення використовуються спеціалізовані програмні комплекси (наприклад, CadnaA) та математичні моделі, що враховують інтенсивність руху, тип дорожнього покриття, забудову, наявність зелених насаджень.

В Україні діють Державні санітарні норми допустимих рівнів шуму в приміщеннях житлових та громадських будинків і на території житлової забудови (Наказ МОЗ №463 від 22.02.2019), ДБН В.2.2-12:2019, ДСТУ 3587-97, а також місцеві програми розвитку зелених насаджень. Вимоги до озеленення міст містяться у ДБН В.2.2-12:2019, ДСТУ-Н Б В.2.2-27:2010, а також у програмах розвитку зелених зон (наприклад, у Рівному, Львові, Києві).

Серед міжнародних документів ключовими є Environmental Noise Directive (2002/49/EC), стандарти ISO 1996-1:2016, ISO 140-5:1998, а також рекомендації ВООЗ щодо допустимих рівнів шуму (Environmental Noise Guidelines for the European Region, 2018). Вимоги до акустики включені до систем сертифікації зелених будівель LEED, BREEAM, DGNB, WorldGBC, які передбачають оцінку акустичного комфорту, звукоізоляції, реверберації та шумозахисту.

В Україні реалізовано низку проєктів із впровадження зелених дахів, фасадів, шумозахисних смуг (Львів, Київ, Житомир, Рівне, Суми). Міжнародний досвід представлений прикладами з Парижа, Берліна, Копенгагена, Антверпена, Віторії-Гастейс, Мілана, Сіднея, Сінгапура, де зелені технології інтегруються у міське планування та політику сталого розвитку.

Дослідження базується на аналізі наукових публікацій, нормативних документів, звітів міжнародних організацій, експериментальних вимірювань та моделювання акустичних процесів у міському середовищі. Використано міждисциплінарний підхід, що поєднує екологію, акустику, архітектуру, містобудування, дендрологію, матеріалознавство та економіку.

Перелічимо методи нашого дослідження.

- Науково-теоретичний аналіз — вивчення сучасних підходів до зеленого будівництва, акустики, екології міста, аналіз чинних нормативів та стандартів.

- Монографічний метод — опрацювання наукових публікацій, звітів, кейсів впровадження зелених рішень в Україні та світі.

- Системно-структурний аналіз — дослідження структури та функцій зелених елементів у міському середовищі.

- Порівняльний аналіз — оцінка ефективності різних типів зелених рішень щодо зниження шуму (дахи, фасади, смуги, бар'єри, матеріали).

- Індукція і дедукція — узагальнення результатів, формування висновків і рекомендацій.

- Графічний і табличний методи — візуалізація результатів, порівняльні таблиці ефективності.

- Експериментальні виміри — аналіз даних польових і лабораторних досліджень рівнів шуму, коефіцієнтів звукопоглинання, ефективності зелених рішень.

- Моделювання — використання математичних моделей та програмних комплексів для прогнозування акустичного ефекту зелених елементів у міському середовищі.

- Статистичний аналіз — обробка експериментальних даних, оцінка достовірності результатів.

Для оцінки ефективності зелених елементів щодо зниження шуму використовуються такі показники:

- L_{Aeq} — еквівалентний рівень шуму (дБА);

- ΔL — зниження рівня шуму (дБ) у порівнянні з контрольними ділянками;

- Відсоток зниження шуму (%) — для порівняння різних рішень.

Наведемо отримані нами результати.

Рослинність у міському середовищі діє як природний акустичний бар'єр, що зменшує рівень шуму за рахунок:

- відбиття — поверхня листя, стовбурів і гілок відбиває частину звукової енергії;

- поглинання — тканини рослин, ґрунт, субстрат і повітряні прошарки поглинають акустичну енергію;

- розсіювання — складна структура крони і підліску сприяє багатократному розсіюванню звукових хвиль;

- екранування — багаторядні посадки створюють фізичний бар'єр між

джерелом шуму і захищеною територією.

Ефективність залежить від ширини смуги, кількості рядів, густоти крони, виду рослин, наявності підліску, сезону (наявність листя), вологості субстрату та інших факторів.

Зелені дахи забезпечують зниження рівня шуму за рахунок багатошарової структури (ізоляційний, дренажний, ґрунтовий, рослинний шари). Польові та лабораторні дослідження показують (табл. 1):

– Екстенсивні дахи (тонкий шар субстрату, невибагливі рослини): зниження шуму на 5–8 дБ у середньо- та високочастотному діапазоні.

– Інтенсивні дахи (товстий шар, можливість висадки чагарників і дерев): зниження шуму на 10–13 дБ у широкому діапазоні частот.

Таблиця 1

Порівняльна ефективність зелених дахів різних типів

№	Тип даху	Товщина субстрату	Рослинність	Зниження шуму (дБ)
1	Екстенсивний	5–15 см	Седуми, трави	5–8
2	Напівінтенсивний	15–30 см	Трави, чагарники	8–10
	Інтенсивний	30–100 см	Чагарники, дерева	10–13

Зелений дах також покращує теплоізоляцію, затримує дощову воду, підвищує біорізноманіття, знижує ефект міського теплового острова та підвищує ринкову вартість нерухомості [2].

Вертикальні зелені стіни (живі стіни, зелені фасади) демонструють високу ефективність у зниженні шуму, особливо у середньо- та високочастотному діапазоні. Експериментальні дані:

– коефіцієнт звукопоглинання (α): 0,5–1,0 для гідропонних систем із густою рослинністю;

– зниження шуму: 10–15 дБ для фасадів із багатошаровою конструкцією;

– вплив вологості: сухий субстрат поглинає більше звуку, ніж вологий; наявність рослин підвищує ефективність у високих частотах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Абракітов В.Е. Багаторазові відбиття звуку в акустичних розрахунках. Монографія. Харків: ХНАМГ, 2007. 416 с. – Режим доступу: <https://eprints.kname.edu.ua/6053/1/%D0%BC%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B8%D1%8F2.pdf>.

2. Абракітов В. Е. Пропозиції до конструювання засобів боротьби з шумом: монографія / В. Е. Абракітов; Харк. нац. ун-т. міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. - Х.: ХНУМГ, 2015. - 205 с. – Режим доступу: https://eprints.kname.edu.ua/39477/1/%D0%9F%D0%95%D0%A7_8%D0%9C%D0%9D_%D0%BC%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B8%D1%8F.pdf.

ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ АЗС В УМОВАХ ВОЄННИХ ЗАГРОЗ

Валентин Бойко¹,

¹*Державний Університет «Київський авіаційний інститут»,
3998111@stud.kai.edu.ua*

Воєнні дії суттєво трансформували характер техногенних ризиків на території України. Об'єкти паливної інфраструктури, зокрема автозаправні станції, опинилися в зоні підвищеної небезпеки не лише з погляду їх фізичного знищення, але й як джерела потенційного екологічного ураження. Пошкодження резервуарів, систем транспортування пального та інженерних комунікацій супроводжується викидами небезпечних речовин, що здатні формувати довготривалі осередки забруднення. Досвід останніх років показує, що наслідки таких подій виходять далеко за межі локальних територій і можуть впливати на стан довкілля на регіональному рівні [1; 2]. Функціонування АЗС у мирний час уже пов'язане з певним спектром ризиків, серед яких домінують витoki нафтопродуктів, забруднення ґрунтів і підземних вод, а також викиди летких органічних сполук. У воєнних умовах ці ризики набувають іншого масштабу через неконтрольовані руйнування, відсутність оперативного реагування та порушення систем моніторингу. Згідно з дослідженнями, навіть незначні пошкодження резервуарів можуть призвести до тривалого просочування пального у ґрунт, формуючи зони хронічного забруднення, які складно локалізувати [6].

Аналіз сучасних досліджень дозволяє виділити декілька груп екологічних ризиків, характерних для АЗС. Передусім йдеться про механічне руйнування інфраструктури внаслідок обстрілів або вибухів. Такі події супроводжуються миттєвим викидом значних обсягів пального, що призводить до забруднення ґрунтового покриву та поверхневих вод. Інша група ризиків пов'язана з пожежами, які виникають після ураження об'єкта. У процесі горіння утворюється широкий спектр токсичних сполук, включаючи оксиди азоту, сірки та поліциклічні ароматичні вуглеводні, що негативно впливають на атмосферне повітря та здоров'я населення [4].

Окрему увагу слід приділити підземним водам як найбільш уразливому компоненту довкілля. Нафтопродукти мають високу мобільність у ґрунтовому середовищі, тому навіть локальний розлив здатен спричинити масштабне забруднення водоносних горизонтів. Дослідження показують, що бензин і дизельне паливо можуть проникати на значну глибину, формуючи так звані «плаваючі лінзи» забруднення, які зберігаються протягом десятиліть [6]. У воєнних умовах контроль за такими процесами практично відсутній, що ускладнює оцінку реальних масштабів шкоди. Суттєвим чинником посилення ризиків виступає порушення технологічних регламентів експлуатації АЗС. Внаслідок бойових дій часто виникають

перебої з електропостачанням, що призводить до відключення систем контролю витоків і автоматичного захисту. У таких умовах навіть незначні аварії залишаються непоміченими протягом тривалого часу. Водночас обмежений доступ до об'єктів у зоні бойових дій унеможливорює проведення своєчасних ремонтних робіт і ліквідацію наслідків аварій.

Оцінювання екологічних ризиків у подібних умовах потребує комплексного підходу, що враховує як технічні, так і природні фактори. Один із підходів передбачає аналіз сценаріїв розвитку аварійних ситуацій із визначенням ймовірності їх виникнення та можливих наслідків. Наприклад, у разі прямого влучання у резервуар із паливом найбільш імовірним сценарієм є вибух із подальшим розливом і загорянням. Альтернативний сценарій передбачає поступовий витік через пошкоджені комунікації, що має менш виражені, але більш тривалі наслідки [4].

Практика оцінки ризиків на АЗС у європейських країнах демонструє ефективність застосування методів кількісного аналізу, які дозволяють визначити рівень небезпеки для різних компонентів довкілля. Зокрема, дослідження словацьких науковців показало, що найбільш критичними факторами є стан резервуарів, рівень технічного обслуговування та близькість до водних об'єктів [4]. У воєнних умовах до цього переліку додається фактор зовнішнього впливу, який суттєво ускладнює прогнозування.

Фактичні дані щодо екологічних наслідків війни в Україні свідчать про суттєве зростання техногенного навантаження на довкілля. Зокрема, на деокупованих територіях Київської, Чернігівської та Сумської областей утворилося близько 15 млрд тонн відходів, що виникли внаслідок руйнування інфраструктури та військової техніки [1]. Додатковим джерелом забруднення стали знищені транспортні засоби, кількість яких перевищує 200 тис. одиниць, що спричиняє тривале надходження токсичних речовин у ґрунти та водні ресурси. За оцінками міжнародних організацій, загальні збитки у сфері поводження з відходами сягають сотень мільярдів доларів, що свідчить про масштабність екологічних наслідків [1]. Частина таких випадків залишається недостатньо дослідженою через обмежений доступ до територій активних бойових дій, що ускладнює формування повної картини впливу на довкілля.

Вплив зазначених процесів на довкілля має комплексний і багаторівневий характер. Пошкодження інфраструктури та розливи нафтопродуктів призводять до деградації ґрунтового покриву, зокрема до зниження його родючості, зміни фізико-хімічних властивостей і порушення природних процесів самоочищення. У місцях інтенсивного техногенного навантаження фіксується накопичення токсичних сполук, що негативно впливають на мікробіологічну активність ґрунтів. Додатково ситуацію ускладнює масштабне порушення природних територій: за наявними оцінками, загальна площа пошкоджених ділянок у межах природно-

заповідного фонду перевищує 1,2 млн га, що свідчить про системний характер екологічних змін. Забруднення водного середовища формується як унаслідок прямого потрапляння нафтопродуктів, так і через інфільтрацію забруднених речовин із ґрунтів. У таких умовах відбувається погіршення якості підземних і поверхневих вод, що створює ризики для систем водопостачання та водних екосистем. Особливо вразливими є заплавні території, прибережні зони та акваторії морів, де фіксується порушення природного гідрологічного режиму. Дослідження свідчать, що значна частина степових, лісових і прибережних екосистем зазнала трансформацій, що пов'язані не лише з хімічним забрудненням, але й із фізичним руйнуванням середовища існування. Атмосферні наслідки проявляються у вигляді викидів продуктів горіння, що утворюються під час пожеж на об'єктах паливної інфраструктури. Такі викиди містять токсичні сполуки, здатні поширюватися на значні відстані та впливати на стан повітря навіть за межами зони безпосереднього ураження. Паралельно відбувається втрата біорізноманіття, що пов'язано як із забрудненням, так і з руйнуванням природних біотопів. За оцінками, під загрозою опинилися сотні об'єктів природно-заповідного фонду, включаючи території міжнародного значення, що входять до Смарагдової мережі Європи [3]. Сукупна дія цих факторів формує довготривалі екологічні наслідки, які проявлятимуться навіть після завершення активної фази бойових дій.

Зниження рівня екологічних ризиків у таких умовах потребує перегляду підходів до експлуатації АЗС. Одним із напрямів є підвищення стійкості інфраструктури до зовнішніх впливів. Йдеться про використання заглиблених резервуарів, посилених конструкцій та систем локалізації розливів. Важливим елементом залишається впровадження систем дистанційного моніторингу, які дозволяють оперативно виявляти витіки навіть за відсутності персоналу.

Окрему роль відіграє планування заходів реагування на надзвичайні ситуації, оскільки саме на етапі ліквідації наслідків визначається масштаб екологічних втрат. Швидкість реагування, наявність технічних засобів локалізації розливів і підготовленість персоналу безпосередньо впливають на глибину поширення забруднення. У воєнний період ці можливості суттєво обмежуються через порушення логістики, нестачу ресурсів та небезпеку для аварійних служб. У таких умовах акцент зміщується з ліквідації наслідків на запобігання аваріям, що передбачає зменшення вразливості об'єктів та підвищення їх стійкості до зовнішніх впливів. Дослідження показують, що аварійні ситуації, пов'язані з викидом небезпечних речовин, здатні спричинити не лише миттєві пошкодження, але й довготривалі порушення функціонування екосистем [5].

Європейський підхід до управління такими ризиками базується на системному регулюванні та превентивних механізмах. Зокрема, у країнах ЄС застосовується комплекс норм, які передбачають ідентифікацію

небезпечних об'єктів залежно від обсягів і типів речовин, що зберігаються, а також регулярне проведення оцінки ризиків і оновлення планів реагування. Такий підхід орієнтований не лише на технічну безпеку, але й на прозорість діяльності підприємств і залучення населення до процесів інформування про потенційні загрози. У результаті формується система, в якій відповідальність за безпеку розподіляється між оператором об'єкта, державними структурами та громадою. У контексті функціонування АЗС це означає необхідність постійного контролю за критичними етапами технологічних процесів, зокрема під час зливу пального з автоцистерн у резервуари, що розглядається як один із найбільш небезпечних моментів експлуатації. Порівняльний аналіз досліджень свідчить, що ризики, пов'язані з автозаправними станціями, мають як локальний, так і накопичувальний характер. Навіть у разі відсутності масштабних аварій тривале функціонування об'єктів із незначними витокami може призводити до поступового накопичення забруднювачів у ґрунтах і підземних водах. У випадку аварійних ситуацій цей процес значно прискорюється, формуючи зони підвищеної екологічної небезпеки, які можуть зберігатися протягом тривалого часу. Моделювання сценаріїв аварій показує, що у разі витoku пального або газу зона ураження може охоплювати не лише територію АЗС, але й прилеглі житлові та природні території, що суттєво ускладнює подальше відновлення довкілля. Саме тому оцінювання ризиків повинно враховувати не лише короткострокові наслідки, але й віддалені ефекти, які проявляються через роки після інциденту [5].

Отже, функціонування автозаправних станцій у воєнних умовах супроводжується суттєвим зростанням екологічних ризиків, що обумовлено як прямими ушкодженнями інфраструктури, так і порушенням систем управління безпекою. Комплексна оцінка таких ризиків дозволяє визначити найбільш уразливі елементи та розробити ефективні заходи їх мінімізації. Подальші дослідження у цьому напрямі мають бути спрямовані на вдосконалення методів прогнозування та впровадження інноваційних технологій моніторингу довкілля.

ЛІТЕРАТУРА

1. Духневич А. В. Екологічні наслідки війни: утворення та вплив відходів на довкілля України. *Юридичний науковий електронний журнал*. 2025. URL: https://www.lsej.org.ua/1_2025/58.pdf (дата звернення: 26.04.2026).
2. Крючкова В. В. Екологічна безпека України під час воєнних дій. Матеріали наукової конференції. 2022. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/11/47.pdf> (дата звернення: 26.04.2026).
3. Роман Л. Ю. Аналіз екологічних загроз об'єктів ПЗФ України у воєнний період. *Екологічні наслідки війни*. 2022. URL: <https://eco.j.dea.kiev.ua/archives/2022/3/13.pdf> (дата звернення: 26.04.2026).

4. Mäkká K., Kampová K., Loveček T., Petrlová K. An Environmental Risk Assessment of Filling Stations Using the Principles of Security Management. A Case Study in the Slovak Republic. Sustainability. 2021. Vol. 13, № 22. Article 12452. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/22/12452> (дата звернення: 26.04.2026).

5. Mäkká K., Šiser A., Mariš L., Kampová K. Impact of Filling Stations: Assessing the Risks and Consequences of the Release of Hazardous Substances. Applied Sciences. 2024. Vol. 14, № 1. Article 22. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/1/22> (дата звернення: 26.04.2026).

6. Wu Q., Zhang X., Zhang Q. Current Situation and Control Measures of Groundwater Pollution in Gas Station. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 94. Article 012005. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/94/1/012005> (дата звернення: 26.04.2026).

ЕФЕКТИВНЕ ВИКОРИСТАННЯ ПРИБЕРЕЖНИХ РЕСУРСІВ: АБРАЗІЙНА ДІЯЛЬНІСТЬ ТА БЕРЕГОУКРІПЛЕННЯ

Галина Андрєєвська

*Одеський національний морський університет,
galja1109@gmail.com*

Раціональне використання прибережних земель і водних ресурсів має ключове значення для сталого розвитку [1]. Абразійні процеси призводять до втрати територій, руйнування інфраструктури та виникнення екологічних ризиків. Вивчення механізмів абразії та впровадження ефективних методів берегоукріплення дозволяють зберегти природні ресурси, зменшити економічні втрати та забезпечити безпеку прибережних зон. Мета дослідження полягає в аналізі абразійної діяльності моря як ключового чинника трансформації прибережних територій та у виявленні сучасних методів берегоукріплення. Робота спрямована на демонстрацію візуальних проявів абразії, оцінку їхнього впливу на раціональне використання земельних і водних ресурсів, а також на розгляд практичних прикладів інженерних і природних рішень, що забезпечують сталий розвиток узбережжя.

Абразія - це процес руйнування берегової лінії під дією хвиль, течій та перенесених ними уламків. Основні механізми включають механічний вплив ударів хвиль, стирання порід осадовим матеріалом і вимивання ґрунту. У результаті формуються урвища, осипи та відбувається втрата земельних ділянок [2].

Практичний приклад прояву абразійної діяльності моря можна спостерігати на базі практик ОНМУ «Голубий залив». У період 2007–2011 років там фіксувалися значні обрушення схилів і втрата частини пляжної

зони, утворення тріщин та осипів у верхній частині берегового укосу, а також руйнування інженерних споруд, що потребувало проведення укріплювальних заходів. Ці дані наочно демонструють динаміку руйнування берега та підтверджують необхідність застосування сучасних методів берегоукріплення для збереження прибережних територій і раціонального використання природних ресурсів. У грудні 2007 року берегова зона зберігала відносну стійкість (рис.1,а), відзначалися лише локальні ознаки абразії — осипи й тріщини в укосах, а також поступове руйнування дерев'яних споруд. До лютого 2010 року стан узбережжя помітно погіршився: посилилися процеси розмиву, частина пляжної території скоротилася, а берегові споруди зазнали значних пошкоджень. Критичним моментом став грудень 2010 року, коли сильний шторм спричинив масштабне руйнування укосу та інфраструктури, що призвело до втрати значної частини прибережної зони й підтвердило високу вразливість території до абразійних процесів (рис.1,б).



а) грудень 2007 р.



б) лютий 2010 р.

Рис.1 База практик ОНМУ «Блакитна затока».

Фотоматеріали (рис.2) наочно демонструють, як абразійні процеси призводять до втрати прибережних територій. На знімках видно, що руйнування укосу супроводжується обвалами ґрунту та зміщенням межі берега вглиб суходолу. У результаті будівлі та господарські споруди опиняються безпосередньо на краю урвища, частина земельних ділянок втрачається безповоротно. Оголені шари ґрунту, обрушені бетонні плити та залишки інженерних конструкцій свідчать про те, що абразія не лише скорочує площу земель, придатних для використання, а й створює загрозу для житлових будинків, господарських об'єктів і транспортної інфраструктури. Таким чином, втрата земельних ділянок стає одним із найвідчутніших наслідків абразії, що безпосередньо впливає на раціональне використання природних ресурсів і безпеку прибережної зони.



Рис.2 База практик ОНМУ «Блакитна затока», лютий 2010 р.

До квітня 2011 року ситуація в районі «Блакитна затока» ще більше загострилася, що підтверджують фотоматеріали (рис.3). Продовження абразійних процесів призвело до значних втрат земельних ділянок: частина споруд опинилася безпосередньо на краю урвища, деякі будівлі були зруйновані або повністю зміщені вниз по схилу. Оголені шари ґрунту та обрушені конструкції свідчать про те, що берегова лінія продовжувала активно відступати, а зона руйнування розширювалася. У результаті постраждали господарські споруди, що підкреслює пряму загрозу для інфраструктури та безпеки населення. Таким чином, навесні 2011 року абразія набула критичного характеру, наочно демонструючи необхідність термінових берегоукріплювальних заходів і комплексного підходу до раціонального використання прибережних ресурсів.



Рис.3 База практик ОНМУ «Блакитна затока», квітень 2011 г.

Методи берегоукріплення традиційно включають використання інженерних споруд, таких як підпірні стіни, кам'яна наброска та хвилерізи (рис.4). Ці конструкції дозволяють ефективно протистояти руйнівному впливу хвиль і запобігають подальшому розвитку абразії, однак вони часто змінюють природну динаміку берегової зони та можуть призводити до втрати пляжних територій. Сучасні підходи до захисту узбережжя

передбачають застосування біотехнічних методів, використання рослинності для укріплення схилів і комбінованих конструкцій, що поєднують інженерні рішення з природними елементами. Такий підхід дозволяє знизити навантаження на екосистему та підвищити стійкість берегової лінії, зберігаючи її природні функції.



Рис.4. Берегоукріплення в районі мису Великий Фонтан, м. Одеса.

Характерним прикладом успішного проекту є укріплення дачного кооперативу поруч із базою ОНМУ (рис.5). Тут були застосовані інженерні споруди — бетонна стінка та кам'яний рипрап, які надійно захистили берег від руйнування. Завдяки цим заходам укріплення берега, і процеси абразії були зупинені. Однак побічним результатом стало зникнення пляжної зони: берег укріплений, але рекреаційна функція території втрачена. Цей приклад наочно демонструє подвійний ефект інженерних рішень — вони забезпечують збереження земельних ділянок та інфраструктури, але водночас змінюють природний баланс і позбавляють узбережжя його цінності як зони відпочинку.



Рис.5. Берегоукріплення дачного кооперативу поруч із базою практики ОНМУ «Блакитна затока», квітень 2011 р.

Сучасні підходи до захисту узбережжя передбачають застосування біотехнічних методів, використання рослинності для укріплення схилів та комбінованих конструкцій, що поєднують інженерні рішення з природними елементами (рис.6). Такий підхід дозволяє знизити навантаження на

екосистему та підвищити стійкість берегової лінії, зберігаючи її природні функції.



Рис.6. Сучасні підходи до укріплення узбережжя: поєднання інженерних рішень із природними елементами [3]

Ефективність різних підходів до берегоукріплення доцільно розглядати крізь призму ключових параметрів — економічних витрат, довговічності та екологічної збалансованості. Інженерні споруди класичного типу вирізняються високою стійкістю та здатністю забезпечувати довготривалий захист узбережжя, проте їхня реалізація потребує значних фінансових ресурсів і часто супроводжується порушенням природних процесів. Біотехнічні рішення, навпаки, спрямовані на підтримання природних функцій прибережних екосистем і зменшення антропогенного навантаження, але вони вимагають тривалого періоду адаптації та системного догляду. Комбіновані технології, що інтегрують інженерні та біотехнічні елементи, дозволяють досягти балансу між міцністю та екологічною доцільністю, хоча їхня практична реалізація є більш складною та потребує додаткових організаційних і матеріальних витрат.

Узагальнення отриманих даних показує, що абразія в районі «Блакитна затока» має системний характер і призводить до втрати територій та інфраструктури. Аналіз динаміки абразії в районі «Блакитна затока» показав, що руйнування берегової лінії має системний характер і посилюється під впливом штормових явищ, що призводить до втрати земельних ділянок, пошкодження інфраструктури та зникнення пляжних зон.

Важливо підкреслити, що процеси абразії мають тенденцію до поширення на суміжні ділянки узбережжя, створюючи загрозу для рекреаційного потенціалу регіону. Водночас інтенсивність руйнування посилюється через антропогенне навантаження, зокрема нераціональне використання прибережних територій. Це вимагає розробки комплексних заходів берегоукріплення, які поєднують інженерні та біотехнічні рішення для забезпечення довготривалої стабільності берегової зони.

ЛІТЕРАТУРА

1. Морська природоохоронна стратегія України. – Схвалена розпорядженням КМУ від 11.10.2021 № 1240-р.
URL: <https://surl.li/nmejuo> (дата звернення 15.04.2026)
2. Мащенко О. М. Геоморфологія. Ч. 2. Зональні типи морфоскульптур суходолу : навч. посіб. для студ. спец. «Географія». Полтава : ПНПУ імені В. Г. Короленка, 2016. 32 с.
<http://dspace.pnpu.edu.ua/handle/123456789/7375>
3. Електроний ресурс. URL: <https://www.vecteezy.com/photo/59484287-close-up-of-sea-embankment-maintenance-replacement-and-strengthening-of-the-shore-structural-improvement-infrastructure-repair-urban-beautification-waterfront-maintenance>.

ВИТІСНЮВАЛЬНА ВЕНТИЛЯЦІЯ ЧИСТИХ ПРИМІЩЕНЬ: АНАЛІЗ ФОРМУВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ В ЗЕЛЕНОМУ БУДІВНИЦТВІ

Юрій Бурда

*Харківський національний університет міського господарства
імені О. М. Бекетова,
science.yurii.burda@gmail.com*

Вступ. Витіснювальна вентиляція в умовах чистих приміщень стала одним із ключових напрямів сучасних досліджень вентиляційних систем, оскільки характер розподілу повітря безпосередньо визначає перенесення забруднювачів, теплову стратифікацію та стабільність локального мікроклімату в умовах жорстко контрольованого середовища. У [1] комбіноване аналітичне, чисельне та експериментальне дослідження показало, що організація повітряних потоків у чистих приміщеннях суттєво залежить від конфігурації подачі повітря, особливо при використанні мікропористих припливних панелей. Отримані результати продемонстрували, що зміна вентиляційної схеми істотно впливає на вертикальне перенесення домішок, формування рециркуляційних зон і локальне накопичення частинок, що є критичними параметрами для забезпечення необхідного класу чистоти.

Проблема контролю забруднення набуває особливого значення при роботі вентиляційних систем у режимах зниженого повітрообміну, характерних для енергозберігаючих підходів. У [2] експериментально підтверджено, що зменшення витрати повітря та зміна ієрархії тисків можуть призводити до накопичення забруднень за недостатнього локального контролю повітряних потоків. Одночасно підходи керованої фільтрації продемонстрували потенціал зниження енергоспоживання при збереженні прийнятних показників роботи чистих приміщень, що є

важливим для концепції сталого будівництва.

Інтеграція принципів енергоефективної вентиляції у високотехнологічні чисті приміщення посилюється через зростаючі вимоги зеленого будівництва. У [3] показано, що оптимальні стратегії подачі зовнішнього повітря на основі енергетичного диференційного керування та free cooling дозволяють підвищити енергоефективність чистих приміщень при збереженні стабільних теплових умов.

Значна частина сучасних досліджень зосереджена саме на витіснювальній вентиляції завдяки її здатності формувати вертикальні повітряні потоки зі зниженою турбулентністю в робочій зоні. У [4] встановлено, що витіснювальна вентиляція підвищує ефективність повітрообміну та знижує локальний рівень вуглекислого газу завдяки стратифікованому видаленню повітря, хоча її ефективність значною мірою залежить від розподілу внутрішніх тепловиділень.

Системний аналіз витіснювальної вентиляції підтверджує, що її ефективність безпосередньо пов'язана з формуванням теплових струменів, дією архімедових сил та особливостями спрощеного прогнозування вертикального повітрообміну. У [5] показано, що витіснювальна вентиляція створює сприятливі умови для видалення забруднень за умови правильного балансу внутрішніх теплових навантажень, хоча процес моделювання ускладнюється нерівномірністю стратифікації.

Порівняльні CFD-дослідження вентиляційних режимів демонструють переваги витіснювальної вентиляції порівняно зі змішувальною та стратифікаційною вентиляцією при багатокритеріальній оцінці. У [6] встановлено, що витіснювальна вентиляція забезпечує кращий баланс між тепловим комфортом, видаленням аерозольних забруднювачів та енергоспоживанням, хоча локальна нерівномірність потоків залишається обмежувальним фактором.

Останні дослідження показують, що навіть мінімальні зміни у системі витіснювальної вентиляції можуть суттєво покращити перерозподіл повітряних потоків. У [7] локальні методи перерозподілу повітря дозволили зменшити застійні зони та підвищити ефективність вертикального перенесення без суттєвої реконструкції вентиляційної схеми, що особливо важливо для модернізації існуючих чистих приміщень.

Оптимізація вентиляції фармацевтичних чистих приміщень додатково підтверджує необхідність одночасного врахування чистоти повітря, теплового комфорту та енергетичних витрат. У [8] багатокритеріальна оптимізація показала, що ефективність вентиляції визначається спільним регулюванням витрати повітря, параметрів тиску та температурного режиму, що безпосередньо обґрунтовує необхідність детального аналізу формування мікроклімату в умовах зеленого будівництва.

Мета. Метою дослідження є аналіз формування мікроклімату в чистих приміщеннях при використанні витіснювальної вентиляції в умовах

зеленого будівництва з акцентом на розподіл повітряних потоків, ефективність видалення забруднювачів та енергетичну ефективність.

Методологічна основа дослідження спрямована на аналіз організації повітряних потоків, теплової стратифікації та перенесення забруднювачів у чистих приміщеннях із витіснювальною вентиляцією в умовах зеленого будівництва. Обрані математичні моделі дозволяють оцінити вертикальний рух повітря, температурні градієнти та ефективність вентиляції — ключові параметри, що визначають формування мікроклімату в контрольованому середовищі. Для подальшої числової оцінки запропоновано три взаємопов'язані підходи: аналіз теплової стратифікації, оцінка вентиляційної ефективності та визначення ефективності видалення забруднювачів. Саме ці моделі становлять основу подальшого моделювання і табличного аналізу результатів.

Модель теплової стратифікації:

$$\Delta T = T_{ceiling} - T_{occupied} \quad (1)$$

де:

ΔT — вертикальна різниця температур, °C

$T_{ceiling}$ — температура повітря біля стелі, °C

$T_{occupied}$ — температура повітря в робочій зоні (1,1 м від підлоги), °C

Формула характеризує інтенсивність теплової стратифікації у системах витіснювальної вентиляції. Більша різниця температур свідчить про сильніше вертикальне розділення повітряних шарів під дією архімедових сил.

Розрахунок ефективності вентиляції:

$$\varepsilon_v = \frac{C_{exhaust} - C_{supply}}{C_{occupied} - C_{supply}} \quad (2)$$

де:

ε_v — ефективність вентиляції, безрозмірна величина

$C_{exhaust}$ — концентрація забруднювача у витяжному повітрі, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$

C_{supply} — концентрація забруднювача у припливному повітрі, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$

$C_{occupied}$ — концентрація забруднювача в робочій зоні, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$

Рівняння визначає ефективність видалення забруднювачів із робочої зони відносно витяжного повітря.

Розрахунок кратності повітрообміну:

$$ACH = \frac{Q}{V} \quad (3)$$

де:

ACH — кратність повітрообміну, h^{-1}

Q — витрата припливного повітря, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

V — об'єм приміщення, m^3

Формула використовується для визначення інтенсивності вентиляції та

порівняння режимів повітрообміну при різних схемах витіснювальної вентиляції.

Наведений у таблиці масив даних відображає числову поведінку трьох обраних показників мікроклімату в умовах витіснювальної вентиляції чистого приміщення. Моделювання виконано на основі поступової зміни інтенсивності припливного повітряного потоку, що безпосередньо впливає на теплову стратифікацію, ефективність видалення забруднювачів та кратність повітрообміну. Оскільки витіснювальна вентиляція формує вертикально організовану структуру повітряних потоків, зміна параметрів має нелінійний характер: незначне збільшення витрати повітря може спочатку покращувати видалення домішок, однак надмірне збільшення швидкості потоку здатне послаблювати стратифікацію та локально знижувати вентиляційну ефективність.

Показник теплової стратифікації ΔT відображає температурну різницю між стельовою зоною та робочою зоною, яка формується внаслідок вертикального перенесення повітря під дією архімедових сил. Ефективність вентиляції ϵ_v характеризує здатність системи видаляти забруднення з робочої зони, тоді як кратність повітрообміну АСН відображає загальну інтенсивність оновлення повітря в приміщенні. Така структура даних дозволяє надалі виконати графічний аналіз і порівняти режими вентиляції в умовах зеленого будівництва, де необхідно забезпечити баланс між енергозбереженням та стабільністю параметрів чистого середовища.

Таблиця 1

Параметри мікроклімату при витіснювальній вентиляції в чистому приміщенні в умовах зеленого будівництва

No	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	ϵ_v	АСН, h^{-1}
1	1,8	1,12	8,5
2	2,1	1,18	9,3
3	2,5	1,26	10,7
4	2,9	1,31	11,4
5	3,4	1,37	12,8
6	3,1	1,42	13,6
7	3,8	1,35	14,9
8	4,2	1,48	16,1
9	3,9	1,44	17,3
10	4,5	1,52	18,6

Результати демонструють, що витіснювальна вентиляція формує нелінійну залежність між інтенсивністю повітрообміну та стабільністю мікроклімату в умовах чистого приміщення. Помірне збільшення кратності повітрообміну підвищує вентиляційну ефективність завдяки посиленню перенесення забруднювачів, однак надмірне збільшення повітряного потоку може локально послаблювати стабільність теплової стратифікації, що

проявляється у коливанні значень ΔT . Найвищі показники ефективності вентиляції досягаються за умов достатньо сформованої температурної стратифікації, що підтверджує визначальну роль організації повітряного потоку, а не лише загального об'єму поданого повітря. Отримані тенденції підтверджують перспективність витіснювальної вентиляції як енергоефективного рішення для зеленого будівництва за умови точного налаштування робочих параметрів.

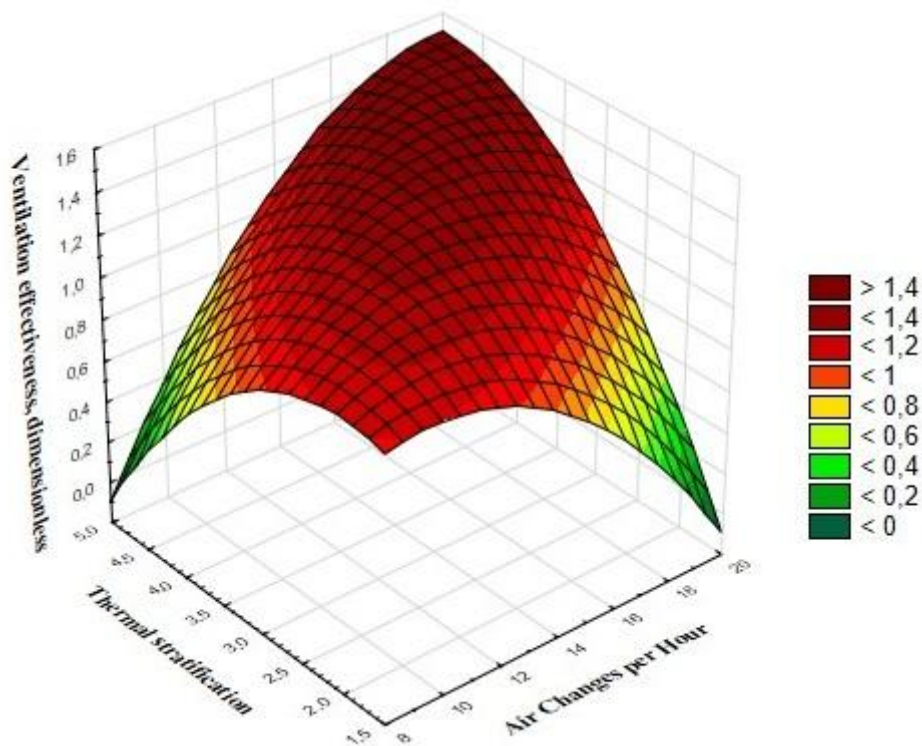


Рис. 1. 3D поверхня ефективності вентиляції залежно від теплової стратифікації та кратності повітрообміну в чистому приміщенні в умовах зеленого будівництва: Вісь X: АСН, h^{-1} (Кратність повітрообміну на годину); Вісь Y: ΔT , $^{\circ}\text{C}$ (Теплова стратифікація); Вісь Z: ε_v (Ефективність вентиляції, безрозмірна)

3D-графік демонструє взаємозалежність між інтенсивністю повітрообміну (АСН), тепловою стратифікацією (ΔT) та ефективністю вентиляції (ε_v) у чистому приміщенні з витіснювальною вентиляцією в умовах зеленого будівництва. Відображення цих трьох параметрів на взаємоперпендикулярних осях дозволяє оцінити, як зміни витрати повітря впливають на вертикальний розподіл температури та, як наслідок, на ефективність видалення забруднень у робочій зоні. Графік підкреслює нелінійну поведінку, характерну для витіснювальної вентиляції: помірне збільшення повітряного потоку значно покращує видалення домішок завдяки посиленню вертикальних теплових потоків, тоді як надмірна витрата повітря може порушувати стратифікацію та локально знижувати

ефективність вентиляції. Ця візуалізація є практичним інструментом для визначення оптимальних режимів роботи, балансування енергоспоживання та забезпечення високої якості внутрішнього середовища в енергоефективних дизайнах чистих приміщень.

Висновки. Аналіз витіснювальної вентиляції в умовах чистих приміщень і зеленого будівництва демонструє чітку взаємозалежність між інтенсивністю повітрообміну, тепловою стратифікацією та ефективністю вентиляції. Моделювані дані показують, що параметри мікроклімату реагують нелінійно на зміни припливного потоку: помірне збільшення кратності повітрообміну (ACH) покращує видалення забруднювачів завдяки посиленню вертикального перенесення, тоді як надмірний повітряний потік може послаблювати стратифікацію та локально знижувати ефективність вентиляції. Теплова стратифікація (ΔT) відіграє ключову роль у підтриманні організованого потоку повітря, забезпечуючи ефективне перенесення забруднень із робочої зони до витяжних каналів.

3D-візуалізація підтверджує ці тенденції, дозволяючи визначити оптимальні робочі діапазони, де ефективність вентиляції максимальна без зайвого енергоспоживання. Такий підхід підкреслює практичне значення витіснювальної вентиляції для енергоефективного проєктування чистих приміщень, забезпечуючи баланс між стабільністю мікроклімату, якістю внутрішнього повітря та споживанням енергії. Методологія, що поєднує моделі теплової стратифікації, вентиляції та видалення забруднювачів, є надійною основою для аналізу та оптимізації мікроклімату у сучасних чистих приміщеннях.

ЛІТЕРАТУРА

1. Cheng, Z., Wang, J., Zhang, Z., Wang, H. S., Lu, Y., Mu, Z., Liu, J., & Lin, Z. (2026). Minimal modification to displacement ventilation for significant improvement through air redistribution. *Building and Environment*, 291, 114254. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2026.114254>
2. Hatif, I. H., Wong, K. Y., Al-Rikabi, I. J., Tan, H., Kek, H. Y., Hawas, M. N., Zhang, M., Zhang, J., & Cai, T. (2025). A multi-criteria CFD investigation of mixing, displacement, and stratum ventilation: Trade-offs between energy efficiency, thermal comfort, and airborne infection control. *Building and Environment*, 289, 114042. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.114042>.
3. Loomans, M., Ludlage, T., Van Den Oever, H., Molenaar, P., Kort, H., & Joosten, P. (2020). Experimental investigation into cleanroom contamination build-up when applying reduced ventilation and pressure hierarchy conditions as part of demand controlled filtration. *Building and Environment*, 176, 106861. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106861>
4. Lu, Y., Huang, J., Wagner, D. N., Lin, Z., Jung, N., & Boor, B. E. (2024). The influence of displacement ventilation on indoor carbon dioxide exposure and ventilation efficiency in a living laboratory open-plan office.

Building and Environment, 256, 111468.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111468>

5. Tognon, G., & Zarrella, A. (2024). Displacement ventilation: A systematic review of the interactions with indoor environment and simplified modelling approaches. *Journal of Building Engineering*, 96, 110474. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110474>

6. Wu, Z., & Li, Y. (2025). Multi-objective optimization of ventilation in pharmaceutical cleanrooms based on response surface methodology and AHP-entropy weight method. *Energy and Buildings*, 329, 115279. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115279>

7. Zhao, F., Cheng, J., Liu, B., Huang, Z., & Li, X. (2020). Indoor airflow and pollutant spread inside the cleanroom with micro-porous supplying panel and different ventilation schemes: Analytical, numerical and experimental investigations. *Journal of Building Engineering*, 31, 101405. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101405>

8. Zhao, W., Li, H., & Wang, S. (2023). Energy differential-based optimal outdoor air ventilation strategy for high-tech cleanrooms concerning free cooling and its performance evaluation. *Building and Environment*, 231, 110025. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110025>

ЗЕЛЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЯК ЗАСІБ ІНЖЕНЕРНОГО МАСКУВАННЯ

Світлана Веркалець

ЗВО «Університет Короля Данила», svitlana.verkalets@ukd.edu.ua

У сучасних умовах розвитку будівництва та зростання загроз для критичної інфраструктури важливого значення набуває питання зниження помітності об'єктів. Традиційно маскуванню розглядається як складова військової інженерії, однак сьогодні воно все частіше інтегрується у цивільне будівництво.

Паралельно з цим активно розвивається концепція зеленого будівництва, яка передбачає використання природних компонентів (рослинності, ґрунтів) для підвищення енергоефективності та екологічності будівель.

Поєднання цих двох підходів дозволяє розглядати зелені технології не лише як екологічний інструмент, але і як ефективний засіб інженерного маскуванню, що знижує візуальну та теплову помітність об'єктів.

Будівництво «зеленого» дому починається з аналізу його розташування. Головний принцип нових технологій пов'язаний з гармонізацією споруди, що зводиться, з навколишньою інфраструктурою та середовищем. У «зеленому» будівництві принциповими є компактність і ефективність простору, енергетична автономність, самоочищення, стійкий повітряний і водний баланс. Тобто «зелений» дім є самопідтримуваним і

перебуває в рівновазі з природою.

Слід окремо зазначити, що «зелене» будівництво ґрунтується на реалізації комплексу функціонально-планувальних, інженерних та конструктивних рішень, які дозволяють витратити менше енергоресурсів. Водночас мешканцям будівлі гарантована санітарно-епідеміологічна та екологічна безпека.[1]

Інтеграція систем озеленення, зокрема зелених дахів і зелених стін, сьогодні є важливою складовою розвитку сучасних міст, оскільки безпосередньо пов'язана з енергоефективністю та принципами сталого розвитку. Такі природні рішення суттєво покращують теплові характеристики будівель і дозволяють зменшити споживання енергії. Водночас ефективність цих систем залежить від їх конструктивних особливостей, а також від змінних фізичних і теплових властивостей, що ускладнює їх дослідження та впровадження [2]. Практика впровадження зелених дахів у різних країнах має свої особливості, однак існують і спільні принципи. Зокрема, при виборі рослин важливо надавати перевагу місцевим видам, які добре пристосовані до кліматичних умов конкретного регіону. Крім того, важливу роль відіграє наявність відповідної нормативно-правової бази, яка стимулює розвиток і впровадження таких технологій [3].

Зелені стіни та фасади, створені з рослин, що ростуть у ґрунті, потребують регулярного догляду, зокрема для підтримання правильного напрямку росту. У періоди тривалої посухи може виникати необхідність додаткового поливу. Якщо ж використовуються більш складні системи вертикального озеленення з автоматичним зрошенням, то вони вимагають постійного професійного обслуговування.[4]

На сьогодні будівельні компанії активно впроваджують сучасні технології, які сприяють не лише підвищенню якості та швидкості будівельних робіт, а й зменшенню негативного впливу на довкілля. Основна увага приділяється використанню екологічних та енергоефективних рішень.

Одним із важливих напрямів є застосування відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних батарей. Вони дозволяють перетворювати енергію сонця в електроенергію без шкідливих викидів у навколишнє середовище. На відміну від традиційних джерел, таких як вугілля, газ чи атомна енергетика, сонячна енергія є практично невичерпною і значно безпечнішою для екології.

Також у сучасному будівництві широко використовуються матеріали вторинної переробки - наприклад, перероблене дерево, скло, бетон або пластик. Це дозволяє зменшити обсяги відходів і знизити витрати на будівництво. При цьому важливу роль відіграють характеристики матеріалів, такі як їх екологічність, рівень шкідливих викидів, довговічність та можливість повторного використання.

Важливим елементом є впровадження енергоефективних рішень, серед яких сучасні системи опалення, утеплення фасадів, а також технології

«розумного будинку». Вони дозволяють значно скоротити витрати енергії та підвищити комфорт проживання. Окрему увагу приділяють раціональному використанню водних ресурсів. Для цього встановлюються системи збору дощової води, її очищення та повторного використання, а також спеціальні датчики контролю витрат води. Це допомагає зменшити споживання прісної води, що є важливим у глобальному масштабі. Крім того, важливим аспектом є планування території та озеленення. Розміщення житлових комплексів подалі від транспортних магістралей і створення зелених зон сприяє зниженню рівня шуму та покращенню якості життя. Древа та рослинність можуть значно зменшувати шумове навантаження, виконуючи роль природного бар'єра [1].

Маскування є важливим елементом інженерного забезпечення, метою якого є зниження помітності об'єктів та введення противника в оману щодо їх розташування, призначення і характеру використання. У сучасних умовах це особливо актуально через розвиток засобів спостереження, зокрема безпілотників, супутників і тепловізійної техніки. У контексті будівництва маскування спрямоване на зменшення візуальної помітності будівель, зниження теплового випромінювання та інтеграцію об'єкта в природне середовище. Об'єктами маскування можуть бути як окремі будівлі, так і цілі комплекси споруд, інженерні системи або елементи інфраструктури.

У сучасному будівництві основними способами маскування є приховування та введення в оману. Приховування полягає у зменшенні або повному усуненні демаскувальних ознак об'єкта. У будівництві це досягається за рахунок використання природних і інженерних рішень, зокрема зелених технологій. До основних засобів приховування можна віднести використання зелених дахів і фасадів, які дозволяють будівлі зливатися з природним середовищем, застосування рослинності для зменшення візуального контрасту між будівлею та навколишнім середовищем, зниження теплового випромінювання завдяки шару ґрунту і рослинності, що виконує теплоізоляційну функцію, раціональне розміщення будівель з урахуванням природних умов місцевості та використання природних матеріалів, близьких до характеристик навколишнього середовища. Таким чином, зелені технології фактично виконують функцію природного камуфляжу, зменшуючи як візуальну, так і теплову помітність об'єкта.

Другим важливим способом маскування є введення противника в оману, яке передбачає створення хибного уявлення про об'єкт. У будівництві цей принцип може реалізовуватись через створення зелених зон, які приховують реальні межі та структуру об'єкта, використання озеленення для зміни зовнішнього вигляду будівель, поєднання зелених технологій з іншими засобами маскування, такими як фарбування або архітектурні рішення, а також імітацію природного середовища за допомогою ландшафтного дизайну. Такі заходи дозволяють не лише

приховати об'єкт, але й створити хибне враження про його розміри, форму або призначення.

Оскільки, зелені технології можуть розглядатися як ефективний засіб інженерного маскуванню, оскільки вони забезпечують як приховування, так і часткове введення в оману за рахунок інтеграції об'єкта у природне середовище. Використання зелених дахів, фасадів та ландшафтного озеленення дозволяє значно знизити візуальну та теплову помітність будівель. Поєднання принципів зеленого будівництва та інженерного маскуванню відкриває нові можливості для створення енергоефективних, екологічних і водночас менш помітних об'єктів, що є особливо актуальним як для цивільного, так і для оборонного будівництва.[5]

ЛІТЕРАТУРА

1. Зелені технології в будівництві: УКР-СТАНДАРТ / Ukraine-Standart. URL:https://ukraine-standart.com.ua/ua/news/zelenye-tehnologii-v-stroitelstve-ustojchivoe-budushhee.html?srsltid=AfmBOoqSmuAKvafmI_x0KIiT-T0dtXKfgtgjkAoxyP1ovH8DD_dUBnY2 (дата звернення: 16.03.2026).
2. Integrating green roofs and green walls to enhance buildings thermal performance/Sciencedirect. URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036013232500006X> (дата звернення: 16.03.2026).
3. Зелені стіни та фасади як елемент екологічної архітектури: теорія і практика / Вісник КНУ ім. Т. Шевченка. Екологія. URL: https://journals.urau.ua/visnukkhnu_ecology/article/view/284331 (дата звернення: 16.03.2026).
4. Зелені стіни та фасади. URL:<https://nbs.wwf.ua/solutions/zeleni-stiny-ta-fasady/> (дата звернення: 16.03.2026).
5. Маскування військ та об'єктів: захист від високоточної зброї / Jurkniga.ua. URL: https://jurkniga.ua/contents/maskuvannya-viysk-ta-obiektiv-zakhist-vid-visokotochnoi-zbroi.pdf?srsltid=AfmBOor800nQcpS0gWOfGe0YVBLoxhBY-7_4NzkIuqkd1eXtlqXQkRkv (дата звернення: 16.03.2026).

ДОЩОВІ САДИ ЯК ПРИРОДООРІЄНТОВАНА СИСТЕМА ОЧИЩЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ СТІЧНИХ ВОД ВІД ВАЖКИХ МЕТАЛІВ: ОГЛЯД ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ДЛЯ УМОВ УКРАЇНИ

Григорій Давиденко¹, Леся Василенко¹

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
davydenko_hh-2024@knuba.edu.ua*

Урбанізація докорінно змінює гідрологічний цикл міських територій: зростання площ непроникних поверхонь збільшує обсяги та швидкість

поверхневого стоку, який акумулює широкий спектр забруднювачів [1]. Серед них особливе місце займають важкі метали (ВМ) — цинк (Zn), мідь (Cu), свинець (Pb), кадмій (Cd) та інші, — надходження яких до міських стоків обумовлено зносом шин і гальмівних колодок, корозією покрівельних і дорожніх матеріалів, атмосферними викидами транспорту та промисловими аерозолями [1, 2].

На відміну від органічних забруднювачів, важкі метали не піддаються біодеградації та мають виражену тенденцію до акумуляції в донних відкладеннях і живих організмах. Навіть за відносно низьких концентрацій вони пригнічують біоценози водойм та накопичуються в харчових ланцюгах. Традиційні системи зливової каналізації не призначені для очищення від розчинених та дрібнодисперсних форм ВМ [2]. Природоорієнтовані рішення (Nature-based Solutions, NbS), зокрема дощові сади, пропонують принципово інший підхід: поєднання фізичної фільтрації, хімічної адсорбції та біологічного поглинання в одному спорудженні [1].

Дощові сади розглядаються як елемент зеленої інфраструктури та сталого міського будівництва, що інтегрується у систему управління поверхневим стоком. Вони є складовою концепції nature-based solutions (NbS), яка передбачає використання природних процесів для вирішення інженерних завдань у містах.

Мета роботи. На основі аналізу актуальних науково-технічних джерел систематизувати дані щодо ефективності дощових садів як системи очищення поверхневих стічних вод від важких металів; виявити ключові механізми видалення ВМ та чинники, що визначають ефективність; обґрунтувати наукові завдання дослідження в контексті адаптації технології до умов України.

Механізми видалення важких металів у дощових садах. Дощовий сад є багатошаровою інженерно-біологічною спорудою (рослинний шар → посадковий ґрунт → проміжний пісок → дренажний ґравій), де поверхневий стік послідовно проходить через систему очисних бар'єрів [3]. Така багатошарова структура відповідає принципам проєктування інженерних систем зеленого будівництва, де поєднуються гідравлічні та біогеохімічні процеси.

Видалення ВМ забезпечується комплексом механізмів: (1) механічна фільтрація та седиментація — затримання ВМ, адсорбованих на завислих твердих частинках, у верхньому шарі субстрату; (2) адсорбція — хімічне зв'язування іонів ВМ із органічними колоїдами, оксидами заліза та марганцю, глинистими мінералами; (3) катіонний обмін у матриці ґрунту; (4) фіторе mediaція — поглинання ВМ рослинами (фітоекстракція) та їх іммобілізація в ризосфері (фітостабілізація) [5].

Інженерна роль дощових садів у системі зеленого будівництва. Дощові сади виконують функції локальних очисних споруд у складі систем сталого дренажу (SuDS), зменшуючи пікові навантаження на зливову каналізацію,

підвищуючи інфільтрацію та знижуючи ризик підтоплень. У контексті зеленого будівництва вони виступають як елемент інтегрованої водної інфраструктури, що забезпечує одночасно екологічний, гідрологічний та містобудівний ефекти. Крім того, дощові сади виконують мультифункціональні екосистемні послуги, зокрема сприяють зниженню ефекту міського теплового острова, підвищенню біорізноманіття та покращенню мікроклімату міських територій.

Роль рослинного компонента. Li et al. (2023) встановили, що видовий склад рослин суттєво впливає як на гідрологічні характеристики системи, так і на здатність дощового саду затримувати завислі тверді частинки — основний носій частково-зв'язаних ВМ [5]. Kumar та Singh (2024) показали, що засаджені варіанти, як правило, перевершують незасаджені за ефективністю адсорбції Cu та Zn [4].

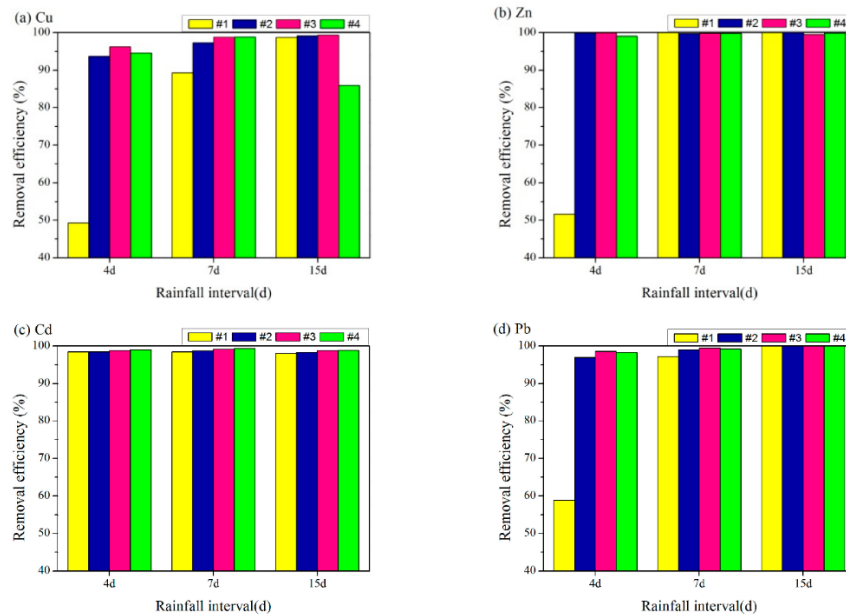


Рис. 1. Ефективність видалення важких металів у мезокосмах дощового саду з різними фільтруючими субстратами (за Wang et al., 2017 [7]).

Кількісна ефективність: огляд літератури. Типові діапазони ефективності видалення ВМ у дощових садах, за даними опублікованих досліджень: Zn — 70–95%, Pb — 75–95%, Cu — 60–85%, Cd — 50–80% [1, 6] (рис. 1). Kumar та Singh (2024) у серії мезокосмних експериментів встановили, що склад посадкової суміші є визначальним чинником адсорбційної ємності системи щодо Cu та Zn [4]. Ramezaniapour et al. (2023) у лабораторному дослідженні багатошарових планчастих дощових садів показали, що оптимізований підбір фільтруючого медіа забезпечує видалення Zn на рівні 91–98% та Cu — 76–94% залежно від конструкції [6].

Просторовий розподіл ВМ та гідрологічні чинники. Важкі метали переважно акумулюються у верхніх 0–10 см ґрунтового шару, де зосереджені органічна речовина і коріння рослин, що обґрунтовує заміну

верхнього шару субстрату як основний спосіб відновлення адсорбційної ємності [6]. Точне прогнозування гідравлічного часу затримки — ключового параметра, що контролює ефективність адсорбції, — можливе завдяки вдосконаленій моделі Kravchenko et al. (2024), яка враховує висоту водяного стовпа на поверхні конструкції [3].

Стан досліджень в Україні та наукова проблема. Систематичних експериментальних даних щодо ефективності дощових садів в аспекті видалення важких металів в умовах України не існує. Більшість зарубіжних досліджень виконана в специфічних кліматичних умовах США, Австралії та Центральної Європи [1, 2], тому їх пряме перенесення некоректне. Залишаються невизначеними: оптимальні склади фільтруючого субстрату з місцевих матеріалів; придатність і потенціал фітоекстракції ВМ місцевими видами рослин; поведінка ВМ при циклах промерзання-відтавання, характерних для континентального клімату України. Ці питання визначають наукову проблему дослідження. Крім того, відсутні адаптовані рекомендації щодо інтеграції дощових садів у міське планування та практику проектування об'єктів зеленого будівництва. Це створює наукову невизначеність щодо ефективності їх застосування в Україні.

Висновки. Дощові сади забезпечують видалення важких металів на рівні 60–98% через комплекс механізмів: фізичну фільтрацію, хімічну адсорбцію та фіторемедіацію. Наявність рослинного покриву та склад фільтруючого субстрату є ключовими чинниками ефективності. Відсутність систематичних вітчизняних даних обґрунтовує актуальність дослідження. Практичні завдання: визначення ефективності видалення Zn, Cu, Pb та Cd у дощових садах з місцевими фільтруючими матеріалами; оцінка потенціалу фітоекстракції місцевими видами рослин; розробка рекомендацій для проектування дощових садів у містах України. Впровадження дощових садів у практику зеленого будівництва сприятиме формуванню кліматично стійких міст, зменшенню навантаження на інженерні мережі та підвищенню ефективності управління міськими водними ресурсами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Wang X. C., Fu G. (Eds.). *Water-Wise Cities and Sustainable Water Systems: Concepts, Technologies, and Applications*. London : IWA Publishing, 2021. 474 p. <https://doi.org/10.2166/9781789060768>
2. Widomski M. K., Musz-Pomorska A. Hydrologic Efficiency of Rain Gardens as Countermeasures to Overuse of Concrete in Historical Public Spaces. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, No. 6. Art. 2527. <https://doi.org/10.3390/su17062527>
3. Kravchenko M., Wrzesiński G., Pawluk K., Lendo-Siwicka M., Markiewicz A., Tkachenko T., Mileikovskiy V., Zhovkva O., Szymanek S., Piechowicz K. Improving Urban Stormwater Management Using the Hydrological Model of Water Infiltration by Rain Gardens Considering the Water

Column. Water. 2024. Vol. 16, No. 16. Art. 2339. <https://doi.org/10.3390/w16162339>

4. Kumar S., Singh K. K. Pollutant removal efficiency of bare and planted rain gardens with diverse planting mixtures. Water Science & Technology. 2024. Vol. 89, No. 12. P. 3226–3236. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.192>

5. Li C., Chen L., Li H., Miao Z., Yang R., Chu L., Mao L. Effects of different types of plants on runoff reduction and suspended solids removal in rain gardens. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management. 2023. Vol. 31, No. 2. P. 113–120. <https://doi.org/10.3846/jeelm.2023.19016>

6. Ramezaniapour M., Khadka R., Sivakumar M. Multi-layered planter box raingarden for zinc and copper removal from stormwater. International Journal of Environmental Science and Technology. 2023. Vol. 20. P. 12611–12624. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05060-y>

7. Wang L., Han Y., He J., Liao S., Dong Q. Removal of Heavy Metals from Urban Stormwater Runoff Using Bioretention Media Mix. Water. 2017. Vol. 9, No. 11. Art. 854. <https://doi.org/10.3390/w9110854>

ВПЛИВ ЯКОСТІ ВОДИ НА СТАН ЗДОРОВ'Я НАСЕЛЕННЯ

***Олена Жукова¹, Павло Старжинський¹, Ігор Прокопенко¹,
Максим Костюченко¹***

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
zhukova.og@knuba.edu.ua, starzhynskyi_ps-2023@knuba.edu.ua,
prokopenko_io@knuba.edu.ua, zhukova.og@knuba.edu.ua*

Сучасний розвиток суспільства нерозривно пов'язаний із посиленням екологічних загроз, спричинених людською господарською діяльністю. Особливо серйозною ця проблема стає у випадку забруднення водних ресурсів, що спостерігається в межах урбоєкосистем [1–5].

Вода є ключовим елементом для підтримання здоров'я людини. Її дефіцит призводить до розвитку процесів зневоднення, які спершу проявляються підвищеною втомлюваністю та ослабленням імунної системи. У подальшому це може спричинити порушення обміну речовин, що негативно впливає на загальний стан організму.

За даними експертів ООН, проблема доступу до чистої води нині є однією з найгостріших у світі. Понад три мільярди людей страждають від дефіциту прісної води. У цьому контексті особливого значення набуває питання збереження водних ресурсів та відповідального ставлення до них.

Воєнні дії на території України значно посилили антропогенне навантаження на водні екосистеми, що призвело до їхнього суттєвого погіршення. Протягом перших місяців повномасштабного вторгнення були зафіксовані значні негативні впливи на водні ресурси, зумовлені

забрудненнями водойм важкими металами та іншими хімічними сполуками. Окрім того, руйнування інфраструктурних об'єктів, таких як дамби, насосні станції й очисні споруди, а також захоплення об'єктів водопостачання, додатково ускладнило ситуацію [1–3].

Хімічні компоненти вибухових речовин і боєприпасів становлять неабияку загрозу для функціонування водних екосистем. Потрапляючи до водного середовища, вони зазнають складних біогеохімічних перетворень, утворюючи стійкі токсичні сполуки. Ці новоутворення можуть тривалий час перебувати у воді, накопичуватися по трофічному ланцюгу та викликати порушення метаболізму у водних організмів.

Особливу небезпеку становлять іони важких металів, таких як свинець, кадмій, ртуть і хром, які містяться в складі військової техніки та боєприпасів. У воді ці елементи утворюють стійкі сполуки, що негативно впливають на фізіологічні процеси у водяних організмах, сприяють зниженню біорізноманіття та порушують функціональну рівновагу екосистем.

Супутнім явищем військових дій є значне зростання викидів в атмосферу оксидів вуглецю, азоту та сірки. Взаємодіючи з атмосферною вологою, ці сполуки утворюють кислотні дощі, які ще більше погіршують гідрохімічний стан водойм і негативно впливають на розвиток водних організмів. Крім того, кислотні опади знижують здатність екосистем до природної саморегуляції та відновлення.

У цих умовах ключову роль відіграють розробка і впровадження ефективних технологій очищення та постійний моніторинг стану водних об'єктів. Використання сучасних біотехнологічних підходів і методів біологічного очищення здатне значно посилити ефективність природних процесів самоочищення у поверхневих водоймах. Застосування біоіндикаторів є важливим інструментом для оцінки результативності заходів із відновлення водних екосистем і відстеження довготривалих екологічних наслідків негативного впливу антропогенних і військових чинників.

Проте ситуація з водними ресурсами продовжує погіршуватися. За останні 150 років об'єм питної води, що припадає на одну людину, скоротився вчетверо. До того ж, за останні 40 років доступна кількість прісної води на кожного жителя планети зменшилася на 60%. У наступні 25 років цей показник, за прогнозами, може впасти ще наполовину.

Однією з ключових умов життя є постійне підтримання водного балансу. За добу організм людини оновлює близько шести відсотків води, а протягом десяти днів замінюється половина її загальної кількості.

Щодня людина втрачає приблизно 2–2,5 літра води і отримує таку ж кількість обратно. Частина цієї води утворюється в процесі біохімічних реакцій всередині організму, а близько двох літрів надходить із їжею та напоями. За підрахунками, за 60 років свого життя середньостатистична

людина випиває близько 50 тонн води — це можна порівняти з цілою цистерною. Цікаво, що значна частка звичайної їжі складається з води: м'ясо містить до 67%, каші — до 80%, овочі та фрукти — до 90%, а хліб — приблизно 50%.

Саме вода допомагає клітинам організму зберігати пружність і об'єм. Більшість внутрішніх процесів відбуваються саме у водних розчинах. Регулярне споживання достатньої кількості рідини сприяє гарному самопочуттю та позитивно впливає на загальний стан організму. Наприклад, збільшення вживання води покращує роботу ендокринних залоз. Дослідження німецьких учених показали, що студенти, які регулярно п'ють більше води, характеризуються підвищеною витривалістю та схильністю до творчості.

У середньому рекомендована норма споживання води становить 2–3 літри на добу, що сприяє підтриманню належного рівня гідратації і збереженню водного балансу в організмі. Одним із найбільш простих підходів для визначення індивідуальної потреби у воді є формули: для чоловіків — маса тіла множиться на 35 мл, а для жінок — маса тіла множиться на 31 мл.

Вживання питної води з підвищеною мінералізацією та жорсткістю вважається фактором ризику для формування патологічних станів сечовидільної системи, а також впливає на рівень реактивності організму та фізичний розвиток дітей. Результати досліджень вказують, що така вода сприяє розвитку комбінованих патологій травного тракту та сечовидільної системи у дітей. Регулярне споживання води з високим вмістом мінералів може призводити до порушень електролітного балансу, збоїв у роботі нирок, серцево-судинної системи, опорно-рухового апарату та органів травлення.

При тривалому споживанні така вода виводиться з організму повільніше, спостерігаються зміни у кров'яному тиску, підвищена схильність до гіпертензивних станів та посилена реактивність судин.

На територіях, де жорсткість питної води перевищує 10 мг-екв/л, спостерігається підвищений рівень захворюваності на сечокам'яну хворобу. Разом з тим є дані, що свідчать про зворотну залежність між жорсткістю води та смертністю від серцево-судинних захворювань (Watts T.E., 1990). Позитивна дія жорсткої води на серцево-судинну систему пов'язана з присутністю іонів магнію.

Нестача кальцію в питній воді порушує функціональний стан серцевого м'яза, призводить до остеомалачії та згодом посилює перебіг серцево-судинних захворювань. Надмірний вміст кальцію, у свою чергу, може стати причиною сечокам'яної хвороби, порушень водно-сольового балансу та раннього окостеніння кісток у дітей. Магній відіграє важливу роль в енергетичному обміні, синтезі нуклеїнових кислот, проведенні нервових імпульсів і має судинорозширювальну дію при гіпертонії. Однак його

дефіцит посилює тяжкість перебігу серцево-судинних захворювань та збільшує ймовірність несприятливих наслідків. При надлишку магнію можливі подразнення шлунково-кишкового тракту, особливо за наявності сульфатів у питній воді.

Питна вода з підвищеним вмістом заліза (від 1 до 5 мг/л) несприятливо впливає на шкіру, викликаючи її сухість і лущення. Однак при тривалому вживанні організм адаптується, і ці ефекти можуть слабшати. У підземних водах часто спостерігається високий вміст заліза, що робить питання видалення елемента під час водопідготовки та вивчення його впливу на здоров'я населення особливо актуальними. Встановлено, що вживання слабомінералізованої води пов'язане з підвищеною частотою таких захворювань, як гіпертонія, виразка шлунка та дванадцятипалої кишки, хронічний гастрит, холецистит, нефрит та ішемічна хвороба серця.

Дослідження також виявили позитивну кореляцію між рівнем хімічних речовин у воді та частотою серцево-судинних захворювань, розладів обміну речовин та порушень репродуктивної функції у жінок. Метали за їх нормальних концентрацій відіграють ключову роль метаболічних процесах організму. Відзначено взаємодію між різними елементами, такими як мідь та молібден, залізо та мідь, ванадій, марганець та цинк, а також цинк та свинець, що підкреслює їх взаємний вплив на обмін речовин.

Серед мікроелементів найбільшу активність виявляють фтор, селен, цинк, мідь, магній, молібден та інші. При надлишку фтору у питній воді спостерігається флюороз, який може виражатися появою плямистості емалі зубів різного ступеня важкості. Споживання питної води з підвищеним вмістом фтору призводить до зниження рівня йодного обміну, що супроводжується зменшенням адаптаційних можливостей організму.

ЛІТЕРАТУРА

1. Udod V.M., Madzhd S.M., Kulynych Y.I. Regional features of the structural and functional organization of the development of technogenically altered aquatic ecosystems. *Visnyk of Kremenchuk National University*. 2017. Iss. 3. P. 104.
2. Ромашенко М.І., Яцюк М.В., Дегтяр О.О. Концептуальні засади реформування водного господарства України. *Вісник аграрної науки*. 2018. № 12(789). С. 9–18.
3. Makarenko N., Budak O. Waste management in Ukraine: Municipal solid waste landfills and their impact on rural areas. *Annals of Agrarian Science*. 2017. Vol. 15, no. 1. P. 80–87.
4. Klimchik O.M., Pinkina T.V., Pinkin A.A. Implementation of the integrated water resources management system based on the basin principle. *ScienceRise*. 2018. Vol. 4, no. 45. P. 36–40.
5. Strokal V.P., Kovpak A.V. The basin approach for water resources management in Ukraine: The SWOT analysis. *Biological Systems: Theory and*

МОДЕЛЮВАННЯ ЗА МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КІНЕМАТИКИ ПІДСИЛЕННЯ ФУНДАМЕНТІВ ПЕРЕХРЕСНИМИ ПАЛЯМИ

Алла Моргун¹, Дмитро Записов¹

*¹Вінницький національний технічний університет,
morgunallaS@qmail.com, dzapisov@gmail.com*

Технічна модернізація діючих підприємств, а також надбудова й реновація житлових і громадських будівель розглядаються як ефективні інструменти сталого розвитку, що дозволяють у стислі терміни та з меншими ресурсними витратами, порівняно з новим будівництвом, підвищити виробничу ефективність існуючих площ і покращити кількісні та якісні характеристики житлового фонду. Аналіз практики підсилення фундаментів свідчить, що реалізація проєктів реконструкції, як правило, супроводжується суттєвим зростанням навантажень на основи — до 30–50% від початкових значень. Водночас із підвищенням постійних навантажень відбувається і збільшення тимчасових впливів, як тривалої, так і короткочасної дії, що потребує врахування принципів ресурсоефективності та довговічності конструкцій.

Якщо несуча спроможність основи недостатня для сприйняття нових навантажень постає проблема зміцнення основи чи підсилення фундаменту.

Практика показала, що при підсиленні фундаментів частіше всього використовуються буронабивні та буроін'єкційні палі.

Конструкції на ґрунтовій основі відносяться до класу важких задач через те, що ґрунти являють собою різношарове пористе середовище. Тому на практиці постійно відбувається пошук нових способів підсилення фундаментів, поліпшення їх несучої спроможності та удосконалення методів розрахунку. При розгляді цих задач необхідно ґрунт подавати як нелінійно деформоване середовище.

Довговічність та забезпечення стійкості будь якої інженерної споруди в переважній більшості залежить від ґрунтової основи, а по різноманіттю і мінливості ґрунти не мають аналогів серед матеріалів, які використовуються в будівництві. Вони завжди неоднорідні та анізотропні. На сьогоднішній день важливою задачею при проєктуванні задач підсилення залишається визначення достовірних фізико-механічних характеристик властивостей ґрунтів, які не є постійними, а змінюються на будівельному майданчику в результаті дії навантажень, техногенних вод, дією температурних впливів.

Важливою залишається задача реконструкції побудованих споруд із-за стисливих умов роботи, негативною дією струсів на існуючі споруди, нерідко приходиться шукати нові технічні рішення.

Підняття поверховості споруди піднімає тиск в основах до 1 МПа, ґрунт вже буде працювати в нелінійній стадії. В цьому випадку для прогнозування осідання необхідно залучення пружно-пластичних моделей та сучасних ЕОМ з метою прийняття оптимальних проектних рішень.

Найбільш сучасною моделлю на теперішній час є подання ґрунтового масиву в вигляді скінчено-елементної моделі (рис. 2, 4), що враховує різномірність ґрунту (наявність ґрунтових шарів з різними інженерно-геологічними властивостями) та нелінійною залежністю між напруженнями та деформаціями (σ - ϵ).

В роботі за числовим методом граничних елементів спрогнозовано поведінку під навантаженням підсиленого доволі відомим способом (рис. 1) фундаменту мілкого закладання на натуральній основі нахиленими перехресними палями [4].

Підсилення фундаментних конструкцій потребує визначення їх несучої спроможності та напружено-деформованого стану (НДС) після проведеної реконструкції.

В роботі для побудови прогнозу несучої спроможності підсиленого фундаменту використано пружно-пластичну модель дискретного середовища ґрунту та числовий МГЕ. Цей метод МГЕ зарекомендував себе як надійний, доступний для широкого застосування, економічний. Область його застосування відноситься до всіх слабких ґрунтових основ.

Дослідження несучої спроможності фундаментів, підсилених нахиленими палями-трубами в твердих та напівтвердих суглинках і супісках з коефіцієнтом пористості $e=0.9$, вологістю $W=0.11-0.22$, були виконані [4] в котловані, засипаному місцевим ґрунтом з пошаровим ущільненням. На насипний ґрунт були встановлені збірні залізобетонні фундаменти розміром 1×1 м і глибиною закладання 0.5 м. Було проведено дослідження їх роботи під навантаженням до осідання 40 мм, рис.1, крива 1.

Два фундаменти було підсилено шляхом забивання під них нахилених паль-труб діаметром 168 мм з закритим кінцем, порожнини яких після заглиблення були заповнені бетоном. Довжина кожної палі підсилення 3.5 м. Результати експериментальних досліджень подано на рис. 1, крива 2. Польові дослідження [4] зафіксували різке збільшення граничного опору фундаментів (більше ніж в 3 рази).

Для визначення несучої спроможності підсиленого фундаменту використано пружно-пластичну модель дисперсних середовищ, яка забезпечує достатню відповідність між результатами розрахунку і дійсністю. Поведінка ґрунту під навантаженням в роботі описувалась інтегральним рівнянням, отриманим К. Бреббія [1], яке являє собою інтегральний синтез рівнянь рівноваги, геометричних та фізичних (1):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij,j} + b_j &= 0 \\ \varepsilon_{ij} &= 0,5(u_{i,j} + u_{j,i}) \\ \sigma_{ij} &= C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \end{aligned} \right\} \Rightarrow C_{ij}(\xi) u_j(\xi) + \int_{\Gamma} p_{ij}^*(\xi, x) u_j(x) d\Gamma(x) = \int_{\Gamma} u_{ij}^*(\xi, x) p_j(x) d\Gamma(x), \quad (1)$$

де зліва в позначеннях Ейнштейна записано:

$\sigma_{ij,j} + b_j = 0$ – статичні рівняння рівноваги;

$\varepsilon_{ij} = 0,5(u_{i,j} + u_{j,i})$ – геометричні рівняння;

$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$ – фізичні рівняння;

u_{ij}^*, p_{ij}^* – базисні функції - фундаментальні рішення, що відповідають полю вагових функцій, які задовольняють рівнянню рівноваги Лапласа в області Ω та відповідають одиничним впливам в півпросторі.

В якості фундаментальних рішень (позначених *) в роботі прийнято сингулярні рішення Р. Міндліна, отримані для півплощини. Дискретизація бокової поверхні та вістря проводилась постійними граничними елементами, активна зона ґрунтової основи дискредитувалась трикутними елементами, (рис. 2, 4).

Це дало можливість здійснити перехід від функціонального інтегрального співвідношення (1) до його алгебраїчного аналога - системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

Перехід граничного стану (перехід ґрунту в стан пластичної течії) визначався за октаедричною теорією міцності, та критерієм текучості Мізера-Шлейхера-Боткіна (2):

$$\begin{cases} f = T + \sigma_{окт} \cdot \operatorname{tg} \psi - \tau_s = 0 & \text{при } \sigma_{окт} \leq p_0 \\ f = T + p_0 \cdot \operatorname{tg} \psi - \tau_s = 0 & \text{при } \sigma_{окт} > p_0 \end{cases}, \quad (2)$$

Виникнення та розвиток дилатансійних зон в ґрунтовій основі, які є головним джерелом дисипації механічної енергії, описувалось неасоційованим законом пластичної течії (3):

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{dF}{d\sigma_{ij}}, \quad F \neq f \quad (3)$$

та дилатансійними співвідношеннями Ніколаєвського, Бойка [2, 3]:

$$d\varepsilon_{ij}^e = d\varepsilon_{шарове}^p + d\varepsilon_{девіаторне}^p \quad (4)$$

$$d\varepsilon_{шарове}^p = \lambda(x) d\gamma^p \quad (5)$$

де $d\varepsilon_{ij}^p$ – вектор приросту пластичних деформацій ґрунтової основи;

$d\gamma^p$ – скалярна характеристика формозміни, другий інваріант девіатора деформацій $I_2(D_\varepsilon)$;

$\lambda(x)$ – коефіцієнт дилатансії.

$$d\varepsilon_{девіаторне}^p = D_{ij} d\lambda \quad (6)$$

де D_{ij} – девіатор напруг;

$d\lambda$ – скалярний коефіцієнт простого навантаження.

В процесі розрахунку компонується матриця впливу МГЕ, яка з точки зору будівельної механіки є матрицею піддатливості ґрунтової основи, а як відомо, матриця, обернена до матриці піддатливості, дає матрицю жорсткості. Числові дослідження проводились із наступними середньозваженими фізико-механічними властивостями ґрунту:

$$\rho = 1.7 \text{ т/м}^3, \quad \rho_{\text{dry}} = 1.49 \text{ т/м}^3, \quad e = 0.84,$$

$$E = 10.54 \text{ МПа}, \quad \varphi = 24^\circ, \quad c = 14 \text{ КПа} \quad \varepsilon_{\text{sw}} = 0.08, \quad \nu = 0.33.$$

На рис. 1 подано дані експериментальних статичних досліджень [4] поведінки під навантаженням фундаменту мілкого закладання та проведено порівняння з цими даними результатів числових досліджень за МГЕ (рис. 2, 4).

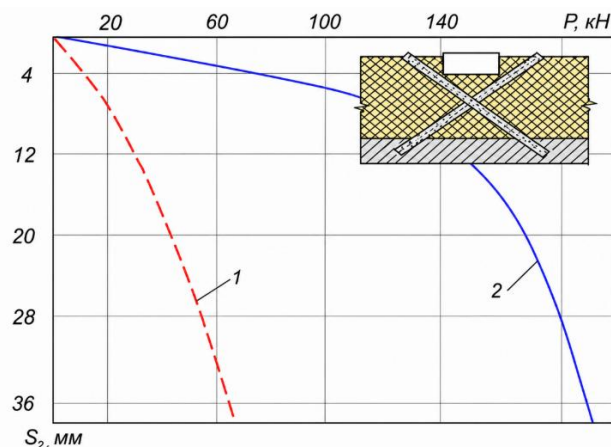


Рис. 1: 1 – графіки експериментальних досліджень фундаментів [4], встановлених на насипний ґрунт; 2 – після підсилення нахиленими палями-трубами [4]

Згідно даних числового моделювання за МГЕ нелінійна модель для визначення несучої спроможності підсиленого нахиленими палями фундаменту мілкого закладання фіксує збільшення несучої спроможності в 3.1 рази. Згідно експериментальних даних збільшення несучої спроможності склало 3.24 рази.

Достовірність моделі підтверджено проведенням аналізом результатів числових досліджень за МГЕ, та виконаним співвідношенням з експериментальними даними, які отримані безпосереднім заміром тиску в ґрунтовій основі мездозами [4], та дають хорошу відповідність.

Дане конструктивне рішення є ефективним проєктним рішенням підсилення фундаменту мілкого закладання і гарантує надійність експлуатації споруди. З урахуванням впливу наявності слабких ґрунтів на території України в ґрунтових основах виникають додаткові вертикальні деформації, пов'язані з руйнуванням їх структури.

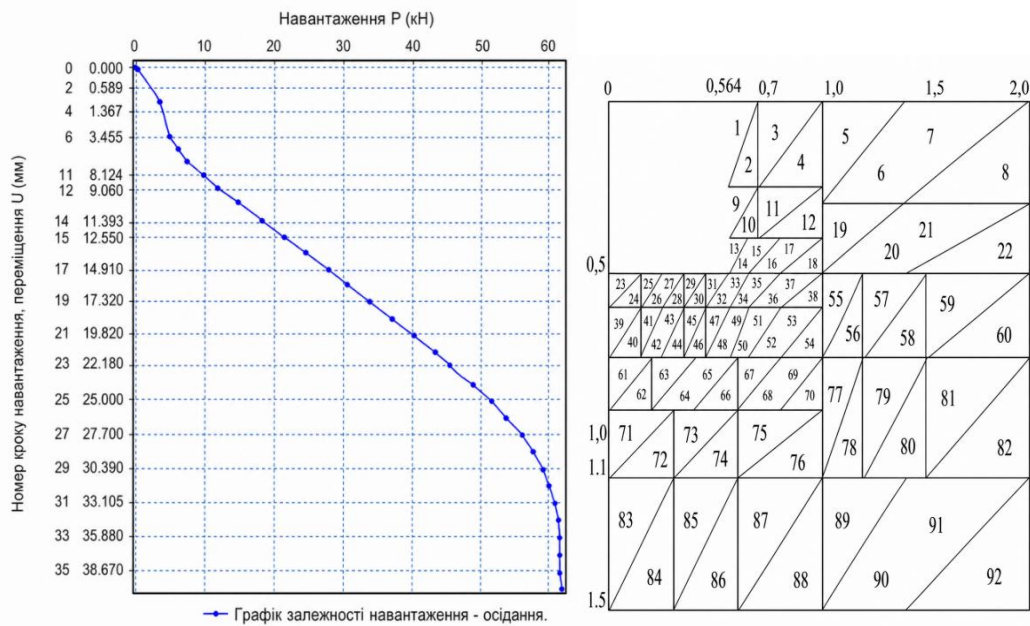


Рис. 2: а) результати прогнозування поведінки фундаменту без підсилення; б) дискретизація активної зони фундаменту без підсилення

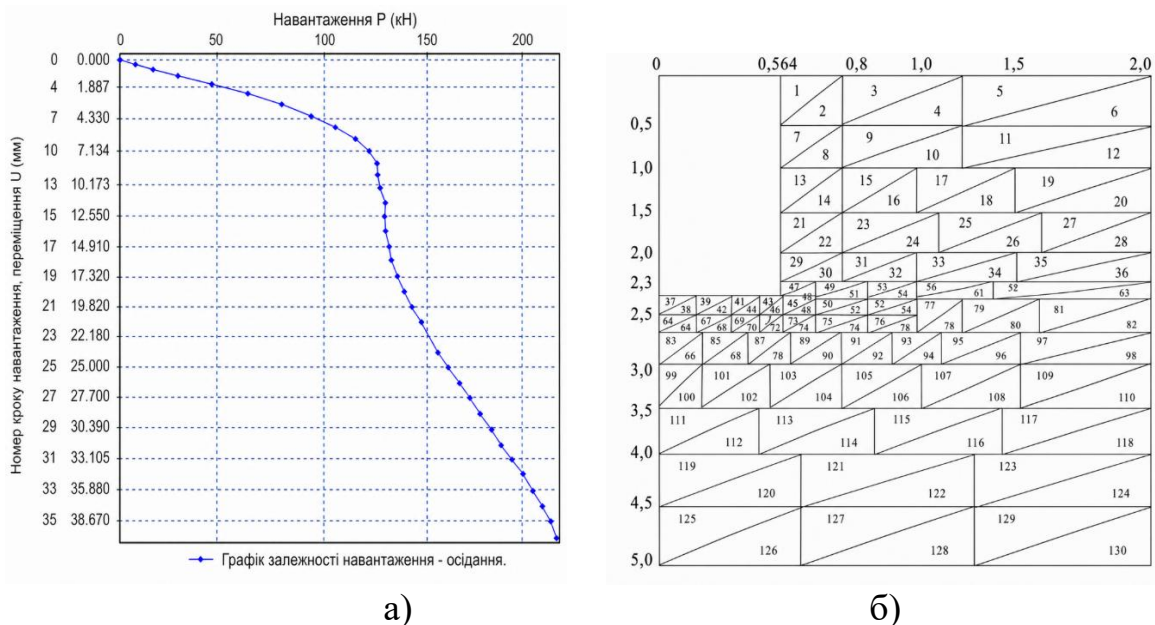


Рис. 3. а) – прогноз за МГЕ осідання фундаменту, підсиленого нахиленими палями; б) дискретизація активної зони підсиленого фундаменту

Водонасичення таких ґрунтів призводить до зміни НДС і впливає на умови надійної експлуатації будівельних об'єктів. В зв'язку з цим виникає необхідність підсилення фундаментів цих будівельних об'єктів, поліпшення несучої спроможності цих фундаментів. Тому на практиці весь час відбувається пошук нових способів підсилення фундаментів, поліпшення їх несучої спроможності.

В складних інженерно-геологічних умовах погіршення фізико-механічних властивостей веде до підвищення деформацій та зменшення несучої спроможності фундаментів. Запропонований у роботі підхід до аналізу напружено-деформованого стану (НДС) продемонстрував високу надійність, економічну ефективність, та придатність до широкого впровадження, що відповідає принципам ресурсозбереження та сталого будівництва. Його застосування є доцільним для інженерних рішень на слабких ґрунтових основах. Водночас, з позицій підвищення екологічної та техніко-економічної ефективності, існуючі методики розрахунку таких варіантів підсилення потребують подальшого вдосконалення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бреббія К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методи граничних елементів. 1987. – 523 с.
2. Бойко І. П. Теоретичні основи проектування пальових фундаментів на пружно-пластичній основі / І. П. Бойко // Основи та фундаменти. – К. : Будівельник, 1985. № 18. – С. 11–18.
3. Ніколаєвський В. Н. Дилатансія та закони незворотного деформування ґрунтів / В. Н. Ніколаєвський // 3б. Основи, фундаменти та механіка ґрунтів. - 1979. - № 5. - С. 29-31.
4. Козаков Ю.Н., Буланкін Н.Ф., Стоян Ю.Ф. Підсилення фундаментів палями, влаштованими за допомогою пневмопробійників. ОФМГ . № 4. 1990.
5. 5.Зоценко М.Л., Яковлев А.В. Приклади розрахунку основ і фундаментів сільських будівель і споруд./ Київ. НМК ВО . 1982.
6. D. Drucker, W. Prager. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. Quarterly of Applied. Mathematiks. 1952.10. № 2
7. Моргун А. С. Застосування МГЕ у розрахунках паль в пластичному середовищі ґрунту. Вінниця: Універсум–Вінниця, 2001. – 64 с.

ПРОБЛЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОННИМИ ВІДХОДАМИ

Олена Жукова¹, Марія Юхимець¹

¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
zhukova.og@knuba.edu.ua, zhukova.og@knuba.edu.ua

Інформаційні та виробничі технології продовжують активно розвиватися, постійно замінюючи застарілі системи новими електронними та електричними продуктами, що відрізняються конкурентною ціною, підвищеною продуктивністю та естетичним дизайном. Разом з цим змінюється і сама концепція споживання. З підвищенням рівня життя людей скорочується термін служби електронних виробів, що веде до збільшення

обсягів електронних відходів. Цей процес стимулює зростання матеріальних потреб споживачів і прискорює процеси урбанізації. Підвищення економічного рівня населення тягне за собою і зростання попиту. Електронні продукти швидко стають популярними, а щорічне споживання електроніки помітно збільшується. Враховуючи прагнення виробників знизити витрати на виробництво і збільшити випуск недорогих пристроїв, ситуація стає ще більш складною.

При цьому кількість застарілої електроніки невпинно зростає. Чимала частка цих електронних відходів переробляється непрофесійними підприємствами, які просто розбирають їх для продажу на вторинних ринках. Альтернативно, дорогоцінні метали, що містяться в електронних відходах, витягуються за допомогою низькотехнологічних та забруднюючих методів, таких як кислотне вилуговування і спалювання. Обидва ці методи утилізації можуть завдати серйозної шкоди довкіллю.

Електронні відходи часто помилково сприймають виключно як відходи, пов'язані зі старими комп'ютерами або ІТ-обладнанням загалом. У міжнародній літературі також використовується термін «Відходи електричного та електронного обладнання», який є синонімічним. Різні визначення електронних відходів узагальнені у таблиці 1.

Таблиця 1

Короткий виклад деяких визначень електронних відходів (розроблено авторами на основі [1])

Посилання	Визначення категорії
Міжнародна спілка електрозв'язку (МСЕ)	Електронні відходи – це електричне або електронне обладнання, що відноситься до відходів, включаючи всі його компоненти, вузли та витратні матеріали, що є частиною устаткування на момент його переходу у категорію відходів
ОБСЕ	Будь-який побутовий прилад, що споживає електроенергію і досяг кінця свого життєвого циклу
Базельська конвенція про контроль за транскордонним перевезенням небезпечних відходів та їх видаленням	Електронні відходи включають широкий і постійно розширюється спектр електронних приладів, починаючи від великої побутової техніки, такої як холодильники, кондиціонери, стільникові телефони, стереосистеми та видаткові електронні товари та закінчуючи комп'ютерами, викинутими їх користувачами.
Європейська Директива про відходи електричного та електронного обладнання (WEEE)	Відходи електричного та електронного обладнання, включаючи всі компоненти, вузли та витратні матеріали, які є частиною продукту на момент утилізації
Глобальний екологічний фонд (GEF)	Електронні відходи - це викинуті вироби або компоненти, яким потрібне електроживлення або батареї для виконання своїх функцій.

Узагальнюючи сказане вище, можна запропонувати таке визначення: електронним відходам (e-waste) - це загальний термін, використовується для опису всіх типів старого, що відслужив свій термін або викинутого електричного та електронного обладнання, такого як побутова техніка, офісне обладнання та ін., що працює від електрики.

Проблема електронних відходів є однією з найгостріших проблем для циркулярної економіки. Закінчення терміну служби електричного та електронного обладнання є серйозною проблемою для навколишнього середовища та здоров'я людини через наявність токсичних речовин. Глобальне виробництво електронних відходів оцінюється у 20-50 Мт/рік, що дорівнює 1-3% від передбачуваного світового виробництва міських відходів (1636 Мт) [2]. Участь кожного електронного елемента у річному виробництві електронних відходів, E (кг/рік), залежить від маси кожного електронного елемента, m (кг), його кількості (номери) на ринку та споживання, n , та його середнього життєвого циклу, l_m (рік)

Електронні комп'ютери із середнім життєвим циклом 3 роки роблять більший внесок у загальний потік електронних відходів у порівнянні з холодильниками та електричними плитами, що мають середній життєвий цикл 10-12 років. Деякі типи електронних відходів разом з їх масою та передбачуваним життєвим циклом узагальнені у таблиці 2.

Таблиця 2

Життєвий цикл електронних відходів

Електронний прилад	Маса, кг	Розрахунковий термін експлуатації, років
Персональний комп'ютер	25	3
Мобільний телефон	0,1	2
Копіювальний апарат	60	8
Телевізор	30	5
Кондиціонер	55	12
Посудомийна машина	50	10
Електрична плита	60	10
Морозильна камера	35	10
Фен	1	3
Праска	1	10
Електричний чайник	1	3
Мікрохвильова піч	15	7
Холодильник	35	10
Пилосос	10	10
Пральна машина	65	8

Електронні пристрої, починаючи від великої побутової техніки, освітлювальних приладів, механічних дозаторів, медичних приладів, пристроїв управління та моніторингу та закінчуючи споживчою електронікою, такою як іграшки, комп'ютери, мобільні телефони, спортивне

та розважальне обладнання, а також електричні та електронні прилади, вважаються формами електронних відходів. Забруднювачі, виявлені в електронних відходах, включають полібромовані дифенілові ефіри, хлоровані біфеніли, ртуть, свинець, олово, нікель та кадмій. Спалювання електронних відходів також може утворювати шкідливі для здоров'я людини речовини, такі як фурани, діоксини, ароматичні та поліциклічні вуглеводні, хлористий водень.

Найбільш важливим аспектом управління електронними відходами є їх переробка та відновлення, що має переваги для довкілля, економіки та здоров'я людини. Електронні відходи вважаються ресурсом лише тоді, коли цінні елементи відновлені та повторно використані.

Існує 10 різних типів електронних відходів (таблиця 3).

Таблиця 3

Класифікація електронних відходів

Категорії	Приклади
Велика побутова техніка	Холодильники, пральні машини, електричні плити, кондиціонери, електричні радіатори та ін.
Дрібна побутова техніка	Тостери, праски, годинники, вакуумні очищувачі, електричні чайники, блендери та ін.
Телекомунікаційне обладнання	Ноутбуки, телефони, калькулятори, принтери, копіювальна техніка та ін.
Електронні інструменти	Газонокосарки, дрилі, електровикрутки, швейні машини і т.д.
Освітлювальні прилади	Флуоресцентні лампи, галогенові лампи, світлодіодні прилади, натрієві лампочки та ін.
Споживче обладнання (обладнання для обслуговування споживачів)	Радіоприлади, музичне обладнання, Hi-Fi акустика, відеокамери і т.д.
Обладнання для відпочинку та спорту	Ігрові приставки, бігові доріжки, автотреки, гоночні треки та т.д.
Медичне обладнання	Діалізний апарат, медичні холодильники, морозильники, аналізатори, електронні термометри та ін.
Інструменти для моніторингу та контролю	Термінали збору даних, клапани, детектори диму промислові, регулятори опалення та ін.
Автоматичні диспенсери	Диспенсери для напоїв, розпилювачі, банкомати та ін.

Середній відсоток кожної категорії електронних відходів може змінюватись в залежності від багатьох факторів, включаючи соціально-економічні умови, поведінка споживачів, населення та залежність підприємств та домогосподарств від електронного та електричного обладнання. Проте великі побутові предмети є основним джерелом (42,1%) електронних відходів, за ними слідує ІТ та телекомунікації (33,9%), споживчі пристрої (13,7%) та дрібна побутова техніка (4,7%). Інші категорії мають менший внесок (<2% для медичних, освітлювальних, електричних та

електронних інструментів, тоді як <1% для автоматичних дозаторів, іграшок, спортивних, контрольних та контролюючих пристроїв) для кращого читання. У країнах, що розвиваються, електронні відходи в основному складаються з телевізорів, комп'ютерів і мобільних телефонів.

В даний період класифікатор багатьох країн містить докладну інформацію про товари, які не представляють загрози для навколишнього середовища і не містять цінних матеріалів, а також тих, що не займають високу частку ринку у відходах.

Надлишок цієї інформації створює нагромадження кодів, що ускладнює процес моніторингу, своєю чергою вузькоспрямована інформація обмежує обмін інформацією між країнами, міжнародними інститутами якісної та кількісної оцінки електронних відходів. Наприклад, у розвинених країнах копіювальні апарати будуть документально оформлені як дрібна побутова техніка, а в багатьох країнах, що розвиваються, — як велика побутова техніка, монітори з електронно-променевою трубкою в одних країнах належать до ІТ-обладнання, проте в інших країнах вони можуть класифікуватись як освітлювальні прилади. Дані невідповідності заважають розробці ефективної політики переробки та утилізації електронних відходів.

Швейцарія була першою країною у світі, де була створена та функціонувала офіційна система управління електронними відходами. У країні діють дві різні системи переробки електронних відходів. Однією з них керує SWICO Recycling Guarantee (Швейцарська асоціація з інформації, комунікацій та організаційних технологій) і управляє "коричневим" електронним обладнанням (наприклад, комп'ютерами, телевізорами, радіоприймачами тощо), а інший - S.EN.S (Stiftung Entsorgung Schweiz System) і керує «білим» електричним обладнанням (наприклад, пральними) машинами, холодильниками, духовками тощо) [3,4]. Більш конкретно, споживачі повертають електронні відходи. зручним способом, або через певні пункти збору роздрібних компаній, або транспортуючи відходи прямо до місць переробки. Матеріали транспортуються з пунктів збору на підприємства з розбирання, щоб розібрати та дезінфікувати електронні відходи, видаляючи найбільш токсичні фактори. На підприємствах з переробки електронні відходи ще більш детальне розбирання, подрібнення та сортування, в результаті чого в основному збираються пластик, скло, сталь, алюміній та мідь. Більшість перероблених матеріалів потім відправляється на переробні заводи або ливарні, заводи для остаточного відновлення матеріалів. Інші матеріали, які не можуть бути відновлені, відправляються в сміттєспалювальні печі для отримання енергії, а невелика кількість, зазвичай менше 2%, відправляється на звалища. У швейцарській системі виробники несуть повну відповідальність за застосування та функціонування системи управління, а вся система фінансується за рахунок спеціального збору за переробку, включеного у ціну товару.

У японській системі управління електронними відходами вилучення не є безкоштовним, але споживачі платять певну суму грошей, коли повертають використані електронні продукти продавцям. Японія створила систему вилучення для чотирьох типів електронних відходів (кондиціонери, телевізори, холодильники та пральні машини) з 1998 року. Закон встановлює цільові ставки та накладає суворі штрафи за недотримання [2].

Вилучення металу успішно використовувалося як засіб отримання фінансової вигоди з електронних відходів у розвинених країнах, таких як США, Японія, Тайвань, Європейський Союз та Канада.

ЛІТЕРАТУРА

1. KangLiu, Quanyin Tan, Jiadong Yu, Mengmeng Wang A global perspective on e-waste recycling [Електронний ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2773167723000055>
2. The Global E-waste Monitor 2024. Глобальный мониторинг электронных отходов 2024 г. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Environment/Pages/Publications/The-Global-E-waste-Monitor-2024.aspx>
3. MertDuygan, Grégoire Meylan Strategic management of WEEE in Switzerland—combining material flow analysis with structural analysis
4. Electronic waste recycling rate. Скорость переработки электронных отходов. [Електронний ресурс]. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/electronic-waste-recycling-rate>

СТІЙКІСТЬ ВОДНИХ СИСТЕМ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВІЙНИ

Олександра Ковальська¹, Олена Мітрясова¹

¹*Чорноморський національний університет імені Петра Могили,
alexandraschwarz2313@gmail.com, eco-terra@ukr.net*

Водні ресурси за умов воєнних конфліктів перестають бути стабільним компонентом природного середовища, тому що вони трансформуються до динамічного і вразливого елементу екосистем, який швидко реагує на фізичні, хімічні, техногенні та гідродинамічні порушення, спричинені бойовими діями, що особливо чітко проявляється на прикладі України після 2014 року та в період повномасштабної війни з 2022 року [1-3]. На відміну від мирного часу, коли основними факторами впливу на водні ресурси є промисловість, сільське господарство та урбанізація, під час воєнних конфліктів домінують фактори раптового руйнування гідротехнічних споруд, неконтрольованого надходження забруднюючих речовин, різкої зміни гідрологічних режимів та порушення процесів самоочищення водних об'єктів, що призводить до різких нелінійних змін у функціонуванні водних екосистем [4, 5].

Одним із найбільш масштабних прикладів є руйнування Каховської гідроелектростанції у червні 2023 року, що спричинило раптовий скид приблизно 18 км³ води, внаслідок чого відбулося затоплення понад 600 км³ територій, різке зниження рівня води у водосховищі та трансформація гідрологічного режиму нижньої течії Дніпра [6, 7]. Це явище призвело до одночасного виникнення двох протилежних екологічних процесів, а саме деградації водних екосистем у зоні осушення водосховища та гідродинамічного стресу в зоні затоплення, де спостерігалось масове вимивання органічних речовин, ґрунтів і токсикантів у водне середовище. У перші тижні після руйнування концентрація завислих речовин у воді нижнього Дніпра перевищувала фонові значення у 5-8 разів, що свідчить про активізацію процесів ерозії та вторинного забруднення [8, 9]. В таблиці 1 представлено узагальнення основних типів впливів воєнних дій на водні ресурси за джерелами походження, характером екологічних наслідків та часовими масштабами прояву (табл. 1).

Таблиця 1

Основні типи впливу воєнних дій на водні ресурси та їх екологічні наслідки

Тип впливу	Джерело	Екологічні наслідки	Часовий горизонт
Гідродинамічні (раптові зміни рівня води)	Руйнування дамб, водосховищ.	Зміна руслових процесів, ерозія берегів, порушення гідрологічного режиму.	Коротко– та середньостроковий
Хімічне забруднення	Вибухові речовини, паливно-мастильні матеріали, промислові аварії.	Токсикація води, накопичення важких металів, біоаккумуляція.	Середньо- та довгостроковий
Геохімічний вплив	Затоплення шахт, вивільнення донних відкладів.	Зростання мінералізації.	Довгостроковий
Біологічний вплив	Евтрофікація, зміна трофічних ланцюгів.	«Цвітіння» води, дефіцит кисню, загибель гідробіонтів.	Середньостроковий
Гідроекологічний вплив	Руйнування водної інфраструктури.	Порушення водообміну, зниження самоочищення екосистем.	Коротко- та довгостроковий

Як видно з табл. 1, впливи мають різну природу, але взаємодіють між собою, формуючи комплексні екологічні наслідки, що значно ускладнює їх прогнозування та управління. Наприклад, гідродинамічні зміни можуть

посилювати хімічне забруднення через ресуспензію донних відкладів, що спостерігалось після руйнування Каховського водосховища [6-8]. Додатковим фактором стало вивільнення донних відкладів, які протягом десятиліть акумулювали важкі метали, зокрема кадмій, свинець та ртуть, це призвело до їх повторного залучення у біогеохімічні цикли [9-11].

Важливо підкреслити, що концентрація забруднюючих речовин у воді визначається співвідношенням між обсягом забруднення та обсягом водного потоку, можна описати спрощеною формулою $C = \frac{M}{V}$, де C – концентрація речовини, M – маса забруднюючої речовини, V – об'єм води, і саме різке зменшення V у водосховищі після руйнування дамби призвело до локального зростання концентрації токсикантів [10,11]. Іншим прикладом є пошкодження системи водопостачання, а саме водогону «Дніпро-Миколаїв» у 2022 році, руйнування спричинило не тільки дефіцит прісної води, а й змусило використовувати альтернативні джерела з підвищеним рівнем мінералізації, що в свою чергу вплинуло на ґрунтові води та призвело до засолення ґрунтів у прилеглих екосистемах [6, 12, 13]. У таких умовах змінюється водно-сольовий баланс, який можна охарактеризувати рівнянням $\Delta S = (Sin - Sout)$, де ΔS – зміна солевого балансу, Sin – надходження солей, $Sout$ – їх винесення, і при обмеженому водообміні відбувається накопичення солей у системі [14-15]. Це явище має довгострокові наслідки, оскільки засолення ґрунтів знижує їхню водоутримуючу здатність та порушує рослинний покрив, впливає на гідрологічний цикл через зміну інфільтрації та випаровування. Таким чином, представлена систематизація дозволяє не лише структурувати різноманітні впливи воєнних дій на водні ресурси, але й підкреслює необхідність комплексного підходу до їх оцінки та управління. Такий підхід є критично важливим для забезпечення екологічної безпеки в умовах сучасних викликів.

Але окрім узагальнених впливів, особливу цінність для аналізу становлять конкретні кейси, що дозволяють простежити причинно-наслідкові зв'язки між воєнними діями та трансформацією водних систем. Узагальнення таких випадків для території України подано в табл.2, де відображено найбільш показові приклади порушення водних ресурсів, їх причини та екологічні наслідки (табл.2).

Як видно з табл.2, більшість зафіксованих впливів мають комбінований характер і охоплюють одразу кілька екологічних процесів, що значно ускладнює їх локалізацію та мінімізацію наслідків. Наприклад, затоплення шахт Донбасу спричинило підвищення мінералізації вод, а також зміну редокс-умов в водоносних горизонтах, що активізує мобілізацію важких металів і робить забруднення практично незворотним у короткостроковій перспективі [16-18]. Аналогічно, руйнування Каховської ГЕС стало тригером для каскадних змін, а саме від гідрологічних до біологічних, що

підтверджує системний характер впливу воєнних дій на водні ресурси.

Таблиця 2

Основні кейси впливу воєнних дій на водні ресурси України

Локація / об'єкт	Рік	Тип впливу	Причина	Екологічні наслідки	Довгостроковий ефект
Каховське водосховище	2023	Гідродинамічний, хімічний	Руйнування дамби ГЕС	Затоплення територій, винос забруднень, загибель біоти	Деградація екосистем, зміна руслових процесів
Дніпро (нижня течія)	2023	Гідроекологічний	Зміна стоку після руйнування ГЕС	Підвищення мутності, ерозія берегів	Порушення біорізноманіття
Водогін «Дніпро-Миколаїв»	2022	Інфраструктурний	Пошкодження водогону	Дефіцит прісної води, використання солонуватої води	Засолення ґрунтів
Донбас (шахтні води)	2014-2024	Геохімічний	Затоплення шахт	Вихід мінералізованих вод, забруднення річок	Стійке погіршення якості підземних вод
Сіверський Донець	2022-2023	Хімічний	Бойові дії, руйнування об'єктів	Потрапляння токсикантів, зниження якості води	Довготривале забруднення екосистем
Азовське узбережжя	2022-2024	Біологічний, хімічний	Забруднення та зміна гідрології	Загибель морських організмів, евтрофікація	Зниження продуктивності екосистем

Для більш глибокого розуміння механізмів трансформації водних систем доцільно представити узагальнену концептуальну схему взаємодії факторів впливу, яка демонструє послідовність змін у природному середовищі (рис.1).

Запропонована схема демонструє, що вплив воєнних дій не є одноетапним процесом, а формується як ланцюг взаємопов'язаних реакцій, де кожен наступний етап підсилює попередній. Це означає, що навіть локальні руйнування можуть мати масштабні екологічні наслідки через ефект кумуляції. З огляду на це ефективне управління водними ресурсами повинно враховувати не лише прямі втрати води або інфраструктури, але й вторинні процеси, які часто є більш небезпечними з точки зору довгострокового впливу [16-19].



Рис.1. Трансформація водних екосистем під впливом воєнних дій

В умовах воєнного впливу традиційні підходи до управління водними ресурсами втрачають свою ефективність, оскільки вони орієнтовані на відносно стабільні системи і не враховують різких змін гідрологічних та екологічних параметрів. У зв'язку з цим доцільним є формування адаптивної моделі управління водними ресурсами, яка враховує як прямі, так і опосередковані екологічні ризики воєнних дій та дозволяє мінімізувати їх довгострокові наслідки.



Рис.2. Адаптивна модель управління водними ресурсами в умовах воєнного конфлікту

Така модель базується на принципах інтегрованого управління водними ресурсами, доповнених елементами кризового реагування та екологічної адаптації [20-24]. Адаптивна модель відображає циклічний характер управління, де ключову роль відіграє постійний моніторинг і зворотний

зв'язок, що дозволяє адаптувати управлінські рішення до швидкозмінних умов. Важливою особливістю цієї моделі є інтеграція екологічних індикаторів у процес прийняття рішень, що забезпечує орієнтацію не лише на технічне відновлення водопостачання, але й на збереження екологічної функціональності водних систем (рис.2).

Таким чином, запропонована адаптивна модель дозволяє не тільки реагувати на наслідки воєнних дій, але й зменшувати їх екологічний вплив шляхом своєчасного прийняття обґрунтованих рішень, що є критично важливим для збереження водних ресурсів та екосистем у довгостроковій перспективі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Gleick P. H. Water and conflict: Fresh water resources and international security // International Security. 1993. Vol. 18, No. 1. P. 79–112.
2. Water, security and peace. Paris: UNESCO Publishing, 2019. 184 p.
3. Environmental impacts of armed conflicts: a review. Nairobi: UNEP, 2009. 32 p.
4. Ukraine: Environmental impact assessment (preliminary review). Nairobi: UNEP, 2023.
5. Environmental impacts of the war in Ukraine and prospects for a green reconstruction. Paris: OECD Publishing, 2023.
6. Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment: February 2022 – February 2023. Washington, DC: World Bank, 2023.
7. National Report on the State of the Environment in Ukraine in 2023. Kyiv, 2024.
8. Environmental consequences of the Kakhovka dam destruction. UNEP, 2023.
9. Chapman D. Water quality assessments: A guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring. 2nd ed. London: E & FN Spon, 1996. 626 p.
10. Guidelines for drinking-water quality. 4th ed. Geneva: WHO, 2017. 541 p.
11. Irrigation and salinity: global review on water management. Rome: FAO, 2017.
12. Ukraine: Armed conflict and damage to critical infrastructure. 2023.
13. Water supply disruptions in Mykolaiv region. 2022.
14. Falkenmark M., Rockström J. Balancing water for humans and nature: The new approach in ecohydrology. London: Earthscan, 2004. 247 p.
15. Assessment of environmental impacts in eastern Ukraine. Vienna: OSCE, 2018.
16. Groundwater contamination and risk assessment. Vienna: IAEA, 2017.
17. Environmental impact of the war in Ukraine: water systems. 2022.
18. Ukraine: Environment and conflict assessment. Geneva, 2022.

19. Explosive remnants of war: environmental and health impacts. Nairobi: UNEP, 2015.
20. European waters: Assessment of status and pressures. Copenhagen: EEA, 2018.
21. Odum E. P., Barrett G. W. Fundamentals of ecology. 5th ed. Belmont: Brooks/Cole, 2005. 598 p.
22. Integrated water resources management. Stockholm: GWP, 2000.
23. Wetlands and water: supporting life, sustaining livelihoods. Gland: Ramsar Secretariat, 2013.
24. Ukraine: Environmental damage caused by Russian aggression. Brussels, 2023.

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ТА РОЛЬ КАНІВСЬКОЇ ГАЕС В ЕНЕРГЕТИЦІ УКРАЇНИ

Олена Котовенко¹, Олена Мірошниченко¹, Марина Кравчук²

¹*Київський національний університет будівництва і архітектури,
kotovenko_ea@ukr.net , elenamiroshka@ukr.net*

²*ПрАТ «Укргідроенерго», shuvalovajuliia@gmail.com*

Гідроакумулюючі електростанції (ГАЕС) є найбільш ефективним інструментом зберігання енергії в промислових масштабах. Саме ГАЕС є найбільшим регулятором енергії у світовій енергосистемі, забезпечуючи понад 161 000 МВт акумулюючих потужностей глобально [2]. Принцип роботи такої станції полягає в тому, що вона постійно перекачує величезні об'єми води туди й назад між двома водоймами, які розташовані на різній висоті.

Спорудження гідроакумулюючих електростанцій у безпосередній близькості до існуючих класичних гідроелектростанцій (ГЕС), що формують єдиний гідровузол (як у випадку Канівської ГЕС та проєктованої Канівської ГАЕС), є класичним інженерним рішенням, яке має глибоке техніко-економічне обґрунтування.

Причиною локалізації ГАЕС біля діючої ГЕС є можливість використання наявного водосховища руслової гідроелектростанції як нижнього резервуара для гідроакумулюючої станції, оскільки створення штучних резервуарів необхідного об'єму вимагає колосальних капітальних інвестицій, масштабних земляних робіт та виведення з господарського обігу значних площ земельних ресурсів.

У випадку Канівської ГАЕС функцію нижньої водойми виконує Канівське водосховище, створене греблею існуючої Канівської ГЕС. Повний об'єм цього водосховища становить 2,6 кубічних кілометрів, з яких корисний (активний) об'єм дорівнює 0,3 кубічних кілометрів. Для потреб Канівської ГАЕС планується використовувати лише 0,017 кубічних

кілометрів цього об'єму, що є абсолютно достатнім для забезпечення безперебійної роботи потужних насосно-турбінних агрегатів без суттєвого впливу на загальний гідрологічний режим Дніпровського каскаду [6]. Така конфігурація дозволяє зосередити будівельні зусилля виключно на створенні верхньої штучної водойми на прилеглих висотах (у районі села Бучак) та прокладанні напірних водоводів.

Другою важливою причиною є те, як ці два типи електростанцій працюють разом. Енергосистема потребує, щоб виробництво та споживання електрики завжди були в ідеальному балансі кожної секунди. Основні станції, як-от атомні (АЕС), працюють безперервно і не можуть швидко збільшити чи зменшити обсяги струму, які вони видають. Водночас все більшого поширення набуває використання "зеленої" енергії сонця та вітру [3]. Але їхня робота залежить від погоди і буває дуже нерівномірною (наприклад, сонячні станції дають найбільше струму вдень). Усе це створює додаткове навантаження на систему і ускладнює управління нею.

Для уникнення такої ситуації і використовується ГАЕС — вона працює як велетенська батарея, яка згладжує ці перепади. Вночі, коли споживається мало електрики, хоча атомні станції продовжують її виробляти або коли сонячні станції дають надто багато енергії вдень, ГАЕС починає працювати. Використовуючи цю зайву та дешеву електрику, вона перекачує воду з нижньої водойми (Канівського водосховища) у спеціальний басейн нагорі [2]. Таким чином, зайва електрика перетворюється на запас води, готовий до використання.

Коли ж потреба в електриці різко зростає (найчастіше це буває вранці та ввечері) і струму починає не вистачати, цю накопичену воду з верхнього басейну направляють на турбіни, і станція знову виробляє електрику. Завдяки цьому вдається покрити ранкову та вечірню нестачу енергії в українській мережі.

Крім того, спільна робота звичайної ГЕС та станції-накопичувача (ГАЕС) дає змогу дуже зручно керувати напругою та частотою в усій електромережі. Сучасні турбіни (на зразок тих, що планують встановити на Канівській ГАЕС) є дуже швидкими: вони можуть увімкнутися зі стану спокою на максимальну потужність всього за кілька хвилин. Це створює швидкий та надійний запас на випадок аварій. Оскільки в ГАЕС буде відбуватися кругообіг води між верхнім і нижнім водосховищем, це дозволить ефективно працювати ГЕС навіть у посушливі роки, коли рівень води в Дніпрі падає до критично низьких позначок.

Якщо в 1980-х роках Канівська ГАЕС проектувалася як елемент оптимізації роботи союзної ядерної енергетики, а в 2010-х — як інструмент ринкового балансування, то сьогодні, в умовах повномасштабної війни та курсу на євроінтеграцію, її будівництво набуло статусу критичної національної необхідності. Користь, яку принесе реалізація цього проекту зараз, лежить у трьох стратегічних площинах: фортифікаційно-безпековій,

інфраструктурно-балансуючій та макроекономічній [4].

Найбільш революційним аргументом на користь відновлення будівництва саме зараз є концептуальна зміна архітектури станції, зумовлена військовими реаліями. Починаючи з жовтня 2022 року, енергетична інфраструктура України перебуває під постійним прицілом російських ракетних та дронів атак. За даними генерального директора ПрАТ «Укргідроенерго» Ігоря Сироти, з початку повномасштабного вторгнення гідроенергетичні об'єкти компанії зазнали близько 120 цілеспрямованих ударів [1]. Внаслідок цього було повністю знищено Каховську ГЕС, завдано нищівних пошкоджень Дніпровській ГЕС, а також обстріляно Дністровську та діючу Канівську ГЕС. В умовах дефіциту засобів протиповітряної оборони, класичні наземні гідроелектростанції з їхніми машинними залами та відкритими розподільчими пристроями виявилися надзвичайно вразливими.

З огляду на це, «Укргідроенерго» ухвалило безпрецедентне рішення — внести кардинальні зміни до проєкту Канівської ГАЕС та перенести основні генеруючі потужності (машинний зал, турбіни, генератори) під землю [5]. Таким чином, Канівська ГАЕС має стати першою в Україні підземною гідроакумуючою електростанцією, недосяжною для ураження сучасними балістичними ракетами та дронами-камікадзе [1].

Це рішення спирається на передовий світовий досвід створення захищених енергооб'єктів, наприклад, у Південній Кореї, де підземне розміщення інфраструктури продиктоване загрозою з боку Північної Кореї. [1] В Україні ця концепція вже застосовується для створення мережі засекречених військових заводів, а також підземних шкіл та лікарень у прифронтових регіонах (Харків, Запоріжжя). Підземне розташування турбінного залу Канівської ГАЕС забезпечить створення 1000 МВт абсолютно захищеної генеруючої потужності.

Другим стратегічним виміром користі від Канівської ГАЕС є її абсолютно незамінна роль у реалізації «зеленого переходу». У квітні 2023 року Кабінет Міністрів України схвалив Енергетичну стратегію України на період до 2050 року. Документ визначає амбітні цілі: досягнення частки відновлювальних джерел енергії (ВДЕ - сонячної, вітрової, біоенергетики) в електрогенерації на рівні 25% вже до 2030 року, з перспективою зростання до 80% у довгостроковій перспективі для повної декарбонізації сектору [3].

Проблема полягає в тому, що генерація від сонячних та вітрових електростанцій (СЕС та ВЕС) є вкрай нестабільною та залежить від погодних умов і часу доби. Широке впровадження СЕС призводить до формування особливого графіка коли вдень утворюється гігантський надлишок електроенергії (що змушує системного оператора обмежувати генерацію ВДЕ), а ввечері, зі зниженням сонячної активності, виникає різкий дефіцит, який потрібно негайно чимось перекривати. За аналітичними звітами та моделюванням системного балансу, для інтеграції

заявлених обсягів ВДЕ енергосистемі України критично не вистачає гнучких маневрових потужностей: розрахункова потреба становить до 1,45 ГВт високоманевреної генерації з можливістю швидкого пуску та зупину, а також до 0,74 ГВт систем накопичення енергії (СНЕ).

Канівська ГАЕС, із її проєктною потужністю 1000 МВт, ідеально вирішує цю проблему, функціонуючи як найбільший у регіоні «екологічний акумулятор» [2]. Вона здатна споживати надлишкову енергію СЕС вдень для перекачування води, а ввечері миттєво віддавати 1 ГВт екологічно чистої енергії в мережу. Без наявності таких масштабних систем акумулювання, Україна буде змушена балансувати ВДЕ за допомогою вугільних або газових теплових електростанцій, що нівелює сам сенс декарбонізації, збільшує викиди вуглекислого газу та прискорює знос паркового ресурсу ТЕС.

Окрім того, Канівська ГАЕС забезпечить стабільність паралельної роботи з європейською мережею ENTSO-E. Інтеграція з Європою вимагає жорсткого дотримання стандартів якості електроенергії. Високоманеврові гідроагрегати станції надаватимуть послуги з первинного та вторинного регулювання частоти, забезпечуючи мобільний аварійний резерв, що є обов'язковою умовою надійної роботи в єдиному європейському енергопросторі [4]. Таким чином, ГАЕС виступає технологічним гарантом як кліматичної нейтральності, так і європейської енергетичної інтеграції України.

Будівництво Канівської ГАЕС — це потужний каталізатор для післявоєнного відновлення економіки України. Вартість проєкту оцінюється у 1,5–2 мільярди доларів, що повністю відповідає світовим стандартам. Ці інвестиції дадуть величезний поштовх національній промисловості: завантажать замовленнями вітчизняних виробників енергетичного обладнання, металоконструкцій та цементу. Окрім того, проєкт створить тисячі нових високооплачуваних робочих місць.

Реалізація проєкту побудови ГАЕС призведе до зміни гідроекологічних умов функціонування екосистеми водосховища, зокрема зовнішнього водообміну. До переліку складових водного балансу задаються об'єми води що будуть закачуватись у верхній басейн ГАЕС та скидатися з нього у водосховище.

В роботі [1] відмічається що інтенсивність водообміну водосховища поширюється приблизно на 15%. Вода у водосховищі змінюється протягом 17,4 доби (в наш час період водообміну складає 20 діб). Відповідно прогноз цей може змінюватися, може коригуватися в залежності від зміни проєктних показників потужності ГАЕС. Посилення проточності водосховища вплине на внутрішню динаміку вод. У години пікового навантаження, а саме при функціонуванні Київської і Канівської ГЕС та ГАЕС – у турбінному режимі планується помітне посилення перемішування води вздовж правого берега. Буде мати місце більш активна ніж зараз рухливість водних мас на всій

акваторії включаючи мілководдя лівобережжя.

Як показало дослідження з застосуванням математичного моделювання – структура течії та вид циркуляції вод у водосховищі будуть дещо відмінними. Буде відбуватися відтік води з водосховища включаючи зайняті вищою водною рослинністю мілководдя. Тобто, бодин чи два рази протягом доби буде активізуватись водообмін практично на всьому водосховищі. Це все обумовить позитивний вплив на якість води.

У зимовий період одночасне функціонування комплексу Канівського гідровузла буде чи не єдиним чинником динамічної активності водяних мас, обумовлюючи своєю роботою внутрішньодобові коливання рівня води по всій озерній частині водосховища.

В період весняної повені, в той час коли Київська та Канівська ГЕС функціонують в стабільному режимі, пропускаючи власні витрати води, вплив ГАЕС буде не занадто помітним. Температурний режим водосховища суттєво зміниться тільки поблизу ГАЕС: влітку стане теплішою, взимку холоднішою.

Вплив ГАЕС на формування якості води Канівського водосховища буде позитивним. Насамперед це стосується кисневого режиму, який поліпшиться за рахунок посилення водообміну та перемішування глибинних шарів води з поверхневими. Внаслідок цього очікується насичення води киснем інтенсифікація процесів самоочищення.

В той же час зміна динаміки призведе до переформування ґрунтового комплексу досить значного (30-40 км²) площі дна водосховища. Моделювання процесу показало, що з дна будуть вимиватися майже 6 млн. т. донних відкладень, переважна частина яких (до 80%) будуть акумулюватися в частині водосховища біля греблі. Вся решта рухається у Кременчуцьку водосховище [6].

Даний гідроенергетичний об'єкт не може стати причиною негативних змін в екосистемі Канівського водосховища. Окрім того комплекс гідровузлів (Київська ГЕС та Канівська ГЕС та ГАЕС) можуть розглядатися як потенціальний важель штучного регулювання екологічного стану Канівського і навіть Кременчуцького водосховища.

ЛІТЕРАТУРА

1. Канівська ГАЕС стане першою в Україні недосяжною для ракетних ударів – гендиректор «Укргідроенерго» - Forbes.ua, <https://forbes.ua/news/kanivska-gaes-stane-pershoyu-v-ukraini-nedosyazhnoyu-dlya-raketnikh-udariv-gendirektor-ukrgidroenergo-16072024-22412>
2. Чому ГАЕС – це «екологічні акумулятори» енергосистем? - Укргідроенерго, , https://uhe.gov.ua/media_tsentr/novyny/chomu-haes-tse-ekolohichni-akumulyatory-enerhosystem
3. Збільшення потужностей: синергія гідроенергетики та сонячної енергії - Укргідроенерго, https://uhe.gov.ua/media_tsentr/novyny/zbilshennya-

potuzhnostey-sinergiya-gidroenergetiki-ta-sonyachnoi-energii

4. Гідроенергетика та її роль у перебудові економіки України - Урядовий Кур'єр, <https://ukurier.gov.ua/uk/articles/gidroenergetika-ta-yiyi-rol-u-perebudovi-/>

5. Буде під землею. В "Укргідроенерго" розкрили плани щодо Канівської ГАЕС, <https://www.rbc.ua/rus/news/bude-pid-zemleyu-ukrgidroenergo-rozkrili-1722428648.html>

6. Тімченко В.М., Галат В.В. Вплив Канівської ГАЕС на екосистему Канівського водосховища //Гідроенергетика України, 2017. №№1-2. с. 31-33.

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ КИЇВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

Олена Котовенко, Олена Мірошниченко¹, Юлія Шувалова²

¹Київський національний університет будівництва і архітектури,

kotovenko_ea@ukr.net , elenamiroshka@ukr.net

²ПрАТ «Укргідроенерго», shuvalovajuliia@gmail.com

У енергетичному комплексі України гідроелектростанції займають третє місце після теплових та атомних електростанцій. Сумарна потужність гідроелектростанцій складає 8%.

Екологічні і технічні можливості використання гідроенергії ресурсів України дорівнюють біля 20 млрд. кВт·год. Основний потенціал, що використовується, сконцентрований на гідроелектростанціях Дніпровського каскаду. Загальна потужність Дніпровського каскаду складає 3,8 ГВт, вироблення електроенергії – 9,9 ГВт·год.

Київська гідроелектростанція (Київська ГЕС) була введена в експлуатацію у 1964–1966 рр. і утворила Київське водосховище (Київське море). Проектна площа Київського водосховища складала 922 км², сучасна його площа 824 км², об'єм — 3,73 км³, довжина — проектна 110 км, сучасна — 96 км. Київське водосховище забезпечує вироблення електроенергії, регулювання стоку Дніпра, водопостачання та рекреацію. [1,2].

До складу Київського каскаду також входить Київська гідроакумулювальна електростанція (ГАЕС) – перша у Радянському Союзі, яка була споруджена для збільшення пікової потужності в об'єднаній енергосистемі України та сприяння рівномірному навантаженню теплових й атомних станцій.

Будівництво та експлуатація Київської ГЕС кардинально змінили природний режим Дніпра: замість проточного — зарегульований, зі зменшенням швидкості течії та сезонних коливань рівня води.

Це спричинило підтоплення та заболочування заплавлених територій які становлять близько 10 тис. га сільгоспугідь у зонах впливу водосховищ, активізацію абразії берегів, ерозійних, суфозійних та гравітаційних

процесів, а також трансформацію рельєфу та інженерно-геоморфологічних умов прилеглих територій [1,3].

Коливання рівнів води під час роботи турбін та скидів через греблю посилюють ерозію берегів і періодичне осушення/затоплення мілководі, порушуючи динамічну рівновагу берегових систем [3].

Повільний водообмін у Київському водосховищі (застійний режим через зарегулювання) сприяє накопиченню біогенних речовин (азоту, фосфору) з приток, стічних вод та затоплених родючих ґрунтів. Це призводить до масового розвитку синьо-зелених водоростей (ціанобактерій) яке викликає явища «цвітіння води», особливо інтенсивного з середини літа і до осені. Причинами є зменшення швидкості течії, збільшення прозорості та прогрівання води, надлишок добрив і мийних засобів [4].

Міжнародний огляд підтверджує, що евтрофікація Київського водосховища відбувається як за природних: паводки, абразія, зміна клімату, так і антропогенних факторів: сільське господарство, урбанізація, військові дії. Як наслідок відбувається зміна трофічних зв'язків, зниження біорізноманіття, поява токсичних ціанобактерій, погіршення якості води для рекреації та водокористування. Цвітіння безпосередньо пов'язане з функціонуванням ГЕС: 90 % Дніпра зарегульовано греблями, що порушило природний гідрологічний режим [1,4,5]

Утворення водосховища спричинило осадження наносів, особливо у верхів'ї. За десятиріччя експлуатації його площа зменшилася через замулення та заростання мілководь водною рослинністю, при цьому відбулося зменшення площі Київського моря з 922 км² до 824 км². На оголоному дні з'являються старі пеньки затоплених лісів. Окрім того, накопичення мулу знижують корисний об'єм водосховища, погіршує гідродинаміку та сприяє вторинному забрудненню. Гідродинамічні процеси ГЕС посилюють ерозію та замулення. [1]

Зарегулювання Дніпра порушило міграційні шляхи риб, змінило умови нересту через коливання рівнів. У водосховищі поширилися інвазивні види риб (таких як білий амур, товстолобик тощо), які конкурують з аборигенними видами. Крім того, цвітіння та дефіцит кисню у воді викликають масову загибель риби. Зміни екосистеми вплинули і на іхтіофауну: відбулося збільшення дрібних нецінних видів, трансформація рибного населення. [1,4]

В той же час, можна констатувати, що водосховище діє як «відстійник» для забруднень. Якість води в контрольних створах, які знаходяться вище Київської ГЕС, має перевищення за азотом амонійним, фосфатами, а також ХСК. Розчинений кисень у більшості водойм задовільний (7,95–14,05 мгО₂/дм³), але в окремих пунктах знижується до 1,92–3,04 мгО₂/дм³ [1].

Особливо критичне радіоактивне забруднення, оскільки річка Прип'ять виносить радіонукліди в Київське водосховище. Після Чорнобильської аварії в донних відкладах накопичилося близько $5,4 \times 10^{13}$ Бк/м³ ¹³⁷Cs та 10^{13}

Бк/м³ ⁹⁰Sr. Ризик вторинного радіаційного забруднення зростає при повенях, проривах дамб чи днопоглибленні [6].

Дослідження показують, що Київське водосховище є основним «стоком» для радіонуклідів: ¹³⁷Cs – оскільки до 90 % цезію осідає тут, також лише 43% розчинного ⁹⁰Sr доходить до Чорного моря. Радіонукліди накопичуються в донних відкладах, коливання рівня води і ерозія можуть їх вивільняти [7].

У 2021 р. у воді Прип'яті (м. Чорнобиль) вміст ⁹⁰Sr складав до 100 Бк/м³, ¹³⁷Cs — до 26 Бк/м³; у замкнених водоймах — значно вищі концентрації [1].

Коливання рівнів і ерозія під впливом Київського водосховища можуть вивільняти накопичені в донних відкладах радіонукліди.

Таким чином, можна зробити висновки, що функціонування Київської ГЕС забезпечує енергетичну та водогосподарську безпеку та стабільність, але спричиняє комплексні негативні екологічні наслідки: евтрофікацію, ерозію, замулення, втрату біорізноманіття та накопичення токсикантів. Ці проблеми посилюються антропогенним навантаженням і кліматичними змінами.

Для мінімізації негативних наслідків необхідні посилений моніторинг стану Київського водосховища і Дніпровського каскаду в цілому, модернізація очисних споруд на підприємствах, екологічно безпечні режими роботи ГЕС та програми відновлення екосистеми Дніпровського каскаду.

ЛІТЕРАТУРА

1. Екологічний паспорт Київської області (2023). Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, 194 с. <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/04/Ekologichnyj-pasport-Kyyivska-oblast.pdf>.
2. Київське водосховище // Вікіпедія . https://uk.wikipedia.org/wiki/Київське_водосховище.
3. Багмет О. Б. Вплив Дніпровського каскаду водосховищ на сучасний геоморфогенез прилеглих територій // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія», 2017. https://journals.urau.ua/visnukkhnu_ecology/article/view/120101.
4. Експедиція водосховищами Дніпра дослідила проблему цвітіння води (2021). <https://kyivregion.info/2021/09/26/ekspedytsiya-vodoshovyshhamy-dnipra-doslidyala-problemu-tsvitinnya-vody>
5. Kurovska A. Eutrophication of the Kyiv reservoir of Ukraine: Review // Bioscience. 2024, т. 15, № 1. С. 61–72. <https://bioscience.com.ua/en/journals/t-15-1-2024/yevtrofikatsiya-kiyivskogo-vodoskhovishcha-ukrayini-oglyad-pitannya>.
6. Kivva S. et al. Modeling of major environmental risks for the Kyiv

city, Ukraine from the Dnieper River waters — inundation of coastal areas and contamination by the radionuclides deposited in bottom sediments after the Chernobyl accident // EGU General Assembly 2021. 2021 https://presentations.copernicus.org/EGU21/EGU21-13038_presentation.pdf

7. IAEA. Radiological Conditions in the Dnieper River Basin: Assessment by an international expert team and recommendations for an action plan, Vienna: IAEA, 2006. 200 p. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1230_web.pdf

ДОСЛІДЖЕННЯ І ЗНИЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЇ ГАЛЬВАНІЧНОГО МІДНЕННЯ

***Олена Котовенко¹, Олена Мірошниченко¹,
Марія Носач¹, Єлизавета Гетьман¹***

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
kotovenko_ea@ukr.net, elenamiroshka@ukr.net, mmrns17@icloud.com,
liza.getman13@gmail.com*

Гальванічні технології використовуються в багатьох галузях промисловості: в приладо- та машинобудуванні, електронній, електротехнічній, енергетичній, космічній галузях, будівельній індустрії. Гальванічні покриття дозволяють підвищити твердість поверхні, що робить виріб стійкішим до механічних пошкоджень, стирання та втоми металу, тобто підвищують зносостійкість виробів. Крім того, вони можуть надавати виробам антикорозійні і антифрикційні властивості.

В той же час застосуванні гальванічних технологій обумовлює виникнення екологічного ризику. Використання різноманітних хімічних речовин, у тому числі токсичних, таких як важкі метали, ціаніди, органічні розчинники, обумовлює попадання їх у тверді, газоподібні та рідкі відходи. Стічні води від гальваніки, наприклад, є одними з найбільш токсичних і шкідливих для навколишнього середовища.[1,4]

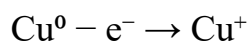
Як приклад впливу гальванічних технологій досліджувалось міднення в процесі виготовлення фрикційних дисків на Державному підприємстві порошкової металургії у м. Бровари Київської області.

Фрикційні диски виготовляються на основі порошкових і металокерамічних матеріалів. У процесі виробництва застосовуються як механічні, так і хіміко-технологічні операції, зокрема гальванічне міднення при обробці поверхонь.

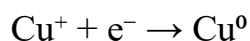
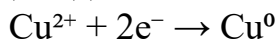
Гальванічне міднення є важливою складовою технологічного процесу виготовлення фрикційних дисків. Воно забезпечує формування проміжного металевого шару, що покращує адгезію між сталеною основою та металокерамічним покриттям, а також підвищує експлуатаційні властивості виробу.

Процес міднення здійснюється у спеціальних гальванічних ваннах, заповнених електролітом. Оброблюваний виріб виконує роль катода, тоді як анодами є мідні пластини. Під дією електричного струму відбувається електрохімічна реакція розчинення міді з анода та її осадження на поверхні катода.

На аноді відбуваються процеси окиснення міді:



На катоді протікають реакції відновлення:



У результаті цих процесів на поверхні сталевोї заготовки формується рівномірний металевий шар міді.

У виробництві фрикційних дисків використовується міднення у ціанідних електролітах, що забезпечує рівномірність покриття навіть на складних поверхнях виробів та високу якість адгезії шару міді до основного металу.

Технологічний процес міднення включає декілька послідовних операцій підготовки поверхні та нанесення покриття.

Першим етапом є травлення, яке проводиться у розчинах соляної та сірчаної кислот при температурі 18–25 °С. Даний процес забезпечує видалення оксидної плівки та активацію поверхні металу. Тривалість обробки становить близько 1 хвилини.

Після травлення виконується промивка у холодній проточній воді при температурі 2–25 °С з витримкою 0,5–1 хвилини. Це дозволяє видалити залишки кислот з поверхні виробів.

Наступним етапом є хімічне знежирення, яке здійснюється у лужних розчинах, що містять гідроксид натрію, кальциновану соду, тринатрійфосфат та інші компоненти. Температурний режим процесу становить 75–95 °С, що забезпечує ефективне видалення органічних забруднень.

Після знежирення проводиться додаткова обробка (декапірування), яка включає короткочасне занурення у кислотні розчини для остаточного очищення поверхні перед нанесенням покриття.

Основний етап процесу — міднення — здійснюється у ціанідних електролітах. Температура електроліту становить 50–80 °С. Процес відбувається під дією електричного струму, в результаті чого іони міді осаджуються на поверхні сталевої заготовки, утворюючи рівномірне покриття.

Після нанесення покриття проводиться операція освітлення, яка забезпечує покращення зовнішнього вигляду та якості поверхні виробу. [1]

Процес міднення супроводжується утворенням виробничих стічних вод, які містять іони міді, ціаністі сполуки, залишки кислот і лугів. Крім

того, під час підготовчих операцій (знежирення, травлення) утворюються забруднені розчини, що потребують подальшого очищення.

Аналіз впливу процесу міднення показав, що основним фактором екологічного ризику цього процесу є вплив на водне середовище (рис.1). Під екологічним ризиком розуміють ймовірність виникнення негативних змін у довкіллі, або віддалених несприятливих наслідків для навколишнього середовища та (або) населення.



Рис. 1. Основні фактори екологічного ризику

Найбільший вплив на формування екологічного ризику має забруднення водних ресурсів, що пов'язано з можливим потраплянням у стічні води сполук міді та ціаністих компонентів.

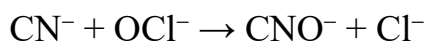
У разі недотримання природоохоронних вимог можливе погіршення якості навколишнього середовища, що призводить до зростання рівня захворюваності населення та зниження якості життя.[2]

В даний час очищення стічних вод передбачає їх попереднє накопичення, фізико-хімічну обробку для видалення іонів міді, а також подальше очищення на біологічних очисних спорудах.

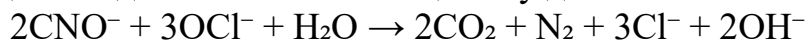
В процесі гальванічного міднення за годину утворюється біля 108 м³ ціанвміщуючих стічних вод. В даний час на заводі для руйнування ціанідів використовують гіпохлорит натрію (NaClO). Процес ведуть при рН 11,0-11,5 при початковій концентрації ціанід-іона в розчині не більше 10,6 г/л. Температура робочого розчину в процесі знешкодження не повинна перевищувати 70 °С.

Процес відбувається у дві стадії:

Перша стадія – окиснення ціанід-іонів до ціанату:



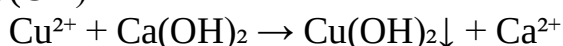
Друга стадія – подальше окиснення ціанату до нетоксичних продуктів:



У результаті цих реакцій токсичні ціаніди перетворюються на CO_2 та молекулярний азот N_2 , що є нетоксичними речовинами. Але крім того утворюються іони хлору, що можуть створювати токсичні сполуки.

Проведення цієї реакції потребує суворого дотримання технологічного регламенту та заходів безпеки: підтримка сильнолужного середовища є обов'язковою для запобігання утворенню летких токсичних сполук хлору.

Після знешкодження ціанідів здійснюється осадження іонів міді у вигляді нерозчинного гідроксиду міді шляхом додавання лужних реагентів – вапняного молока $\text{Ca}(\text{OH})_2$:



Утворений осад $\text{Cu}(\text{OH})_2$ відокремлюється у відстійниках. Освітлена вода направляється на біологічні очисні споруди (БОС) для доочищення, а шлам передається на спеціалізовані підприємства для утилізації.

Ця технологія знешкодження ціанвміщуючих стоків використовує великогабаритні реактори, а реакція протікає повільно. В зв'язку з цим досить гостро постає питання інтенсифікації процесів очистки ціановміщуючих стоків.

Аналіз існуючих технологій поводження зі стічними водами процесу виробництва фрикційних дисків при використанні гальванічного міднення показав, що найбільш безпечним способом руйнування ціанідів у стічних водах є застосування технології озонування, оскільки озон є потужним окисником, який руйнує токсичні ціанідні сполуки до менш шкідливих або нешкідливих речовин. [3]

Озонування дозволяє видаляти ціаніди та важкі метали. Перевагами озонування є його екологічність, оскільки продуктом розкладу озону є кисень, що не утворює вторинних забруднень. При цьому руйнування ціанідів відбувається швидко, забезпечуючи 99% ступінь очищення. Окрім ціанідів, озон одночасно знезаражує воду, видаляє запахи та присмаки.

Застосування такої технології поводження з ціанвміщуючими скидами надасть можливість знизити екологічний ризик від процесу гальванічного міднення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Екологічна безпека гальванотехніки. Частина 1. Стічні води. Механічна та сорбційна очистка: навч. посіб. / М.І. Донченко, С.В. Фроленкова. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 202 с.
2. Ризик екологічний // Словник-довідник з екології : навч.-метод. посіб. / уклад. О. Г. Лановенко, О. О. Остапішина. Херсон : ПП Вишемирський В. С., 2013. С. 155.
3. Природоохоронні технології. Навчальний посібник. Ч.2 :

Методи очищення стічних вод /Петрук В. Г., Северин Л. І., Васильківський І. В., Безвозюк І. І. Вінниця : ВНТУ, 2014. 258 с.

4. Заграй Я.М., Котовенко О.А., Мірошніченко О.Ю. Вплив фізичних і хімічних забруднювачів на еко і біосистеми: Монографія. Київ, 2009. 276 с.

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ КОНСТРУКЦІЙ ДОЩОВОГО САДУ ТА ЗЕЛЕНОГО ПОКРИТТЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРОГРАМНОГО СЕРЕДОВИЩА OPENLCA

Марина Кравченко¹, Тетяна Ткаченко¹, Леся Василенко¹
kravchenko.mv@knuba.edu.ua, tkachenko.tm@knuba.edu.ua,
vasylenko.lo@knuba.edu.ua

¹Київський національний університет будівництва і архітектури

Кліматичні трансформації глобального масштабу разом із інтенсивним розвитком урбанізованих територій формують нові виклики для забезпечення сталого функціонування міст, зокрема у питаннях раціонального використання водних ресурсів, оптимізації енергоспоживання та скорочення техногенного впливу на навколишнє середовище.

Очікується, що до 2050 року приблизно 68 % населення планети проживатиме в межах міських агломерацій, що значно підвищує навантаження на природні ресурси й інженерні системи, тоді як вже сьогодні міста є джерелом понад 70 % світових викидів CO₂ [1]. У зв'язку з цим особливої актуальності набувають підходи, спрямовані на досягнення вуглецевої нейтральності, серед яких важливу роль відіграє розвиток зеленої інфраструктури. До її ключових компонентів належать дощові сади (Rain Garden, RG) та зелені дахи (Green Roofs, GR), що інтегруються в міське середовище як елементи природоорієнтованих рішень і сприяють підвищенню екологічної стійкості та ефективності урбанізованих систем [2].

Впровадження зелених конструкцій узгоджується з Цілями сталого розвитку ООН до 2030 року [3]. Зокрема, вони сприяють реалізації ЦСР 11 «Сталий розвиток міст і громад», зменшуючи прояви ефекту міського теплового острова, покращуючи якість атмосферного повітря та підвищуючи привабливість урбанізованого середовища. Водночас такі рішення підтримують досягнення ЦСР 13 «Боротьба зі зміною клімату», оскільки сприяють поглинанню вуглецю та пом'якшенню кліматичних змін, а також підвищують енергоефективність будівель. Окрім цього, дощові сади та зелені дахи роблять внесок у досягнення ЦСР 15 «Збереження екосистем суші», забезпечуючи умови для підтримки біорізноманіття, а також ЦСР 6 «Чиста вода та належні санітарні умови», завдяки ефективному

регулюванню дощових стоків [4].

Для об'єктивної оцінки екологічних переваг і потенційних обмежень зелених конструкцій широко використовується метод аналізу життєвого циклу (LCA), який дозволяє здійснити всебічне дослідження їх екологічної результативності протягом усього періоду існування.

Цей підхід є важливим інструментом екологічного управління, що базується на врахуванні повного балансу матеріальних та енергетичних потоків за концепцією «від колиски до могили». Залежно від встановлених системних меж, LCA включає стадії видобування і постачання ресурсів, виробничі процеси, транспортування, етап експлуатації та обслуговування, можливість повторного використання чи перероблення, а також демонтаж і кінцеву утилізацію [5].

У цьому контексті використання спеціалізованого програмного забезпечення для аналізу життєвого циклу набуває вирішального значення для здійснення всебічних досліджень. До найбільш поширених інструментів належать SimaPro, GaBi, Umberto та OpenLCA, які дають змогу не лише кількісно оцінювати екологічні впливи та виявляти потенційні компроміси між окремими стадіями життєвого циклу, але й слугують основою для прийняття управлінських рішень і розроблення екологічної політики [6].

Особливе місце серед них займає OpenLCA (Німеччина) – безкоштовна платформа з відкритим програмним кодом, що є доступною альтернативою комерційним продуктам у сфері LCA. Програма характеризується зручним і зрозумілим інтерфейсом, а також підтримує інтеграцію з міжнародними базами даних, що забезпечує можливість проведення комплексних оцінок із урахуванням екологічних, економічних і соціальних складових. Завдяки відкритості архітектури та відсутності ліцензійних обмежень OpenLCA широко застосовується в наукових дослідженнях та освітній діяльності.

Метою даного дослідження є здійснення порівняльного аналізу впливу зелених покриттів (GR) та дощових садів (RG) на основні кліматичні та ресурсні показники із використанням методології оцінки життєвого циклу в середовищі OpenLCA.

Для досягнення поставленої мети у дослідженні використано програмне середовище OpenLCA версії 2.6 (2025) та базу даних ELCD 3.2 (редакція GreenDelta, v.2.18, 2022), що забезпечило моделювання життєвого циклу, облік матеріально-енергетичних потоків і розрахунок екологічних показників.

Для моделювання в середовищі OpenLCA було обрано дві конструкції зеленої інфраструктури: RG, реалізований у 2024 році, та GR. Конструкція RG призначена для локального управління дощовими стоками з покрівлі площею 52 м² і має площу 2,55 м²; вона включає багатошарову систему (мульча, ґрунт, пісок, гравій, геотекстиль і фільтрувальні елементи). Для порівняння використано екстенсивне зелене покриття GR, змодельоване для тієї ж площі водозбору (52 м²), що забезпечує коректність LCA-аналізу. GR

також має багат шарову структуру (субстрат, дренаж, фільтрувальні та захисні шари, гідроізоляція).

У моделюванні враховано лише конструктивні матеріали та транспортні процеси (у т.км), тоді як рослинний компонент не включено через обмеження бази даних. Було проаналізовано такі категорії екологічного впливу: GWP100 (потенціал глобального потепління за 100-річний період), AP (потенціал підкислення), EP (потенціал евтрофікації) та AD (потенціал виснаження абіотичних ресурсів).

На рисунках 1 і 2 наведено склад матеріалів та їхні кількісні показники для моделювання конструкцій RG та GR в розрахунку на одиницю площі 1 м² у програмному середовищі OpenLCA.

Inputs/Outputs - RAIN GARDEN

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reven...	Uncertainty	Avoided wa...	Provider	Data quality...	Location	Description
diesel	Energy carriers and techno...	2.00000	kg		none		Diesel, c...			
excavated material	Materials production/Othe...	280.00000	kg		none		Excavato...			
gravel 2/32	Materials production/Othe...	500.00000	kg		none		Gravel 2...			
polyethylene terephthal...	Materials production/Plast...	0.20000	kg		none		Polyethyl...			
polypropylene fibres (PP)	Materials production/Plast...	0.10000	kg		none		Polyprop...			
sand 0/2	Materials production/Othe...	480.00000	kg		none		Sand 0/2...			
spruce wood	Materials production/Wood	12.00000	kg		none		Spruce ...			
transport in t*km	Transport services/Other tr...	0.50000	t*km		none		Lorry tra...			
water	Materials production/Water	1500.00000	kg		none		Liquid P...			

Outputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reven...	Uncertainty	Avoided pro...	Provider	Data quality...	Location	Description
RAIN GARDEN		1.00000	m2		none					

Рис. 1. Вхідні параметри та матеріальний склад моделі «Rain Garden» у середовищі OpenLCA

Inputs/Outputs - GREEN ROOF

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reven...	Uncertainty	Avoided wa...	Provider	Data quality...	Location	Description
diesel	Energy carriers and techno...	1.20000	kg		none		Diesel, c...			
excavated material	Materials production/Othe...	50.00000	kg		none		Excavato...			
gravel 2/32	Materials production/Othe...	48.00000	kg		none		Gravel 2...			
Kaolin coarse filler	Materials production/Othe...	30.00000	kg		none		Kaolin C...			
polyethylene terephthal...	Materials production/Plast...	0.20000	kg		none		Polyethyl...			
polypropylene fibres (PP)	Materials production/Plast...	0.30000	kg		none		Polyprop...			
polystyrene (general pur...	Materials production/Plast...	0.50000	kg		none		Polystyre...			
polyvinylchloride resin (...)	Materials production/Plast...	1.40000	kg		none		Polyvinyl...			
sand 0/2	Materials production/Othe...	48.00000	kg		none		Sand 0/2...			
spruce wood	Materials production/Wood	7.50000	kg		none		Spruce ...			
transport in t*km	Transport services/Other tr...	8.00000	t*km		none		Articulat...			

Outputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reven...	Uncertainty	Avoided pro...	Provider	Data quality...	Location	Description
GREEN ROOF		1.00000	m2		none					

Рис. 2. Вхідні параметри та матеріальний склад моделі «Green Roof» у середовищі OpenLCA

Аналіз результатів показав (рис. 3), що RG має вищі екологічні впливи на етапі будівництва, особливо за показниками AD та GWP100, що зумовлено значною матеріаломісткістю та використанням мінеральних і

органічних компонентів. Основне навантаження формується через видобування, транспортування та підготовку матеріалів. Аналогічні висновки підтверджено в інших дослідженнях, де будівельна фаза визначена як найбільш впливова.

Для зеленого покриття (рис. 4) на етапі будівництва зафіксовано загалом нижчі екологічні впливи порівняно з RG, що пояснюється меншою масою матеріалів і тоншими шарами субстрату. Водночас суттєвий внесок у вплив формують полімерні та гідроізоляційні компоненти, виробництво яких є енергоємним, тому показники за AD та GWP100 для GR відносно вищі, ніж за AP та EP.

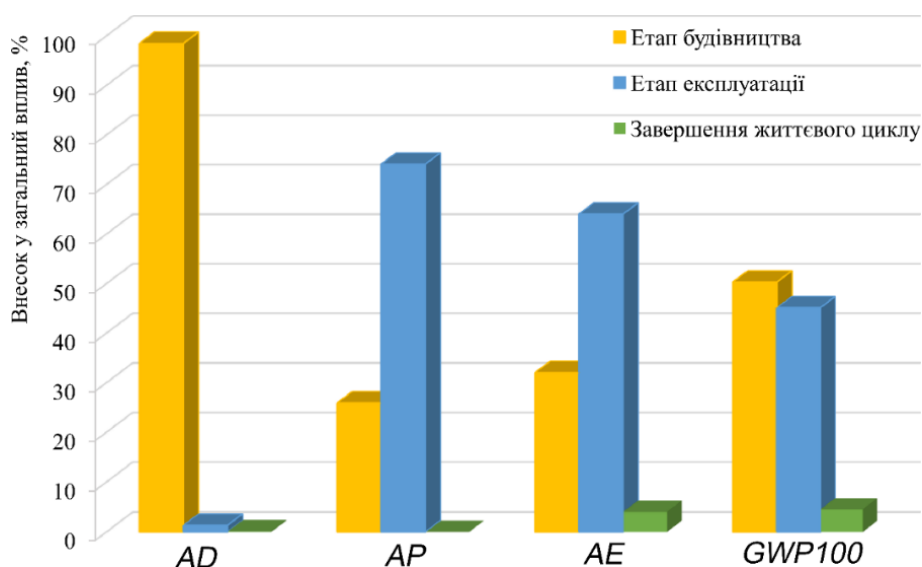


Рис. 3. Відносний внесок етапів життєвого циклу RG в основні категорії екологічного впливу

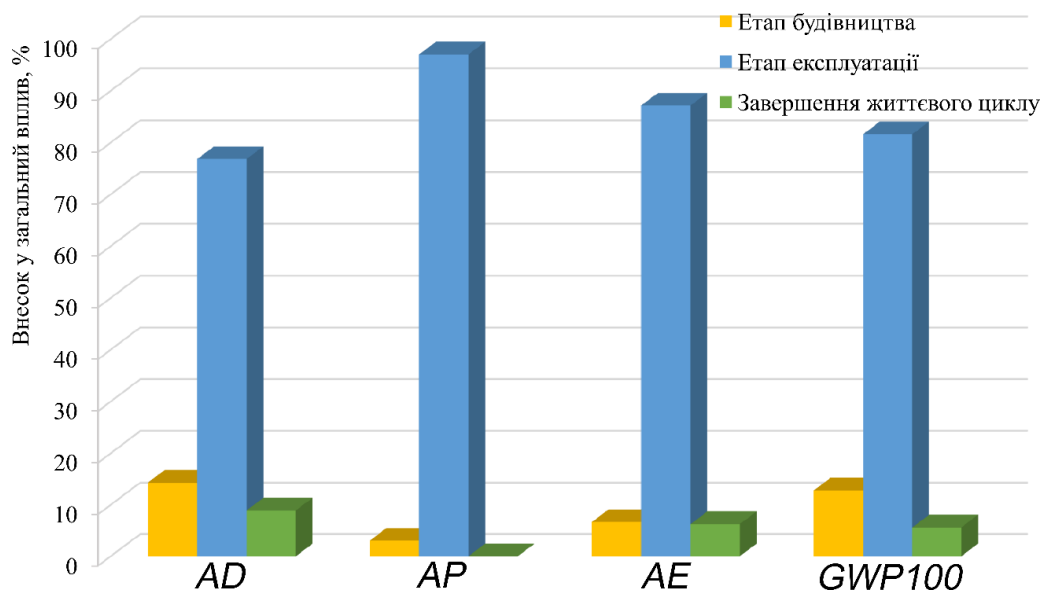


Рис. 4. Відносний внесок етапів життєвого циклу GR в основні категорії екологічного впливу

Аналіз показав, що ключовим матеріалом, що формує екологічний вплив RG, є кварцовий пісок у проміжному фільтраційному шарі (товщина 10–30 см), основний внесок якого пов'язаний із видобуванням, обробкою та транспортуванням, впливаючи на AD, AP та GWP100.

Додатковим джерелом впливу є мульча з кори, що використовується для покриття ґрунту і підтримки рослинності; її внесок найбільш помітний у AP та EP через біохімічний розклад та вивільнення поживних елементів, а також у GWP100 через енергозатратні етапи підготовки й транспортування. Для зниження екологічного навантаження доцільно розглядати альтернативи, такі як мульча з місцевих подрібнених деревних залишків або вторинні матеріали, наприклад гумова мульча з перероблених шин.

Отже, порівняльна оцінка життєвого циклу конструкцій RG та GR у OpenLCA показала, що RG має вищий екологічний вплив на етапі будівництва через значну масу мінеральних матеріалів (пісок, гравій) і транспортні витрати, тоді як на етапі експлуатації її вплив низький. GR характеризується меншою матеріаломісткістю при будівництві, проте вищим впливом під час експлуатації через регулярне обслуговування та допоміжні системи.

Основні джерела впливу RG – мінеральні компоненти та транспорт, GR – полімерні та гідроізоляційні матеріали. Результати підтверджують доцільність комбінованого використання RG та GR у міському середовищі відповідно до функціональних завдань, а також важливість стандартизованих підходів у LCA для підвищення порівняльності та ефективності проєктних рішень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Wu C., Liu W., Deng H. Urbanization and the Emerging Water Crisis: Identifying Water Scarcity and Environmental Risk with Multiple Applications in Urban Agglomerations in Western China. *Sustainability*, 2023. Vol.15. P. 12977. doi:10.3390/su151712977.
2. Hou J., Wang Y., Zhou D., Gao Z. Environmental Effects from Pocket Park Design According to District Planning Patterns—Cases from Xi'an, China. *Atmosphere*, 2022. Vol. 13. P. 300. doi:10.3390/atmos13020300.
3. Pons Fiorentin D., Martín-Gamboa M., Rafael S., Quinteiro P. Life Cycle Assessment of Green Roofs: A Comprehensive Review of Methodological Approaches and Climate Change Impacts. *Sustain. Prod. Consum.*, 2024. Vol. 45. P. 598–611. doi: 10.1016/j.spc.2024.02.004.
4. Kravchenko M.V., Tkachenko T.M. Development of Methods for Quantifying the Effectiveness of Rain Garden Design in the Context of Rainwater Management. *Environ. Saf. Nat. Resour.*, 2024. Vol. 50. P. 19–35. doi:10.32347/2411-4049.2024.2.19-35.
5. Bagheri K., Davani H. An Integrated Framework for Stormwater Management and Life Cycle Assessment of Rainwater Harvesting: A

Comparative Study of Two Underserved Communities. Sci. Total Environ., 2024. Vol. 956. P. 177220. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.177220.

6. Sečkar M., Schwarz M., Golej J., Veverková D. Life Cycle Assessment and Software Tools Comparison. Int. J. Environ. Sustain. Dev., 2025. Vol. 24. P. 145–162. doi:10.1504/IJESD.2025.145333.

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ В ЗЕЛЕНОМУ БУДІВНИЦТВІ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Марина Кравченко¹, Юлія Шувалова¹

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури
kravchenko.mv@knuba.edu.ua, shuvalova_yo-2025@knuba.edu.ua*

Останнім часом концепція сталого розвитку набуває ключового значення у сфері будівництва. Зелене будівництво (Green Building, GB) є важливою складовою цієї концепції, оскільки спрямоване на раціональне використання ресурсів без їх надмірної експлуатації та покращення якості навколишнього середовища й умов життя. Експлуатація зелених будівель сприяє зменшенню навантаження на водні, земельні та енергетичні ресурси, забезпечуючи більш здорове середовище.

У рамках GB виділяють сім ключових напрямів: оцінка життєвого циклу будівель, ефективне планування майданчика та споруд, застосування ресурсоефективних матеріалів, покращення якості внутрішнього повітря, енергоефективність, раціональне використання води та зменшення відходів. За визначенням Агентства з охорони навколишнього середовища США, GB передбачає створення будівель і застосування процесів, які є екологічно чистими та ресурсоефективними протягом усього життєвого циклу – від проектування та будівництва до експлуатації, обслуговування, модернізації та демонтажу. Зелені будівлі також відомі як сталий або високопродуктивний сектор будівництва, що дозволяє зменшити забруднення, ефективно використовувати природні ресурси та покращувати продуктивність і здоров'я мешканців (рис. 1).

Систематичний огляд досліджень GB показує активний розвиток технологій та практик, включаючи використання відновлюваних джерел енергії та оптимізацію планування, що забезпечує довгострокову стійкість будівель. Дослідження [1] відзначають, що GB покращує здоров'я мешканців, сприяє переробці матеріалів, знижує викиди CO₂ та інших шкідливих газів, а також сприяє розширенню зелених насаджень.

Серед основних інструментів оцінки ефективності GB – сертифікаційні системи LEED, BREEAM та GBCA, які постійно оновлюються для максимальної ефективності застосування зелених технологій. Досягнення цілей GB відбувається через технічні, управлінські та поведінкові заходи, що сприяє реалізації будівель з нульовим енергоспоживанням.

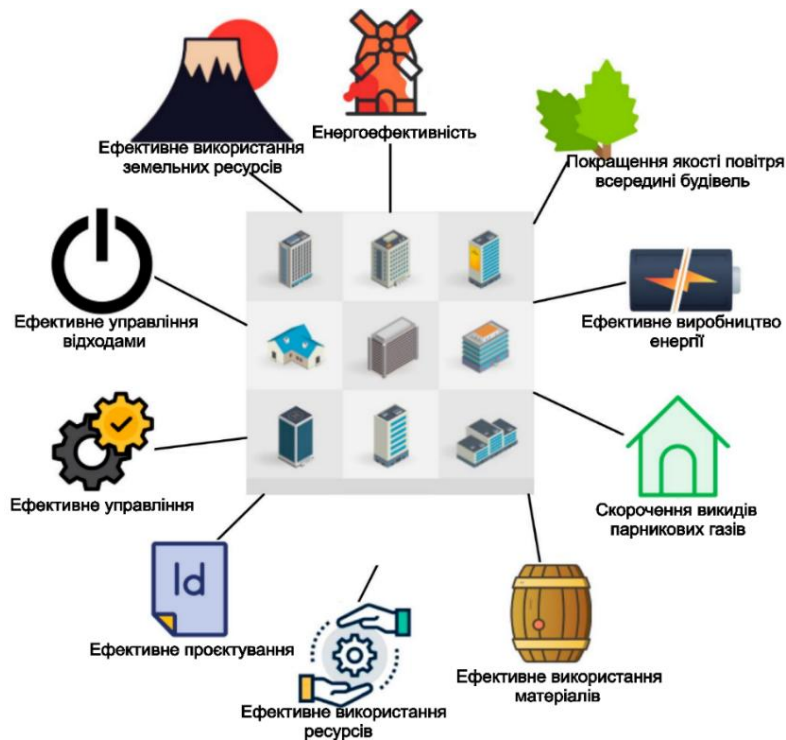


Рис. 1. Параметри сталого розвитку зелених будівель

За даними науковців [2], зелені будівлі економлять 20–30 % води та 40–50 % енергії порівняно з традиційними спорудами, підвищують якість повітря на 8 %, а також сприяють збереженню біорізноманіття. Економічно загальна вартість таких будівель може бути нижчою на \$280–410 у порівнянні з традиційними. У США будівлі відповідають за близько 40 % викидів CO₂ та споживання енергії і води, однак об'єкти, сертифіковані за LEED, зменшують викиди CO₂ на 34 %, споживання енергії на 25 % та води на 11 %, а також переробляють понад 80 млн тонн відходів.

Сталий розвиток визначається як забезпечення економічних, екологічних та соціальних потреб сучасного покоління з одночасним гарантуванням можливості їх задоволення для майбутніх поколінь, відповідно до звіту Брундтланд «Наше спільне майбутнє». Дослідження [3], показало ефективність зелених будівель, що використовують перероблені матеріали та побічні продукти промисловості. Автори [4], наголошують, що для готельних об'єктів основними критеріями є сталий дизайн із низьким енергоспоживанням, високою теплоефективністю та застосуванням перероблених матеріалів, що забезпечує практичні рекомендації для розвитку готельного сектору Непалу.

У дослідженні [5] було виявлено, що безпека користувачів є ключовим фактором оцінки соціальної стійкості житлових будівель. Дослідження [6], підкреслює важливість ефективного використання природних ресурсів через інтеграцію зелених покриттів, які регулюють мікроклімат та покращують якість повітря, зменшуючи вуглецевий слід. Автори [7], акцентують увагу на мінімізації будівельних відходів у процесі реалізації

GB-проектів та порівнюють ефективність заходів у США та Китаї за сертифікацією LEED. Автори також підкреслюють необхідність впровадження системи рейтингу GB для комплексної оцінки екологічних і соціальних показників будівель.

Різноманітні дослідження продовжують вивчати фактори, що впливають на проектування та реалізацію GB, враховуючи як внутрішні, так і зовнішні чинники. У роботі [8], підкреслюється, що вартість, знання та інтереси виступають ключовими бар'єрами, а мотивація, практика, ставлення, цінності та культура – ефективними підходами знизу вгору для впровадження зелених практик у промисловості.

Вивчення специфічних аспектів GB показує важливість технічних і експлуатаційних рішень. Адаптація систем вентиляції та кондиціонування дозволяє підвищити енергоефективність будівель, а оптимізація природної вентиляції сприяє покращенню мікроклімату та якості повітря.

Дослідження показують, що швидкість вентиляції суттєво впливає на здоров'я мешканців будівель. Симптоми захворювань часто пов'язані з недостатньою вентиляцією, низькою якістю повітря та високим рівнем CO₂. Дослідження [9] продемонструвало, що більшість приміщень не відповідають вимогам щодо здорового внутрішнього середовища; лише незначна частина офісів забезпечує допустимий рівень усіх забруднювачів повітря. Загалом, зелена сертифікація будівель покращує якість повітря порівняно зі звичайними будівлями, однак наявність «зеленої» технології не гарантує оптимальних показників внутрішнього середовища. Хоча зелені особливості будівель можуть підвищувати комфорт, задоволеність та якість життя мешканців, деякі дослідження показують, що не всі користувачі відчують покращення. Додаткові вимірювання у містах із високим забрудненням повітря показали перевищення концентрацій радону та летких органічних сполук, включно з формальдегідом, що значно перевищує рівні на відкритому повітрі.

Впровадження урядових стимулів та фінансових механізмів, таких як податки, кредити, гранти та субсидії, є ефективним інструментом підтримки GB. Спільна участь уряду, приватного сектору, неурядових організацій та інших зацікавлених сторін допомагає зменшити вуглецевий слід і стимулює поширення екологічно ефективних практик.

Порівняльні дослідження [10] показують, що державна політика та системи управління істотно впливають на реалізацію зелених будівель та будівель із нульовим енергоспоживанням. Сертифікаційні програми та стандарти, що регулюють мінімізацію будівельних відходів, сприяють покращенню практик у різних країнах. Водночас швидко урбанізовані регіони стикаються з додатковими викликами, що потребують комплексного підходу, включно з врахуванням драйверів, бар'єрів, ризиків, переваг, критичних факторів та органів планування. Модернізація старих житлових будівель із застосуванням належних політик сприяє інтеграції

зелених технологій і підвищенню ефективності зеленого будівництва.

Розвиток GB демонструє як позитивні, так і негативні наслідки. У деяких містах, наприклад, у Манілі, плановані результати впровадження GB включали покращене управління ризиками та підтримку екологічного балансу, тоді як відсутність стабільного політичного регулювання та нестабільні ринкові умови спричинили непередбачувані негативні ефекти. Незважаючи на поширену думку про вплив GB на здоров'я мешканців, у деяких випадках застосування зелених практик призводить до суттєвого зниження енергоспоживання та експлуатаційних витрат. Енергетична ефективність таких будівель також позитивно відображається на комерційних об'єктах, підвищуючи їх привабливість для орендарів та видимість економічної ефективності в умовах невизначеності.

Хоча початкові витрати на будівництво зелених об'єктів зазвичай вищі, життєвий цикл та експлуатаційні витрати виявляються значно нижчими. Сучасні підходи до розвитку GB включають формування довгострокових мереж інновацій, що передбачають інтеграцію політичних рамок і стратегій мобілізації, синтезу та активізації учасників будівельного процесу. Окремі дослідження зосереджуються на підвищенні продуктивності систем відновлюваної енергії в зелених будівлях, таких як сонячні повітряні нагрівачі, а також на вдосконаленні методів теплопередачі для покращення енергоефективності цих систем.

Отже, сучасні підходи до зеленого будівництва демонструють значний потенціал у забезпеченні екологічної, економічної та соціальної складових сталого розвитку. Інтеграція енергоефективних технологій, ресурсозберігаючих матеріалів, відновлюваних джерел енергії та систем екологічної сертифікації сприяє зменшенню негативного впливу будівельної галузі на довкілля, зниженню викидів парникових газів і підвищенню якості внутрішнього середовища.

Водночас ефективність впровадження зелених технологій значною мірою залежить від державної політики, економічних стимулів, рівня обізнаності учасників будівельного процесу та адаптації міжнародного досвіду до національних умов. Незважаючи на вищі початкові інвестиційні витрати, застосування принципів зеленого будівництва забезпечує зниження експлуатаційних витрат, підвищення енергетичної ефективності та довгострокову економічну вигоду.

Таким чином, подальший розвиток і поширення зеленого будівництва потребують комплексного підходу, що поєднує технологічні інновації, нормативно-правову підтримку та використання інструментів оцінки життєвого циклу для обґрунтування екологічно доцільних проектних рішень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Zuo J., Zhao Z.-Y. Green Building Research—Current Status and Future

Agenda: A Review. Renew. Sustain. Energy Rev., 2014. Vol. 30. P. 271–281. doi: 10.1016/j.rser.2013.10.021.

2. Meena C., Kumar, A., Jain S., Rehman A., Mishra S., Sharma N., Bajaj M., Shafiq M., Eldin E. Innovation in Green Building Sector for Sustainable Future. Energies, 2022. Vol. 15. P. 6631. doi:10.3390/en15186631.

3. Janjua, S.Y.; Sarker, P.K.; Biswas, W.K. Sustainability Implications of Service Life on Residential Buildings – An Application of Life Cycle Sustainability Assessment Framework. Environ. Sustain. Indic. 2021, 10, 100109, doi: 10.1016/j.indic.2021.100109.

4. Bhochhibhoya S., Pizzol M., Marinello F., Cavalli R. Sustainability Performance of Hotel Buildings in the Himalayan Region. J. Clean. Prod., 2020. Vol. 250. P. 119538. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119538.

5. Fatourehchi D., Zarghami E. Social Sustainability Assessment Framework for Managing Sustainable Construction in Residential Buildings. J. Build. Eng., 2020. Vol. 32. P. 101761. doi: 10.1016/j.jobbe.2020.101761.

6. Gupta A. Building a Green Home Using Local Resources and Sustainable Technology in Jammu Region – A Case Study. Energy Procedia, 2017. Vol. 115. P. 59–69. doi: 10.1016/j.egypro.2017.05.007.

7. Chi B., Lu W., Ye M., Bao Z., Zhang X. Construction Waste Minimization in Green Building: A Comparative Analysis of LEED-NC 2009 Certified Projects in the US and China. J. Clean. Prod., 2020. Vol. 256. P. 120749. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120749.

8. Carmichael D.G., Mustaffa N.K., Shen X. A Utility Measure of Attitudes to Lower-Emissions Production in Construction. J. Clean. Prod., 2018. Vol. 202. P. 23–32. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.086.

9. Awad J., Jung C. Evaluating the Indoor Air Quality after Renovation at the Greens in Dubai, United Arab Emirates. Buildings, 2021. Vol. 11. P. 353. doi:10.3390/buildings11080353.

10. Razmjoo A., Nezhad M.M., Kaigutha L.G. Investigating Smart City Development Based on Green Buildings, Electrical Vehicles and Feasible Indicators. Sustainability, 2021. Vol. 13. P. 7808. doi:10.3390/su13147808.

АНАЛІЗ СТРАТЕГІЙ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЯКОСТІ ВНУТРІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА В ЗЕЛЕНИХ БУДІВЛЯХ

Марина Кравченко¹, Вікторія Мягкохліб¹

kravchenko.mv@knuiba.edu.ua, miahkokhlib_vs-2025@knuiba.edu.ua

¹Київський національний університет будівництва і архітектури

Сучасний розвиток будівельної галузі дедалі більше орієнтується на впровадження інноваційних рішень, спрямованих на забезпечення сталого розвитку та зменшення негативного впливу на довкілля. У цьому контексті особливого значення набувають стратегії підвищення енергоефективності

зелених будівель та створення безпечного і здорового внутрішнього середовища. Зелені будівлі проєктуються з урахуванням принципів раціонального використання енергетичних ресурсів, що дозволяє знизити рівень енергоспоживання, покращити параметри мікроклімату та зменшити екологічне навантаження на навколишнє середовище.

Враховуючи те, що людина проводить у приміщеннях більшу частину свого часу, якість внутрішнього середовища безпосередньо впливає на її здоров'я, самопочуття та працездатність. Підвищені концентрації забруднювачів у закритих просторах, зокрема летких органічних сполук, твердих частинок, продуктів горіння та біологічних агентів, можуть призводити до погіршення стану здоров'я і зниження комфорту користувачів будівель. Окрім якості повітря, важливими складовими внутрішнього середовища є рівень природного та штучного освітлення, тепловий режим і акустичні умови [1].

Концепція зеленого будівництва передбачає застосування комплексних архітектурно-планувальних і інженерних рішень, спрямованих на покращення параметрів внутрішнього середовища. До таких рішень належать використання природної вентиляції, високоефективних систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, інтеграція відновлюваних джерел енергії, а також забезпечення доступу до природного освітлення та елементів озеленення [2]. Реалізація цих заходів сприяє підвищенню рівня комфорту, зниженню ризиків для здоров'я та покращенню загального добробуту користувачів будівель.

Міжнародні організації, зокрема Всесвітня організація охорони здоров'я, підкреслюють, що доступ до безпечного та екологічно сталого середовища є важливою умовою збереження громадського здоров'я [3]. Водночас, незважаючи на значний прогрес у розвитку енергоефективних технологій, вплив зелених будівель на показники внутрішнього середовища та здоров'я людини потребує подальших досліджень, оскільки результати різних досліджень є неоднорідними.

Огляд сучасних наукових публікацій свідчить, що підвищення якості внутрішнього середовища пов'язане зі зростанням задоволеності користувачів, покращенням когнітивних функцій, підвищенням продуктивності праці, нормалізацією сну та загальним покращенням фізичного і психологічного стану людини. Разом із цим ефективність реалізації стратегій енергооптимізації значною мірою залежить від умов їх впровадження, особливо у випадку реконструкції та модернізації існуючих будівель, де виникають технічні, економічні та організаційні обмеження.

Метою дослідження є аналіз ролі зелених будівель у формуванні безпечного та здорового внутрішнього середовища з акцентом на оцінку якості повітря, мікрокліматичних параметрів та їхнього впливу на здоров'я, самопочуття і добробут користувачів.

Захворювання, пов'язані з перебуванням у будівлях, часто асоціюються

з так званим синдромом «хворої будівлі», який проявляється комплексом неспецифічних симптомів, що виникають у користувачів під час перебування в приміщеннях [4]. Багаторічні дослідження у сфері якості внутрішнього середовища засвідчили тісний взаємозв'язок між характеристиками будівель і станом здоров'я, комфортом та ефективністю діяльності їхніх користувачів. Серед ключових чинників, що визначають цей вплив, виділяють кілька груп.

До першої належать екологічні загрози, які можуть мати фізичну, хімічну, біологічну або радіологічну природу, а також включають ризики поширення інфекційних захворювань у замкнених просторах [5]. Друга група охоплює архітектурно-планувальні та конструктивні рішення, зокрема рівень освітлення, акустичний комфорт, ефективність вентиляції, вибір будівельних і оздоблювальних матеріалів, а також застосування принципів біофільного дизайну та створення умов для фізичної активності користувачів [6].

Важливу роль відіграють також експлуатаційні аспекти, зокрема якість прибирання, своєчасне технічне обслуговування інженерних систем і контроль за станом будівельних конструкцій. Окрему групу становлять соціальні та поведінкові чинники, серед яких рівень безпеки, розташування будівлі, наявність програм підтримки здоров'я, психологічний стан користувачів і характер їхньої взаємодії в робочому або житловому середовищі [7].

Якість внутрішнього середовища будівель визначається сукупністю фізичних параметрів, серед яких ключовими є якість повітря, тепловий комфорт, освітлення, акустичні умови та ефективність вентиляції. Погіршення цих показників може призводити до зниження працездатності, погіршення самопочуття та розвитку різних захворювань у користувачів будівель [8].

Рух зеленого будівництва, що сформувався у 1990-х роках як відповідь на енергетичну кризу та зростання екологічних загроз, спрямований на мінімізацію споживання енергії, води й матеріалів, зменшення негативного впливу будівель на довкілля та створення безпечних і комфортних умов для перебування людини. Зелені будівлі проєктуються з урахуванням принципів енергоефективності, ресурсозбереження та оптимізації якості внутрішнього середовища [9].

Вплив зелених будівель на здоров'я людини проявляється як безпосередньо – через покращення параметрів внутрішнього середовища, так і опосередковано – через зменшення енергоспоживання та викидів забруднювачів у навколишнє середовище. Важливу роль у впровадженні принципів здорового та сталого проєктування відіграють міжнародні системи сертифікації. У межах цих систем значна увага приділяється категорії якості внутрішнього середовища, яка охоплює вимоги до вентиляції, фільтрації повітря, контролю забруднювачів, теплового та

світлового комфорту.

Попри зростання кількості сертифікованих зелених будівель, значення якості внутрішнього середовища та її вплив на здоров'я населення все ще недостатньо усвідомлюється широкою громадськістю, що підкреслює необхідність подальшого поширення інформації та інтеграції відповідних критеріїв у державну політику та будівельні норми.

Зелене будівництво тісно пов'язане з реалізацією United Nations та її глобальної програми Sustainable Development Goals (ЦСР), оскільки інтеграція екологічно орієнтованих принципів у проєктування, будівництво та експлуатацію будівель сприяє зменшенню споживання ресурсів, покращенню якості внутрішнього середовища та зниженню антропогенного навантаження на довкілля.

Найбільш безпосередній зв'язок простежується з такими цілями, як ЦСР 3, ЦСР 6, ЦСР 7, ЦСР 11, ЦСР 12 та ЦСР 13 (табл. 1).

Таблиця 1

Загальний опис пов'язаних ЦСР щодо зелених будівель

ЦСР	Назва цілі	Мета цілі
ЦСР 3	Міцне здоров'я і благополуччя	Забезпечення здорового способу життя та сприяння добробуту для всіх у будь-якому віці
ЦСР 6	Чиста вода та належні санітарні умови	Забезпечення доступності та сталого управління водними ресурсами і санітарією для всіх
ЦСР 7	Доступна та чиста енергія	Забезпечення доступу до недорогої, надійної, сталої та сучасної енергії
ЦСР 11	Сталий розвиток міст і громад	Забезпечення відкритості, безпеки, життєстійкості та екологічної стійкості міст і населених пунктів
ЦСР 12	Відповідальне споживання та виробництво	Формування сталих моделей споживання і виробництва
ЦСР 13	Боротьба зі зміною клімату	Вжиття невідкладних заходів щодо боротьби зі зміною клімату та її наслідками

Впровадження енергоефективних технологій, систем раціонального водокористування та екологічно безпечних матеріалів дозволяє зменшити викиди парникових газів, обсяги відходів і споживання невідновлюваних ресурсів, що безпосередньо відповідає завданням цих цілей.

Крім екологічного ефекту, розвиток зеленого будівництва сприяє економічному зростанню, інноваціям у будівельному секторі та створенню нових робочих місць, що також підтримує реалізацію суміжних цілей, пов'язаних із сталою інфраструктурою та відповідальним виробництвом.

Покращення якості повітря в приміщенні є базовим елементом екологічного проєктування та одним із головних критеріїв систем сертифікації зелених будівель. До основних стратегій належать контроль джерел забруднення, використання матеріалів із низьким рівнем емісії, ефективна вентиляція та постійний моніторинг концентрацій

забруднювачів. Ці заходи дозволяють зменшити надходження зовнішніх і внутрішніх забруднювачів та забезпечити стабільно високий рівень IAQ.

Зелений дизайн передбачає використання пасивних стратегій регулювання температури, таких як оптимальна орієнтація будівлі, природна вентиляція, використання теплової маси та ефективна теплоізоляція огорожувальних конструкцій. Такі рішення зменшують потребу в активному кондиціонуванні, водночас забезпечуючи стабільні та комфортні температурні умови.

Раціональне використання природного освітлення є одним із ключових принципів сталого проєктування. Орієнтація будівлі, розміри й розташування вікон, а також планувальні рішення визначають рівень денного освітлення, що безпосередньо впливає на зоровий комфорт, психоемоційний стан і енергоефективність будівлі.

Акустичне середовище є важливою складовою IEQ, хоча в багатьох стандартах зеленого будівництва воно враховується як додатковий критерій. Поглинання звуку, звукоізоляція огорожувальних конструкцій і контроль часу реверберації є ключовими параметрами, що визначають рівень акустичного комфорту та впливають на концентрацію, сон і загальне самопочуття мешканців.

Дослідження підтверджують, що впровадження стратегій енергоефективності не лише знижує енергоспоживання, а й позитивно впливає на якість внутрішнього середовища та здоров'я користувачів будівель. Найбільший вплив на самопочуття мешканців мають якість повітря, тепловий комфорт, освітлення та рівень шуму.

Інтеграція інтелектуальних систем керування, зокрема датчиків присутності та автоматизованих систем HVAC, дозволяє оптимізувати споживання енергії без погіршення умов перебування людей у приміщеннях.

Зелені будівлі здатні забезпечити одночасне досягнення високої енергоефективності та покращення якості внутрішнього середовища. Використання пасивних архітектурних рішень, відновлюваних джерел енергії, екологічно безпечних матеріалів і сучасних систем керування будівлями сприяє підвищенню комфорту, зниженню ризиків для здоров'я та зменшенню негативного впливу на довкілля.

ЛІТЕРАТУРА

1. Karimi H., Adibhesami M.A., Bazazzadeh H., Movafagh S. Green Buildings: Human-Centered and Energy Efficiency Optimization Strategies. *Energies*, 2023. Vol. 16. P. 3681. doi:10.3390/en16093681.

2. Chen X., Yang H., Sun K. A Holistic Passive Design Approach to Optimize Indoor Environmental Quality of a Typical Residential Building in Hong Kong. *Energy*, 2016. Vol. 113. P. 267–281. doi:10.1016/j.energy.2016.07.058.

3. Geng Y., Ji W., Wang Z., Lin B., Zhu Y. A Review of Operating Performance in Green Buildings: Energy Use, Indoor Environmental Quality and Occupant Satisfaction. *Energy Build.*, 2019. Vol. 183. P. 500–514. doi:10.1016/j.enbuild.2018.11.017.

4. Magnavita N. Work-Related Symptoms in Indoor Environments: A Puzzling Problem for the Occupational Physician. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 2015. Vol. 88. P. 185–196. doi:10.1007/s00420-014-0952-7.

5. Awada M., Becerik-Gerber B., White E., Hoque S., O'Neill Z., Pedrielli G., Wen J., Wu T. Occupant Health in Buildings: Impact of the COVID-19 Pandemic on the Opinions of Building Professionals and Implications on Research. *Build. Environ.*, 2022. Vol. 207. P. 108440. doi:10.1016/j.buildenv.2021.108440.

6. Adamkiewicz G., Spengler J.D., Harley A.E., Stoddard A., Yang M., Alvarez-Reeves M., Sorensen G. Environmental Conditions in Low-Income Urban Housing: Clustering and Associations With Self-Reported Health. *Am. J. Public Health*, 2014. Vol. 104. P. 1650–1656. doi:10.2105/AJPH.2013.301253.

7. Shum C., Alipouri Y., Zhong L. Examination of Human Interaction on Indoor Environmental Quality Variables: A Case Study of Libraries at the University of Alberta. *Build. Environ.*, 2022. Vol. 207. P. 108476. doi:10.1016/j.buildenv.2021.108476.

8. Golbazi M., Danaf A.E., Aktas C.B. Willingness to Pay for Green Buildings: A Survey on Students' Perception in Higher Education. *Energy Build.*, 2020. Vol. 216. P. 109956. doi:10.1016/j.enbuild.2020.109956.

9. MacNaughton P., Spengler J., Vallarino J., Santanam S., Satish U., Allen J. Environmental Perceptions and Health before and after Relocation to a Green Building. *Build. Environ.*, 2016. Vol. 104. P. 138–144. doi:10.1016/j.buildenv.2016.05.011.

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОСТІЙНОЇ ШВИДКОСТІ РУХУ РІДИНИ У ЗБІРНИХ ДРЕНАЖНИХ ТРУБОПРОВОДАХ З УРАХУВАННЯМ ТРАНЗИТУ

Олександр Кравчук¹, Андрій Кравчук¹

*Київський національний університет будівництва і архітектури,
kravchuk.oa2@knuba.edu.ua, kravchuk.am@knuba.edu.ua*

Практика проєктування променевих водозаборів і меліоративних систем базується на використанні труб постійного діаметра, які часто працюють у режимі пропуску транзитної витрати [1, 2]. Це призводить до коливань швидкості потоку, що загрожує замулюванням системи. Забезпечення постійної швидкості руху рідини дозволяє досягти стабільного самоочищення трубопроводів. Такий підхід мінімізує потребу в технічному обслуговуванні та знижує техногенне навантаження на довкілля,

що є пріоритетом для сталого «зеленого» будівництва.

На нашу думку, основним критерієм при визначенні закону зміни діаметра напірного збірного дренажного трубопроводу є дотримання сталої середньої швидкості потоку за всією його довжиною. За такого підходу характер зміни діаметра буде залежати від величини інтенсивності приєднання рідини на різних ділянках трубопроводу ($q = \frac{dQ}{dx} = V \frac{d\Omega}{dx}$).

Розглянемо випадок нерівномірної зміни зростаючої питомої витрати вздовж збірного трубопроводу. Схему його роботи наведено на рис. 1.

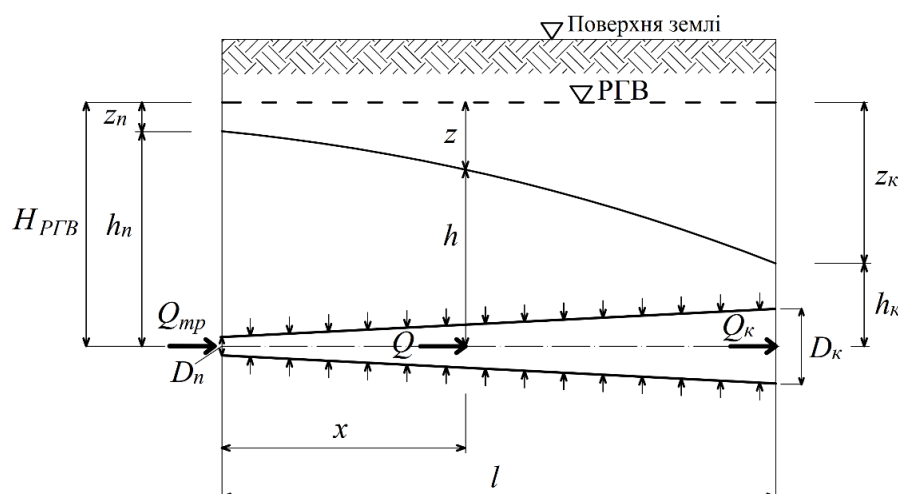


Рис. 1. Схема роботи напірного збірного дренажного трубопроводу змінного діаметра за наявності транзитної витрати

За умови забезпечення постійної величини середньої швидкості в перерізі, даний рух можна описати математичною моделлю, яка має вигляд [3, 4]:

$$\frac{dh}{dx} + \frac{2V}{g} \frac{dV}{dx} + \frac{\lambda_{36} V^2}{2gD} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{d(V\Omega)}{dx} = V \frac{d\Omega}{dx} = k_{\phi} \frac{H-h}{\Phi} = k_{\phi} \frac{z}{\Phi}, \quad (2)$$

де H_{PGB} – відстань від осі трубопроводу до рівня ґрунтових вод; h – змінний за довжиною п'єзометричний напір в трубi; $z = H - h$ – змінний за довжиною перепад напорів, який визначає інтенсивність втікання рідини в дренаж з навколишнього ґрунту; V – задана величина середньої швидкості в перерізі потоку на відстані x від початку труби; D, Ω – змінні за довжиною діаметр і площа перерізу труби; Φ – безрозмірний фільтраційний опір дрени (його визначення становить окрему фільтраційну задачу [5]); k_{ϕ} – коефіцієнт фільтрації ґрунту навколо труби; λ_{36} – гідравлічний коефіцієнт тертя збірного дренажного трубопроводу; g – прискорення вільного падіння.

Для подальшого аналізу введемо нові змінні:

$$\bar{x} = \frac{k_{\phi} x}{\Omega_{\kappa} \bar{\Phi}} \sqrt{\frac{z_{\kappa}}{g}}, \quad \bar{z} = \frac{z}{z_{\kappa}}, \quad \bar{D} = \frac{D}{D_{\kappa}}. \quad (3)$$

Легко показати, що $d\Omega = d\left(\frac{\pi D^2}{4}\right) = \frac{\pi}{2} \bar{D} d\bar{D}$.

Позначимо $\bar{V} = \frac{V}{\sqrt{gz_{\kappa}}} = \text{const}$, тоді вихідна система рівнянь (1), (2), якщо

знехтувати другим членом у рівнянні (1), набуде вигляду:

$$\frac{d\bar{z}}{d\bar{x}} = \zeta_{l_{3\phi, \kappa}} A_{3\phi} \bar{V}^2 \frac{1}{\bar{D}} \quad (4)$$

$$2\bar{V}\bar{D} \frac{d\bar{D}}{d\bar{x}} = \bar{z}, \quad (5)$$

де $\zeta_{l_{3\phi, \kappa}} = \lambda_{3\phi} \frac{l}{D_{\kappa}}$ – коефіцієнт опору збірної дренажного трубопроводу, який розрахований за величиною діаметра в його кінцевому перерізі; $A_{3\phi} = \frac{1}{2\bar{x}_{\kappa}} = \frac{\Omega_{\kappa} \bar{\Phi}}{2k_{\phi} l} \sqrt{\frac{g}{z_{\kappa}}}$ – узагальнений параметр збірної дрени, який враховує її конструктивні та фільтраційні характеристики.

Підстановка $\bar{D}$ з (5) у залежність (4) і розподіл змінних призводить до рівняння:

$$\bar{z} d\bar{z} = 2\zeta_{l_{3\phi, \kappa}} A_{3\phi} \bar{V}^3 d\bar{D}. \quad (6)$$

Його розв'язок і відповідні перетворення дозволяють отримати залежність для визначення характеру зміни величини відносного діаметра за довжиною збірної трубопроводу за наявності транзитної витрати:

$$\phi^3 + 3\bar{D}_n \phi - \frac{3}{4\bar{V} \sqrt{1 - \bar{D}_n}} \bar{x} = 0, \quad (7)$$

де $\phi = \sqrt{\bar{D} - \bar{D}_n}$; D_n – діаметр у початковому перерізі дренажного трубопроводу.

Залежності (7) для визначення характеру зміни величини відносного діаметра за довжиною збірної трубопроводу за наявності транзитної витрати слід розв'язувати підбором.

При цьому діаметр в кінцевому перерізі збірної трубопроводу в розмірних одиницях визначиться за залежністю:

$$D_{\kappa} = D_n + \frac{2k_{\phi} g z_{\kappa}^2}{\lambda \pi \bar{\Phi} V^3}. \quad (8)$$

За результатами аналізу диференціальних рівнянь руху рідини у напірних збірних дренажних трубопроводах змінного (зростаючого) за довжиною перерізу запропоновано методику розрахунку характеру зміни діаметра за

довжиною труби при наявності транзитної витрати. Запропонований підхід забезпечує сталість швидкості потоку, що є ключовим фактором ефективності та довговічності дренажних систем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kravchuk O., Kravchuk A., Voznyi O. Radial water intakes as a tool for enhancing the resilience of water supply systems in Ukraine // Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference «Scientific Progress: Theories, Applications and Global Impact», Braga, Portugal, March 2-4, 2026. P. 297-299.
2. Wu Z., Guo C., Yang H., Li H., Wu J. Experimentally based numerical simulation of the influence of the agricultural subsurface drainage pipe geometric structure on drainage flow // *Agriculture*. 2022. Vol. 12, No 12, 2174. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122174>
3. Кравчук А., Кравчук О. Аналіз результатів розрахунку збірних дренажних трубопроводів при наявності транзитної витрати. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2021. Вип. 37. С. 42–46. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2021.37.42-46>
4. Кравчук О., Кравчук А. Особливості роботи напірних збірних дренажних трубопроводів змінного діаметра за наявності транзитної витрати. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2026. Вип. 53. С. 49–55. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2026.53.49-55>
5. Олейник А.Я., Поляков В.Л. Дренаж переувлажненных земель. К.: Наукова думка, 1987. 279 с.

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ПУБЛІЧНИХ ПРОСТОРІВ НА ПРИКЛАДІ ВРЕЕАМ СЕРТИФІКОВАНОЇ БІБЛІОТЕКИ БІРМІНГЕМА

Тетяна Кривомаз¹, Софія Александрова¹

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
kryvomaz.ti@knuba.edu.ua, sofaalex26@gmail.com*

Ключові тренди розвитку зеленої сертифікації розвиваються у напрямку інтеграції кліматичної стійкості, цифровізації та комплексних цілісних підходів [4]. Інтеграція біофільного дизайну та візуальної естетики в існуючі стандарти розширює розуміння зеленої сертифікації для архітектурного середовища та публічних просторів [3]. Концепція «регеративної» сертифікації передбачає не лише мінімізацію впливу, а створення позитивного екологічного ефекту, що може застосовуватись до ландшафтів і міських просторів різного масштабу. Зелена сертифікація трансформується від інструменту оцінки будівель до комплексного інструменту оцінки міського середовища, але існує розрив між

теоретичними моделями сертифікації та практикою їх застосування у публічних просторах.

З огляду на сучасні підходи до зеленої сертифікації показовим прикладом інтегрованого впровадження принципів сталого розвитку у міському середовищі слугує бібліотека Бірмінгема. Проєкт отримав сертифікацію BREEAM рівня «Excellent», що підтверджує відповідність високим екологічним стандартам у проєктуванні, будівництві та експлуатації будівлі як еталону сталого розвитку публічної інфраструктури [1]. Бібліотека Бірмінгема реалізована як інтегрований культурно-освітній комплекс площею близько 35000 м², що поєднує бібліотечні, освітні, виставкові, громадські та рекреаційні функції, включаючи театральний простір і міську площу, що забезпечує її роль як ядра міського публічного життя [2]. Під час будівництва було перероблено близько 95% відходів, що демонструє ефективну модель циркулярного підходу до управління ресурсами та мінімізації впливу на довкілля на етапі реалізації проєкту [5]. Будівля використовує природне освітлення та вентиляцію, а також низьковуглецеві технології опалення і охолодження, що забезпечує зниження енергоспоживання та створення комфортного внутрішнього середовища [5].

Наявність озелених терас (Discovery Terrace та Secret Garden), «коричневого» даху та міських садів сприяє формуванню біорізноманіття, управлінню дощовими водами та створенню додаткових громадських просторів у щільній міській забудові [1]. «Коричневий» дах (brown roof) імітує природні або занедбані (brownfield) екосистеми, на відміну від традиційних зелених дахів із декоративним озелененням. «Коричневий» дах формується не як естетичний газон чи сад, а створюється з використанням місцевих ґрунтів, піску, гравію, залишків будівельних матеріалів (цегла, бетон). На відміну від класичних зелених дахів, тут рослини з'являються природним шляхом (самозасів), що імітує природні екосистеми. Це дозволяє відтворити умови, подібні до природних або порушених територій. Головна функція «коричневих» дахів полягає у підтримці біорізноманіття, зокрема, створення середовища для комах-запилювачів, приваблення птахів та відновлення екосистем, характерних для регіону. Це компенсує втрату природних біотопів у щільній міській забудові, покращує управління дощовими водами та мікрокліматом, сприяє адаптації міста до кліматичних змін.

Бібліотека функціонує як відкритий громадський простір, що забезпечує доступ до освіти, культури, медіа та соціальних сервісів для різних груп населення, сприяючи підвищенню якості життя та соціальній інтеграції [1]. Реалізація проєкту базувалася на міждисциплінарній координації та активному залученні стейкхолдерів через серію консультацій і воркшопів, що дозволило досягти узгоджених BREEAM-цілей і підвищити ефективність управління проєктом [2]. Бібліотека виступає флагманським

проектом оновлення міського середовища Бірмінгема, інтегрованим у стратегічний план розвитку міста (Big City Plan), що демонструє потенціал сталих публічних об'єктів як каталізаторів урбаністичних змін [5].

У сучасних умовах бібліотеки поступово втрачають свої позиції традиційних інституцій знань внаслідок цифровізації інформаційного середовища, поширення електронних ресурсів і зміни моделей споживання інформації.

Розвиток онлайн-платформ, відкритих баз даних і цифрових бібліотек зменшує потребу у фізичному відвідуванні бібліотечних установ, що призводить до зниження їх відвідуваності та ролі основних центрів доступу до знань.

Водночас значна частина існуючих бібліотечних будівель характеризується моральною та функціональною застарілістю, обмеженою гнучкістю просторових рішень і недостатньою адаптацією до сучасних соціальних запитів. Саме тому трансформація бібліотек є об'єктивною необхідністю, що полягає у переосмисленні їх функцій від суто книгосховищ до багатофункціональних публічних просторів, орієнтованих на взаємодію, навчання, культурну діяльність і соціальну інтеграцію. Такі простори повинні забезпечувати умови для коворкінгу, неформальної освіти, проведення подій і розвитку креативних індустрій.

Крім того, трансформація бібліотек відкриває можливості для впровадження принципів сталого розвитку, зокрема підвищення енергоефективності будівель, інтеграції зеленої інфраструктури та покращення якості внутрішнього середовища. У цьому аспекті показовим є досвід бібліотеки Бірмінгема, де бібліотека функціонує як сучасний громадський хаб, поєднуючи інформаційні, культурні та екологічні функції. Таким чином трансформація бібліотек є важливою не лише для збереження їх актуальності, але й для формування якісно нових публічних просторів, здатних відповідати викликам цифрової епохи та забезпечувати сталий розвиток міського середовища.

Розвиток публічних просторів в Україні доцільно здійснювати на засадах інтегрованого підходу до сталого розвитку із застосуванням принципів зеленого будівництва на всіх етапах життєвого циклу об'єктів. З урахуванням досвіду бібліотеки Бірмінгема доцільним є впровадження міжнародних систем зеленої сертифікації, як інструменту стандартизації вимог до енергоефективності, управління ресурсами та якості середовища. Особливу увагу слід приділяти інтеграції природних рішень, включаючи зелені та «коричневі» дахи, дощові сади, пермеабельні покриття та інші елементи зеленої інфраструктури, що сприяють підвищенню біорізноманіття та кліматичній адаптації міського середовища.

Важливим напрямом є розвиток мультифункціональності публічних просторів, що поєднують культурні, освітні, соціальні та рекреаційні функції, забезпечуючи їх активне використання різними групами населення

протягом усього року. Необхідно також забезпечити інклюзивність і доступність таких просторів, орієнтуючись на принципи універсального дизайну та соціальної інтеграції. Впровадження цифрових інструментів моніторингу та управління дозволить підвищити ефективність експлуатації об'єктів і мінімізувати розрив між проєктними та фактичними показниками сталості.

Крім того, доцільним є посилення участі зацікавлених сторін у процесах планування та реалізації проєктів, що сприятиме врахуванню локальних потреб і підвищенню соціальної прийнятності рішень. На рівні державної політики необхідно забезпечити розроблення національних стандартів зеленої сертифікації публічних просторів, гармонізованих із міжнародними практиками, а також створення фінансових і регуляторних стимулів для їх впровадження. У сукупності зазначені заходи сприятимуть переходу від фрагментарних благоустроєвих рішень до комплексної моделі розвитку публічних просторів в Україні.

Зелене будівництво еволюціонує від вузько будівельного інструменту до комплексної системи оцінки міського середовища, включаючи публічні простори. Зелена сертифікація є важливим інструментом підвищення сталості публічних просторів, однак її ефективність залежить від рівня адаптації до локальних умов. Досвід бібліотеки Бірмінгема засвідчує доцільність застосування технологій зеленого будівництва в Україні як інструменту відбудови публічних просторів, що поєднує енергоефективність, екологічну інтеграцію, соціальну інклюзивність та стратегічне міське планування, забезпечуючи довгострокову стійкість і підвищення якості міського середовища.

ЛІТЕРАТУРА

1. About the Library of Birmingham [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.birmingham.gov.uk/info/50132/visiting_the_library_of_birmingham/1412/about_the_library_of_birmingham/8

2. BREEAM Case Study 2013 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.birmingham.gov.uk/download/downloads/id/8518/breeam_case_study_2013.pdf

3. Holius, V., Danylov, S. Analysis of BREEAM, LEED, WELL, DGNB green building rating systems in the context of visual quality consideration // Theory and Practice of Design. – 2025. – Вип. 37. – С. 70–79. – DOI: 10.32782/2415-8151.2025.37.6

4. Khan, H., Saf, S. The Next Frontier of Green Building Certifications: Evaluating the Future of LEED, BREEAM and WELL Standards // Journal of Engineering and Applied Sciences Technology. – 2025. – Vol. 7, № 6. – С. 1–7. – DOI: 10.47363/JEAST/2025(7)318

5. Library of Birmingham: Facts and Figures [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.birmingham.gov.uk/download/>

ЗЕЛЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ВІДБУДОВИ ЗАСТАРІЛОГО ТА ЗРУЙНОВАНОГО ЖИТЛА

Тетяна Кривомаз¹, Артем Цибя¹

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
kryvomaz.ti@knuba.edu.ua, absqueee@gmail.com*

Застосування технологій зеленого будівництва у відбудові застарілого та зруйнованого житлового фонду є стратегічною необхідністю для забезпечення стійкого розвитку міст України. Процес екологічної трансформації міського середовища передбачає впровадження зелених технологій будівництва, застосування принципів циркулярної економіки, інтеграцію цифрових методів та орієнтацію на ESG (екологічні, соціальні та управлінські) критерії. Інтеграція принципів ESG у процеси зеленої відбудови України є ключовою умовою формування стійкої економіки та гармонізації національних стандартів із європейськими.

Реновація існуючого житлового фонду є пріоритетним напрямом впровадження зелених технологій у будівельній галузі з огляду на значний потенціал скорочення енергоспоживання та викидів парникових газів. Зміна вимог щодо комфорту та якості побудованого середовища в поєднанні зі старінням систем та компонентів існуючих будівель обумовлюють необхідність їх реконструкції та модернізації. На будівлі припадає близько 36% від загального обсягу глобальних викидів, при цьому втілений вуглець досягає за рік показників 28% [2]. Низка досліджень свідчить, що реконструкція існуючих старих будівель значно зменшує вуглецеві викиди у порівнянні з новим будівництвом за рахунок технологій адаптивного повторного використання (adaptive reuse) [1].

Насамперед важливу роль відіграють енергоефективні огорожувальні конструкції, зокрема системи зовнішнього утеплення, енергоефективні вікна та повітронепроникні оболонки будівлі, застосування яких забезпечує зниження енергоспоживання і скорочення вуглецевого сліду, підвищення теплового комфорту мешканців та відповідність нормативним вимогам. Водночас впровадження технологій відновлюваної енергетики сприяє декарбонізації енергоспоживання, підвищенню енергетичної автономності будівель і узгодженню з кліматичними політиками відбудови.

Суттєвим напрямом є застосування технологій повторного використання матеріалів, зокрема селективного демонтажу, повторного використання конструктивних елементів та переробки будівельних відходів, що забезпечує зменшення ресурсного навантаження відповідно до принципів циркулярної економіки, створення локальних економічних можливостей і підвищення прозорості управління відходами. Доповнюють

цей підхід низьковуглецеві будівельні матеріали, такі як модифікований бетон, панелі з перехресно-клеєної деревини та вторинна сталь, використання яких дозволяє суттєво знизити втілені вуглецеві викиди, підвищити безпечність матеріалів та забезпечити контроль ланцюгів постачання.

Не менш важливими є водоефективні технології, включаючи системи збору дощової води, повторне використання сірої води та водозберігаюче обладнання, що сприяє зниженню навантаження на водні ресурси, підвищенню стійкості до перебоїв водопостачання та дотриманню стандартів управління ресурсами. Кліматичній адаптації міського середовища сприяють зелені дахи та фасади, а також дощові сади, що дозволяє зменшити ефект теплового острова, покращити біорізноманіття, мікроклімат і психоемоційний стан мешканців, а також інтегрувати будівлі у міські екологічні стратегії. Застосування пасивних будівельних рішень, таких як оптимальна орієнтація будівель, природна вентиляція та сонцезахист, сприяє мінімізації енергоспоживання, формуванню здорового внутрішнього середовища та дотриманню принципів сталого проектування. Модульне та індустріальне будівництво, зокрема збірні (prefab) технології та 3D-друк, дозволяє зменшити обсяги відходів і енерговитрати, пришвидшити забезпечення житлом тимчасово переміщених громадян та забезпечити стандартизацію якості.

Підвищення ефективності функціонування будівель досягається завдяки впровадженню розумних систем управління, які включають енергомоніторинг, автоматизацію інженерних систем та IoT-рішення, що забезпечує оптимізацію споживання ресурсів, підвищення комфорту і безпеки, а також прозорість управління на основі даних. Застосування технологій інформаційного моделювання будівель (Building Information Modelling – BIM), цифрових двійників (digital twins) і оцінки сталості життєвого циклу (Life Cycle Sustainability Assessment – LCSA) для зеленого реноваційного проектування житла демонструє ефективність переходу від статичних розрахунків до сучасних технологій, заснованих на даних (data-driven) [5]. Штучний інтелект (ШІ) та машинне навчання (МН) можуть допомогти зацікавленим сторонам у визначенні кращих стратегій модернізації житла. Однак їх використання стикається з проблемами доступності даних, прозорості моделей та відповідності національним та європейським нормам щодо ШІ [3].

Слід зазначити, що процеси декарбонізації існуючого житлового фонду залежать не тільки від технічного забезпечення, але й значною мірою від ефективного управління [4]. Прозора комунікація, орієнтований на користувача дизайн рішень та чітка демонстрація комфортних і економічних переваг підвищують готовність домогосподарств до інвестування у модернізацію. Проєкти відновлення житла повинні трансформуватися у динамічні соціально-технічні системи із

скоординованим управлінням та підтримкою державними грантовими програмами, а також податковими стимулами. Поєднання політики модернізації з системами обліку викидів сприятиме досягненню верифікованих показників скорочення викидів CO₂ та підвищенню ефективності реалізації політики декарбонізації житлового сектору.

Сучасні дослідження демонструють перехід від ізольованого застосування окремих технологій до формування інтегрованих систем, де ESG критерії допомагають узгодити технологічні рішення. Екологічна складова (E) базується на LCSA, енергоефективності та скороченні викидів CO₂. Соціальна компонента (S) відображає підвищення комфорту проживання та розвиток доступного житла. Управлінські критерії (G) забезпечують ефективну координацію складних проєктів реновації та прозорість прийняття рішень. Кількісно вимірюваний ESG профіль дозволяє обрати оптимальний сценарій для обґрунтованої системи вибору технологій, що забезпечує перехід від декларативних «зелених ідей» до конкретних технологічних рішень. ESG індикатори слугують комплексним інструментом вибору кращих технологічних рішень з урахуванням вимог охорони довкілля, соціального захисту та ефективного управління.

Таким чином, ESG-критерії виступають інтегруючою рамкою, що дозволяє узгодити застосування зелених технологій із досягненням вимірюваних екологічних, соціальних та управлінських результатів у процесі відбудови житлового фонду. Отже, зелену відбудову застарілого та зруйнованого житла рекомендовано розглядати як систему екологічних технологій, ефективність яких обґрунтовується через ESG-оцінку, що забезпечує науково-технічний зв'язок між інженерними рішеннями, впливом на довкілля та стійким розвитком міських територій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ferriss L. Sustainable reuse of post-war architecture through life cycle assessment // *Journal of architectural conservation*. – 2021. – Vol. 27, № 3. – P. 208–224. – DOI: <https://doi.org/10.1080/13556207.2021.1943260>
2. Obead R., Khaddour L., D'Amico B. Historical building energy retrofit // *Architecture*. – 2025. – Vol. 5, № 3. – P. 49. – DOI: <https://doi.org/10.3390/architecture5030049>
3. Rempi P., Pelekis S., Tzortzis A. M., Spiliotis E., Karakolis E., Ntanos C., Askounis D. A Trustworthy by design classification model for building energy retrofit decision support [Електронний ресурс]. – 2025. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2504.06055>
4. Yan F., Winch G., Barker K. Green housing retrofits as complex micro-projects: delivery pathways and whole-life CO₂ [Електронний ресурс]. – 2025. – DOI: 10.20944/preprints202512.0378.v1
5. Zou X., Tan Y., Zhang G., Hou L. BIM-based sustainability analysis for building green retrofit // *Energy and Buildings*. – 2026. – Vol. 354. – P. 116982.

ВИЗНАЧЕННЯ ПЛОЩІ ТОНКОШАРОВИХ МОДУЛІВ В ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ВІДСТІЙНИКАХ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД КАЛАМУТНОСТІ СИРОЇ ВОДИ

Олександр Кушка¹, Анастасія Синенко¹

*Київський національний університет будівництва та архітектури,
kushka.om@knuba.edu.ua, synenko_ao-2023@knuba.edu.ua*

Ефективне використання земельних і водних ресурсів досягають оптимізацією базових технологічних процесів, одним з яких є широко розповсюджене прояснення води під дією гравітації.

Розвиток процесів гравітаційного осадження тісно пов'язаний із фундаментальними та прикладними дослідженнями у галузі підготовки води, якими встановлено визначальну роль впливу швидкості переливу, гідравліки потоку та геометричних параметрів споруди на ефективність прояснення води.

Класичні положення теорії прояснення були сформульовані в роботі Хазена [1], де показано, що ефективність відстійників визначається насамперед гідравлічним навантаженням, а не тривалістю перебування води у споруді, що стало важливим кроком у розвитку теорії осадження.

Подальший розвиток цих положень привів до створення та широкого впровадження технології тонкошарового (ламельного) осадження, що базується на використанні систем нахилених пластин або трубчастих модулів. Такі конструктивні рішення дозволяють істотно інтенсифікувати процес розділення фаз за рахунок скорочення шляху осадження частинок, підвищення питомої площі осадження та формування впорядкованої, стабілізованої структури потоку [2, 3].

Сучасні дослідження підтверджують, що застосування тонкошарових модулів забезпечує підвищення продуктивності відстійників, зменшення їх площі та покращення гідродинамічних характеристик потоку [4, 5, 6].

Це можна побачити, використовуючи, наприклад, методи обчислювальної гідродинаміки (CFD), які дозволяють детально аналізувати структуру течії, виявляти застійні зони та оцінювати вплив геометрії модулів на ефективність процесу [4, 5]. Разом із тим, у чинних нормативних документах, зокрема ДБН В.2.5-74:2013 [7], відсутні узагальнені аналітичні залежності, які дозволяли б оперативно визначати площу тонкошарових модулів залежно від характеристик вихідної води.

У роботі запропоновано аналітичний підхід до визначення площі тонкошарових модулів у горизонтальних відстійниках, який базується на залежностях швидкості осадження часток і питомого гідравлічного навантаження від каламутності води. Швидкість осадження часток

визначається за логарифмічною залежністю, побудованою за табличними даними, наведеними у ДБН [7]:

$$U_0 = 0.041 \ln C + 0.2905, \quad (1)$$

де C – каламутність вихідної води, мг/л.

Такий вигляд залежності добре узгоджується з результатами експериментальних досліджень [8], в яких враховано зміну дисперсного складу, форми частинок та їх агрегації при різних концентраціях завислих речовин, що підвищує достовірність запропонованого підходу.

Питоме гідравлічне навантаження на модулі [м³/год] також пропонується визначати за аналітичною залежністю, побудованою на базі п. 10.8.3 і 10.2.1 [7]:

$$\Delta Q = 0.5875 \ln C + 1.2206 \quad (2)$$

Цифри, отримані із застосуванням даної залежності, добре узгоджуються з сучасними дослідженнями високошвидкісних очисних систем [8] при стандартному діапазоні умов роботи споруд.

Площа тонкошарових модулів визначається як:

$$F_M = \frac{Q}{\Delta Q} = \frac{Q}{0.5875 \ln C + 1.2206}, \quad (3)$$

де Q – годинна витрата води по очисній станції, м³/год.

Площа горизонтального відстійника визначається за виразом:

$$F = 1.3 \frac{Q}{3.6 \cdot 0.041 \ln C + 0.2905}, \quad (4)$$

На основі цих залежностей отримано вираз для частки площі модулів:

$$\frac{F_M}{F} = \frac{\frac{Q}{0.5875 \ln C + 1.2206}}{\frac{1.3 \cdot Q}{3.6 \cdot 0.041 \ln C + 0.2905}} = \frac{3.6 \cdot 0.041 \ln C + 0.2905}{1.3 \cdot 0.5875 \ln C + 1.2206}, \quad (5)$$

Для практичного використання залежність апроксимована степеневою функцією:

$$\frac{F_M}{F} = \frac{3.6}{1.3} \cdot 0.1766 \cdot C^{-0.079} \quad (6)$$

Застосування спрощеного виразу дозволяє прискорити інженерні розрахунки та швидко оцінити необхідні параметри без складних обчислень.

Розрахунки виконано для діапазону каламутності 10–200 мг/л, що відповідає умовам більшості поверхневих вод. Встановлено, що частка площі тонкошарових модулів змінюється в межах 32–41 %.

При низькій каламутності спостерігається необхідність збільшення площі модулів через меншу швидкість осадження, тоді як із її зростанням частка модулів зменшується. При каламутності понад 500 мг/л частка модулів може бути меншою за 30 %, що узгоджується з результатами оглядових досліджень [2, 9].

Гідродинамічні особливості роботи тонкошарових модулів полягають у формуванні квазіламінарного режиму течії, суттєвому зниженні рівня турбулентності та мінімізації застійних зон, що підтверджується CFD-

дослідженнями [5, 6, 10]. Формування паралельних потоків у каналах модулів забезпечує більш рівномірний розподіл швидкостей по перерізу та зменшує ризик повторного виносу осаду у вихідну воду. Крім того, скорочення висоти осадження до 5–10 см дозволяє суттєво інтенсифікувати процес, зменшити час перебування води у споруді та забезпечити підвищення продуктивності споруд у 1,5–2 рази, що підтверджено численними експериментальними дослідженнями очищення природних і стічних вод різного складу [8, 10].

Порівняння отриманих результатів із сучасними літературними даними показує їх добру узгодженість: тонкошарові модулі займають 20–45 % площі відстійників і забезпечують ефективність вилучення завислих речовин на рівні 70–95 % [2, 9]. Це підтверджує адекватність запропонованого підходу та можливість його використання в інженерній практиці.

Практичне значення роботи полягає у створенні простого аналітичного інструменту для попереднього визначення параметрів тонкошарових модулів без застосування складних чисельних методів, зокрема CFD.

Використання запропонованих залежностей дозволяє підвищити точність інженерних розрахунків, скоротити витрати на проєктування та експлуатацію, а також забезпечити відповідність нормативним вимогам до якості очищеної води.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hazen, A. (1904). On Sedimentation. Trans. ASCE, 53: 45–71. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0001655>
2. Reyers C. et al. (2022). Review on inclined settlers. Minerals Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107639>
3. Kim S., Kim K. (2020). Hydrodynamics of tube settlers. Chem. Eng. J. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123225>
4. Tarpagkou R., Pantokratoras A. (2014). CFD study of lamella settlers. Powder Technology. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.08.030>
5. Šíma J., Rieger L. (2020). CFD modelling of lamella units. Water Research. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115728>
6. Nishimura S. (2013). Plate settler performance. Water Sci. Technol. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.176>
7. ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проєктування. Мінрегіон України. К.: Укрархбудінформ, 2013. 115 с. https://polyplastic.ua/files/DSTU/dbn_v.2.5_74_2013.pdf
8. Muhammed H. G. et al. (2022). Lamella clarifier in HRAS. JWPE. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103138>
9. Karches T. (2023). Dynamic model of lamellar settler. Symmetry. <https://doi.org/10.3390/sym15040864>
10. Fuchs S. et al. (2014). Lamella settlers for storm water. Water Sci. Technol. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.698>

ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТІ ТА ВІДНОВЛЮВАНІ МАТЕРІАЛИ У СУЧАСНОМУ ЗЕЛЕНОМУ БУДІВНИЦТВІ

Мирослава Майло¹, Дар'я Конопліна¹, Леся Василенко¹

*¹Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,
mailo_mv-2023@knuba.edu.ua, konoplina_do-2023@knuba.edu.ua,
vasylenko.lo@knuba.edu.ua*

Сучасне будівництво є однією з найбільш ресурсомістких галузей економіки, що значно впливає на стан навколишнього середовища. Використання традиційних будівельних матеріалів супроводжується високими витратами енергії, викидами парникових газів та виснаженням природних ресурсів. У зв'язку з цим зростає актуальність впровадження екологічно чистих та відновлюваних матеріалів, які забезпечують зменшення негативного впливу на довкілля.

У цьому контексті особливої уваги набуває концепція переходу від нафтохімічних до фітогенних матеріалів. Зокрема, у роботі [1] обґрунтовано ідею «пост-нафтової ери», в якій ключовим ресурсом виступає біомаса рослин та мікроорганізмів, що становить до 99% живої матерії Землі. Автори доводять необхідність поступової відмови від нафтових полімерів і синтетичних смол на користь біорозкладних рослинних композитів. Такий підхід є критично важливим не лише для скорочення вуглецевого сліду, але й для протидії новій екологічній загрозі — забрудненню повітря нанопластиком, що утворюється внаслідок деградації традиційних будівельних матеріалів. Дослідження показує, що сучасні біополімери та біопластики здатні забезпечити функціональну заміну нафтопродуктам завдяки біосумісності та можливості повної переробки. Їх інтеграція з технологіями відновлюваної енергетики та біополімерного очищення води формує замкнені виробничі цикли, що сприяє зменшенню виснаження ресурсів і забезпечує сталий розвиток будівельної галузі.

Такі матеріали характеризуються низьким рівнем токсичності, можливістю повторного використання або біорозкладання, а також енергоефективністю у процесі виробництва та експлуатації. Їх застосування є важливим кроком до реалізації концепції сталого розвитку у будівельній галузі. Актуальність теми зумовлена необхідністю зменшення екологічного навантаження на навколишнє середовище, спричиненого будівельною діяльністю. Ефективність такого підходу підтверджується сучасними методами цифрового аналізу: згідно з дослідженнями [4], використання технологій інформаційного моделювання будівель (BIM) дозволяє на етапі проектування досягти економії енергії на рівні 25% та знизити викиди CO₂ на 46,8% за рахунок оптимізації конструктивних рішень.

Будівельна галузь належить до найбільш ресурсоемних та екологічно

навантажених секторів, значною мірою через залежність від енергоємних матеріалів, таких як цемент і сталь. Посилення занепокоєння щодо зміни клімату та виснаження природних ресурсів стимулює зростання інтересу до сталих будівельних матеріалів як основи екологічно орієнтованої архітектури.

У даному дослідженні [2] розглянуто роль бамбука та необпаленої глиняної цегли у розвитку сталих архітектурних практик. Застосовано змішаний методологічний підхід, що включає огляд наукової літератури, порівняльний аналіз кейсів, анкетування та напівструктуровані інтерв'ю з архітекторами, інженерами та будівельними фахівцями.

У дослідженні [2] було опитано 150 респондентів та проведено інтерв'ю з 20 фахівцями для оцінки екологічної ефективності, технічної доцільності, сприйняття користувачами та бар'єрів впровадження. Результати показали, що бамбук і необпалена глиняна цегла розглядаються як екологічно переважні матеріали завдяки низькому вуглецевому сліду, відновлюваності, біорозкладності та зменшеним енергетичним витратам на виробництво.

Водночас визначено низку бар'єрів їх широкого застосування, серед яких недостатній рівень обізнаності, нормативні обмеження, опір інноваціям, технічні труднощі та потреба у спеціалізованих навичках.

Загалом зроблено висновок, що бамбук і необпалена глиняна цегла мають значний потенціал для розвитку екологічно чистої архітектури, особливо в країнах, що розвиваються, за умови підтримки з боку державної політики, технічного регулювання, розвитку компетенцій та підвищення обізнаності зацікавлених сторін [2],[3].

Використання екологічних матеріалів дозволяє скоротити споживання невідновлюваних ресурсів, знизити рівень забруднення та підвищити енергоефективність будівель. У сучасних умовах зростає попит на безпечне та комфортне житло, що також стимулює розвиток екологічного будівництва.

Мета дослідження полягає у аналізі особливостей використання екологічно чистих та відновлюваних будівельних матеріалів, оцінці їх переваг та визначенні перспектив застосування у сучасному будівництві. До екологічно чистих будівельних матеріалів належать матеріали, що мають мінімальний вплив на довкілля протягом усього життєвого циклу — від виробництва до утилізації. Основні види таких матеріалів:

- натуральні матеріали — деревина, глина, камінь, солома. Вони є безпечними для здоров'я людини та мають низький рівень енергоспоживання при виробництві.

- перероблені матеріали — вторинний бетон, скло, метал, пластик. Їх використання сприяє зменшенню кількості відходів та економії ресурсів. -- інноваційні матеріали — біобетон, екологічні утеплювачі (наприклад, з целюлози або коноплі), які поєднують екологічність і високі експлуатаційні

характеристики.

- відновлювані матеріали — це ресурси, що здатні відновлюватися природним шляхом за відносно короткий період часу. До них належать бамбук, деревина з сертифікованих лісів, пробка тощо.

- Переваги використання екологічно чистих будівельних матеріалів полягають у зниженні негативного впливу на навколишнє середовище, зокрема за рахунок скорочення викидів CO₂ та зменшення рівня забруднення. Водночас їх застосування сприяє підвищенню енергоефективності будівель шляхом зменшення енергоспоживання на опалення та охолодження. Важливою перевагою є також безпечність для здоров'я людини, що забезпечується відсутністю токсичних і шкідливих хімічних речовин у складі матеріалів. Крім того, використання таких матеріалів сприяє раціональному використанню природних ресурсів, зокрема через зменшення обсягів відходів і можливість їх повторного використання.

Сфери застосування екологічних матеріалів у будівництві:

- Житлове будівництво — створення енергоефективних та екологічних будинків.

- Промислове будівництво — зниження впливу виробничих об'єктів на довкілля.

- Реконструкція будівель — використання екологічних матеріалів для модернізації існуючих споруд.

Сфера застосування екологічних матеріалів у сучасному будівництві охоплює широкий спектр конструктивних рішень: від створення високоефективних теплоізоляційних панелей на основі сільськогосподарських відходів до використання біополімерних композитів у фасадних системах та елементах міської інфраструктури. Практичний досвід впровадження таких матеріалів підтверджує їхню здатність замінювати традиційні синтетичні аналоги в житловому та промисловому секторах, забезпечуючи при цьому покращену природну вентиляцію та стабільний мікроклімат приміщень.

Особливого значення набуває інтеграція відновлюваних ресурсів у процеси реконструкції та енергомодернізації існуючих об'єктів, де використання легких біоматеріалів дозволяє знизити навантаження на фундаменти та суттєво підвищити загальну енергоефективність будівель. Таким чином, перехід до широкого використання екологічних ресурсів стає основою для формування замкнутих циклів у міському будівництві, де матеріали після завершення терміну експлуатації можуть бути повністю перероблені або безпечно повернені в екосистему.[5]

Незважаючи на значні переваги, використання екологічних матеріалів має певні обмеження, зокрема вищу вартість, обмежену доступність деяких ресурсів та необхідність впровадження нових технологій.

Висновок. Проведене дослідження підтверджує, що інтеграція

інноваційних відновлюваних матеріалів та біокомпозитів у сучасну архітектурну практику є визначальним фактором декарбонізації будівельного сектору, оскільки дозволяє не лише мінімізувати втілений вуглецевий слід і енерговитрати на виробництво, а й забезпечити перехід до циклічної економіки через використання ресурсів, що підлягають повній рекуперації або біодеградації без шкоди для екосистем.

Використання екологічно чистих та відновлюваних будівельних матеріалів є стратегічно важливим напрямом розвитку галузі. Вони сприяють суттєвому зменшенню негативного впливу на довкілля, підвищенню енергоефективності споруд та покращенню якості життя людей. Подальший розвиток технологій та розширення застосування таких матеріалів дозволить забезпечити сталий розвиток будівельної галузі та збереження природних ресурсів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Rajendran S., Al-Samydai A., Palani G., Trilaksana H., Sathish T., Giri J., Saravanan R., Lalvani J. I. J. R., Nasri F. Replacement of petroleum-based products with plant-based materials, green and sustainable energy—A review // *Engineering Reports*. 2025. Vol. 7, No. 4. e70108. DOI: <https://doi.org/10.1002/eng2.12871>
2. Ajayi, A., Oladunmoye, O., & Taiwo, J. (2025). Sustainable Construction: A Review of Ecologically Friendly and Renewable Materials in Modern Green Building. *Journal of Sustainable Development and Environmental Technology*, 14(1), 45–68. <https://doi.org/10.1016/j.jsdet.2024.11.012>
3. A. S. Belous, O. V. Shevchenko, V. I. Terentiev et al. // *Modern problems of architecture and urban planning*. 2025. № 71. P. 142–150. URL: <https://scholar.google.com/scholar?q=ECOLOGICALLY+FRIENDLY+AND+RENEWABLE+MATERIALS+IN+MODERN+GREEN+BUILDING>
4. A. S. Belous, O. V. Shevchenko, V. I. Terentiev et al. // *Modern problems of architecture and urban planning*. 2025. № 71. P. 142–150. URL: Kusi, E., Boateng, I., & Danso, H. (2025). Energy consumption and carbon emissions of conventional and green buildings using building information modelling (BIM). *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 43(4), 826–854. <https://doi.org/10.1108/IJBPA-05-2023-0063>
5. Kumar, S., Singh, A., & Sharma, R. (2025). Practical Integration of Recycled Aggregates and Bio-Polymers in Modern Structural Engineering: Case Studies in Green Construction. *Journal of Advanced Civil Engineering and Green Technology*, 8(2), 115–138. <https://doi.org/10.1016/j.jacegt.2024.12.008>

СЕКВЕСТРАЦІЯ ВУГЛЕЦЮ ЗЕЛЕНИМИ НАСАДЖЕННЯМИ ПРИБУДИНКОВИХ ТЕРИТОРІЙ М. ХАРКОВА

Надія Максименко¹, Руслан Калашніков¹

*¹Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
maksymenko@karazin.ua, ruslancandyu@gmail.com*

В умовах зростаючого антропогенного навантаження на міське середовище особливої актуальності набуває дослідження екологічних функцій зелених насаджень, зокрема їх здатності до секвестрації вуглецю [1, 2]. Урбанізація супроводжується збільшенням обсягів викидів парникових газів та формуванням ефекту «теплових островів», що негативно впливає на стан атмосферного повітря і мікроклімат міста. Хоча було зроблено чимало зусиль для скорочення обсягів викидів, таких як підписання Паризької угоди [3], розробка національних стратегій декарбонізації та впровадження сучасних технологій, результати поки що залишаються недостатніми для досягнення глобальних кліматичних цілей. У цьому контексті питання боротьби з викидами залишається критично важливим і вимагає підвищення рівня співпраці між країнами світу. У цьому контексті прибудинкові території як елемент міської зеленої інфраструктури можуть виконувати важливу природоохоронну функцію.

Дерева та інші багаторічні насадження здатні акумулювати вуглець у процесі фотосинтезу, зменшуючи концентрацію CO₂ в атмосфері. Окрім цього, вони сприяють зниженню температури повітря, покращенню його якості, зменшенню рівня шуму та формуванню комфортного середовища проживання. Таким чином, зелені насадження прибудинкових територій виступають одним із інструментів локальної кліматичної адаптації та охорони атмосферного повітря.

Метою дослідження є оцінка обсягів секвестрації вуглецю зеленими насадженнями прибудинкових територій м. Харкова та визначення їхнього внеску в покращення стану атмосферного повітря.

Об'єктом дослідження виступав рослинний комплекс житлового кварталу міста Харкова (рис.1).

Дерева, через фотосинтез, здатні поглинати значні обсяги вуглекислого газу, що допомагає зменшити його викиди в атмосферу та сприяє зниженню парникового ефекту. У цьому дослідженні розглянута ефективність дерев у конкретному житловому кварталі у поглинанні CO₂, оцінено їхній вплив на локальний мікроклімат та їхній потенціал як частину загальної стратегії по зменшенню викидів парникових газів.

У ході польових досліджень здійснено оцінку запасів органічного вуглецю в живій та мертвій фітомасі, підстилці та ґрунті за методикою [4]. Загалом обстежено 153 дерева житлового кварталу.

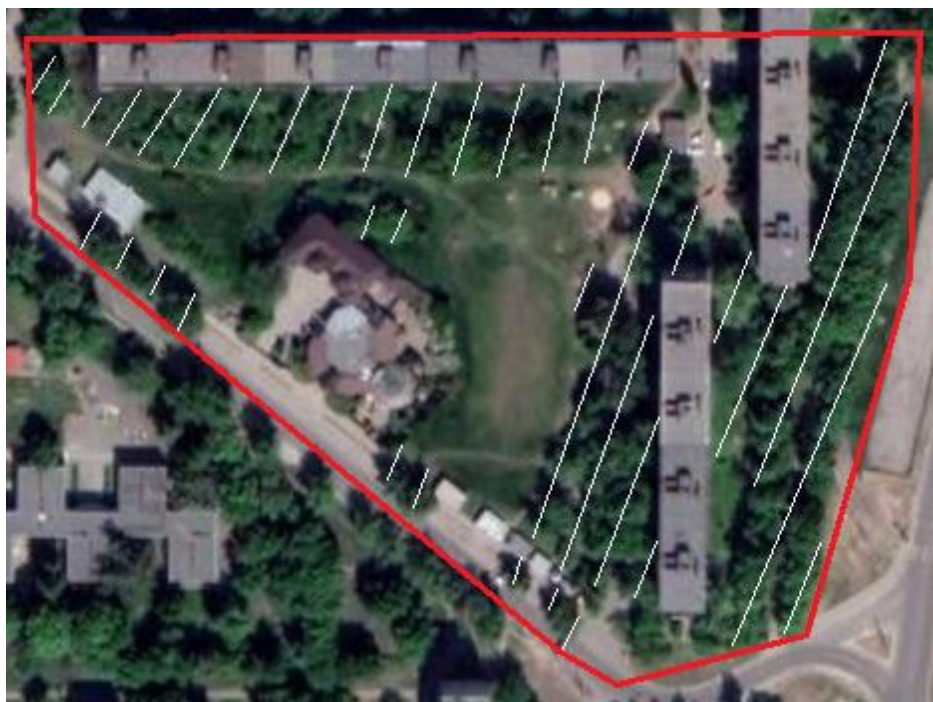


Рис.1. Територія дослідження

Фіксувались ключові показники, такі як порода, середня висота та вік дерев, що варіюється від молодих до стиглих екземплярів. Найбільшу частку становили тополі та плодові дерева (рис.2).

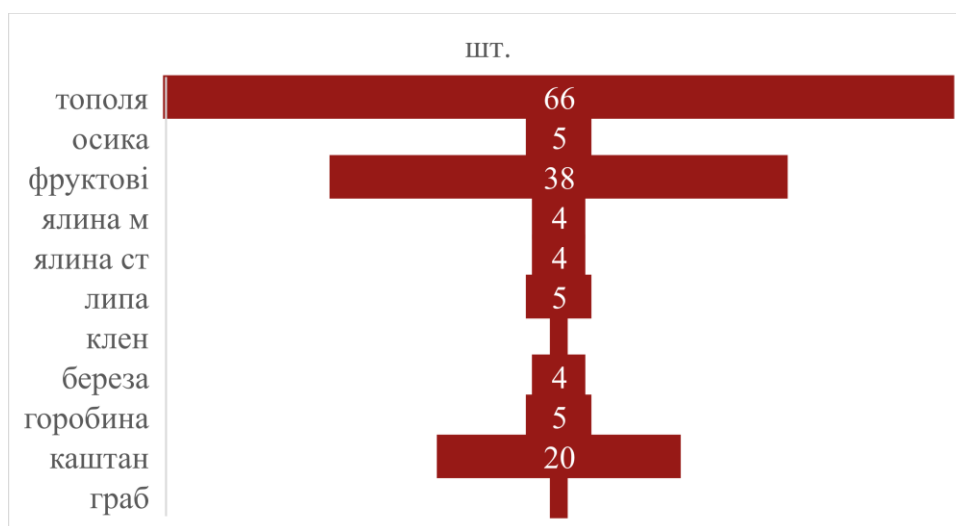


Рис. 2. Кількісне співвідношення породного складу деревостану кварталу.

Загальний запас органічного вуглецю визначався як сума запасів у всіх досліджуваних компонентах екосистеми (Рис. 3).

За результатами розрахунків встановлено, що маса депонованого вуглецю зеленими насадженнями досліджуваної території становить 70436,17 т, що свідчить про їх значний екологічний потенціал.

Дослідження демонструє значний вплив урбанізації на екологічні системи, зокрема на зміну вуглецевого сліду та роль зелених насаджень у

зниженні негативних екологічних ефектів. Зі збільшенням міського населення зростає й рівень викидів парникових газів, що сприяє зміні клімату. Заміна природних ландшафтів урбанізованими територіями несе серйозні екологічні наслідки, проте включення дерев у міську інфраструктуру може допомогти зменшити ці впливи.

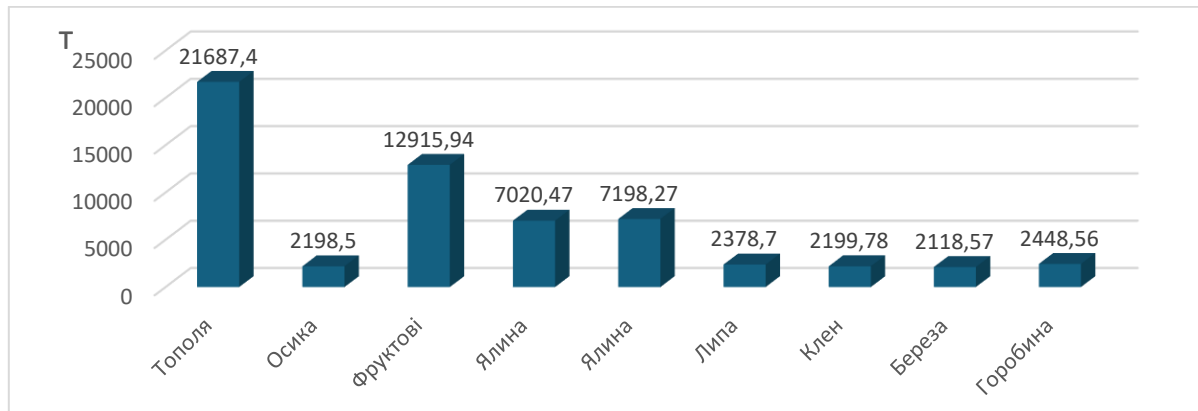


Рис. 3. Секвестрація органічного вуглецю різними породами дерев на дослідній території (за авторами)

Отримані результати підтверджують важливу роль прибудинкових зелених насаджень у зменшенні вуглецевого навантаження міського середовища та обґрунтовують необхідність їх збереження й раціонального управління як складової системи охорони атмосферного повітря.

ЛІТЕРАТУРА

1. Maksymenko N. V., Voronin V. O., Burchenko S. V., Sonko S. P. Ecosystem Service of Carbon Sequestration in Forest Landscape (On Example of Kharkiv Region, Ukraine). European Association of Geoscientists & Engineers, 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Nov 2023, Volume 2023, DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520106>
2. Maksymenko, Nadiya, Burchenko, Svitlana, Hrechko, Alina and Sonko, Sergiy. Carbonsequestration and provision of green infrastructure in the Ukrainian cities of Kharkiv and Chuguiv in the context of post-war reconstruction Acta Horticulturae et Regiotecturae, Slovakia, vol.26, no.2, 2023, pp.90-98. <https://doi.org/10.2478/ahr-2023-0013>
3. Паризька угода. Ратифікованв Законом України № 1469-VIII від 14.07.2016. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_l61#Text
4. Пастернак В. П., Букша І. Ф. Інвентаризація парникових газів у лісовому господарстві України та шляхи її покращення. *Вісник Харківського національного університету ім. В. В. Докучаєва*. 2006. №6. С. 203-207.

ПЕРСПЕКТИВИ ОПТИМІЗАЦІЇ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У БАГАТОЯРУСНИХ ВІДЦЕНТРОВИХ СИСТЕМАХ РОЗПИЛЕННЯ РІДИНИ

Микитенко Максим

*Київський національний університет будівництва і архітектури,
mykytenko_mr@knuba.edu.ua*

Сучасний стан розвитку промислових технологій очищення газових викидів вимагає безперервного вдосконалення апаратів мокрого пиловловлення, які залишаються одними з найбільш ефективних засобів забезпечення екологічної безпеки. Основною проблемою експлуатації таких систем є необхідність підтримання високої інтенсивності тепломасообмінних процесів при одночасній мінімізації енергетичних витрат на диспергування зрошувальної рідини. Традиційні форсуночні розпилювачі, попри їх широке розповсюдження, мають суттєвий недолік — схильність до забивання робочих отворів при використанні технічної води або оборотних суспензій. Це обумовлює актуальність переходу до відцентрових дискових систем, які завдяки особливостям своєї конструкції забезпечують стабільну роботу навіть у складних гідродинамічних умовах.

Науковий підхід до вирішення задачі підвищення ефективності розпилення базується на глибокому аналізі механіки тонкоплівкових потоків, що формуються на поверхнях, які обертаються. Ключовим елементом досліджуваної системи є комбінація конусної насадки та багатодискового робочого органу. Фізична сутність процесу полягає у використанні відцентрових сил для транспортування рідини з приймальної ємності безпосередньо в зону контакту фаз. Конусна насадка відіграє роль інерційного насоса, де за рахунок сил тертя та кутового прискорення створюється безперервний потік рідкої плівки, що піднімається до розподільчих дисків. Така схема дозволяє відмовитися від складних систем подачі під тиском, що значно спрощує конструкцію контактного апарата та підвищує його надійність.

Експериментальне моделювання зазначених процесів здійснювалося на спеціалізованому стенді, який дозволяє імітувати роботу промислових скрубєрів у широкому діапазоні режимних параметрів. Методологія дослідження передбачала використання модульного принципу побудови розпилювального вузла. Це дало змогу вивчати вплив геометричних факторів, зокрема діаметра та кількості ярусів, на структуру факела розпилу. Важливою складовою експериментального підходу було забезпечення стабільності обертів приводу, що досягалося використанням системи регулювання, здатної підтримувати задані кінематичні характеристики незалежно від гідравлічного навантаження на систему. Такий підхід забезпечив високу відтворюваність результатів та дозволив виявити

закономірності формування факела в умовах вільного об'ємного зрошення.

Особливе значення в дослідженні займає вивчення механізму перерозподілу рідини між окремими дисками багатоярусної системи. Для досягнення максимальної щільності зрошення по всьому перерізу камери необхідно забезпечити рівномірне живлення кожного ярусу. У дослідженій конструкції це питання вирішується шляхом впровадження системи технологічних перфорацій на нижніх дисках. Гідродинамічна логіка такої схеми полягає у створенні керованого перетікання частини рідкої фази на вищі рівні, що дозволяє формувати багат шаровий факел розпилю. Це не тільки збільшує сумарну поверхню контакту фаз, але й створює умови для більш ефективного вловлювання дрібнодисперсних частинок пилю за рахунок багатократного перетину газового потоку краплями рідини.

Для верифікації теоретичних припущень щодо характеру руху рідини на обертових поверхнях була розроблена та застосована методика візуалізації, заснована на термічних ефектах. Суть методу полягає у використанні розчинів солей, які при контакті з підігрітим газовим середовищем утворюють стійкі осадові сліди на робочих органах. Це дозволило детально проаналізувати траєкторії руху рідкої плівки від моменту її виходу з конусної насадки до моменту відриву з краю диска. Отримані дані підтвердили, що плівка рухається по розширюваних спіралях, а товщина цієї плівки та її суцільність визначаються балансом між відцентровими силами та силами поверхневого натягу. Таке розуміння фізики процесу є критично важливим для попередження передчасного розпаду плівки, що може призвести до нерівномірного зрошення.

Аналіз впливу фізико-хімічних властивостей зрошувальної рідини на якість розпилення показав, що в'язкість та щільність середовища відіграють першочергову роль у формуванні дисперсного складу крапель. У ході досліджень проводилося порівняння характеристик розпилення різних за складом рідин, що дозволило встановити кореляцію між внутрішнім тертям у рідині та енергією, необхідною для її дроблення. Було доведено, що використання багатодискових систем дозволяє згладжувати вплив коливань в'язкості, забезпечуючи стабільний середній розмір крапель у заданому діапазоні обертів. Це робить такі розпилювачі універсальними інструментами для очищення газів у різних галузях промисловості — від теплоенергетики до хімічного виробництва.

Важливим етапом роботи стало узагальнення результатів численних експериментів шляхом математичного моделювання. Використання методів теорії подібності та розмірностей дозволило звести розрізнені дані до єдиної критеріальної залежності. Введення в розрахункові моделі безрозмірних комплексів, що описують інерційні, в'язкі та поверхневі сили, дало змогу створити інструментарій для прогнозування роботи розпилювача на стадії проектування. Такий підхід мінімізує необхідність проведення дорогавартісних натурних випробувань при масштабуванні обладнання.

Математична модель описує динаміку зміни геометричних параметрів факела розпику залежно від вхідних параметрів системи, що дозволяє точно розраховувати необхідні габарити камер мокрого очищення.

Отримані результати свідчать про те, що оптимізація конструкції відцентрових розпилювачів є дієвим механізмом підвищення екологічної ефективності промислових об'єктів. Рівномірність розподілу рідини, підтверджена експериментально, гарантує відсутність «зон проскоку» неочищеного газу, що безпосередньо впливає на ступінь пиловловлення. Крім того, зниження гідравлічного опору в зоні розпилення, порівняно з традиційними методами подачі води, веде до суттєвого скорочення споживання електроенергії насосним обладнанням.

Перспективи подальших досліджень у цьому напрямку полягають у вивченні взаємодії диспергованого факела з турбулентними вихровими структурами газового потоку. Поєднання відцентрового розпилення з аеродинамічними методами інтенсифікації контакту фаз може стати основою для створення нового покоління малогабаритних та високоефективних апаратів очищення газів. Наукове обґрунтування вибору геометричних та режимних параметрів таких систем дозволить вирішувати складні задачі екологічного моніторингу та захисту навколишнього середовища на якісно новому рівні, забезпечуючи сталий розвиток промислових регіонів. Отриманий масив даних є надійним фундаментом для впровадження інноваційних рішень у практику проектування теплогазопостачальних та вентиляційних систем.

ЛІТЕРАТУРА

Любарець О.П., Микитенко М.Р., «Систематизація повітря- та газоочисних пристроїв з рідинним середовищем для уловлювання пилу та абсорбції шкідливих забруднень». Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, т. 53, 2025, с. 20-32. URL: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.53.20-32>.

Товажнянський Л. Л., Моїсєєв В. Ф., Байрачний В. П., Шапорєв В. П. Інтенсивні апарати зі стабілізованим шаром піни для очищення відхідних газів: монографія. – Харків : НТУ «ХП», 2003. – 228 с.

Зіняк В. В., Ткачук А. Я. Технологія очищення пилу в мокрих скруберах. Технологічний розвиток вентиляційних систем. Випуск 13. 2001. С. 145–151.

Гаджієв, Е. Н., Варламов, Є. М. Аналіз дисперсії пилу в аспіраційних системах при виробництві теплоізоляційних матеріалів. Український науково-дослідний інститут екологічних проблем, Харків, 192 с., 2017.

Oleksandr Liubarets, Maksym Mykytenko, «Evaluation of efficiency and optimisation of cyclone-type dust collectors with a circular spray of reversible suspension for gas purification up to 250 °C», Innovative Solutions In Modern Science № 3(67), 2025, New York “TK Meganom LLC”, p. 5-54. URL:

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У ГЕОТЕХНІЧНОМУ ПРОЄКТУВАННІ БУРОНАБИВНИХ ПАЛІ У КОНТЕКСТІ ЗЕЛЕНОГО БУДІВНИЦТВА

Алла Моргун¹, Андрій Колесник¹

*¹Вінницький національний технічний університет,
morgunallaS@gmail.com, andrey.enginer@gmail.com*

Застосування методу граничних елементів (МГЕ) для моделювання напружено-деформованого стану системи «буронабивна паля – ґрунтова основа» з урахуванням нелінійної поведінки ґрунтів. Показано, що використання числового моделювання дозволяє підвищити точність визначення несучої здатності палі і сприяє оптимізації матеріаломісткості фундаментів, що відповідає принципам зеленого будівництва. Наведено результати експериментальних досліджень та їх узгодження з числовими моделями. Обґрунтовано, що врахування дилатансії ґрунтів є важливим фактором для адекватного прогнозування роботи основи.

Фундаменти є однією із відповідальних конструкцій, що передають та перерозподіляють навантаження від споруди на ґрунти в таких межах, при яких забезпечується експлуатаційна надійність як самої основи, так і наземної частини будівлі. При проектуванні основ потрібно враховувати, що споруда, фундамент та основа знаходяться в тісному контакті взаємодії.

Буронабивні палі мають широкий вжиток в якості фундаментних конструкцій для будинків та споруд із значними вертикальними та горизонтальними навантаженнями. При влаштуванні буронабивних палі ґрунт, який оточує палю, практично не змінює свої показники порівняно з природним станом. Однією із переваг цих палі є можливість влаштування розширень діаметром до 350 см. Тема прогнозування несучої спроможності таких палі для сьогодення є актуальною.

Експериментально встановлено характер деформування системи “буронабивна паля – ґрунтова основа” який полягає в тому, що при збільшенні навантаження відбувається послідовне деформування системи. З кожним наступним кроком навантаження збільшується довжина ділянки палі в межах якої прикладене навантаження врівноважується силами бокового тертя. В межах стиснутої ділянки спостерігаються як пружні, так і залишкові деформації. Навантаження, які перевищують граничні значення бокових сил тертя, передаються вістрям палі на ущільнене ядро, в межах якого теж збільшуються пружні і залишкові деформації.

Робота основи під нижнім кінцем палі починається після зміщення палі і зриву дотичних сил по бокові поверхні. В процесі ущільнення ґрунт отримує нову структуру і в подальшому щільність ґрунту змінюється мало.

Зміна структури пограничного шару в процесі заглиблення палі залежить від технології робіт.

Методи вивчення напружено-деформованого стану системи “буронабивна палля – ґрунтова основа” постійно удосконалюються, що дозволяє уточнювати методи розрахунку несучої здатності буронабивних паль.

Розвиток будівельної галузі напряду пов’язаний з впровадженням нових технологій споруджень та застосуванням нових методів прогнозу НДС основ. Найбільший ефект дає реалізація в програмних комплексах числових методів прогнозування НДС основ, в даному випадку числового методу граничних елементів (МГЕ). Орієнтовно 90-95% деформування ґрунтів – залишкові. Подавати ґрунтову основу як пружну - це означає ідеалізувати її поведінку.

Найбільш ефективним є проектування основ по гранично допустимих осіданнях, це дозволяє найбільш ефективно використовувати матеріали [1].

Для обґрунтованого вибору прийнятних варіантів основ і фундаментів по результатах інженерно-геологічних вишукувань проводиться всебічна оцінка інженерно-геологічних умов (відомості про вид ґрунту).

Проектування основ і фундаментів базується на принципах економічності, швидкості спорудження, максимальному використанні несучої спроможності, використанні при проектуванні сучасних досягнень в області механіки ґрунтів та фундаментобудування, надійності.

В роботі наведено результати деформативного процесу поведінки під навантаженням буронабивної палі довжиною 7,9 м, діаметром 39,5 см на будівельному майданчику в м. Вінниці див. (рис. 2), проведено числове моделювання цього експерименту (нелінійної задачі механіки ґрунтів) з використанням методу граничних елементів.

Особливістю використаної в роботі пружно–пластичної математичної моделі є можливість відтворення нелінійної залежності деформацій від напружень при об’ємному та зсувному деформуванні, а також процесів дискретного ґрунтового середовища (дилатансії та контрактансії).

Можливість забезпечення надійного та економічного вирішення задачі визначення несучої спроможності експериментальної буронабивної палі дає аналіз порівняння експериментальних даних з результатами числового моделювання з залученням методу граничних елементів (МГЕ).

Саме дилатансія (факт зміни об’єму ґрунту під дією зсуву, чи переупаковування частинок ґрунту під час зсуву) робить параметри НДС основ нелінійними.

Для числового рішення цієї нелінійної задачі в роботі інтегральний синтез рівнянь рівноваги, геометричних, фізичних - залучено метод граничних елементів (МГЕ).

Переведення крайової задачі із системи п’ятнадцяти диференціальних розрахункових рівнянь до інтегрального рівняння при розгляді нелінійної

задачі механіки ґрунтів має вигляд (граничне рівняння рівноваги МГЕ):

$$c_{ij} \cdot u_j + \int_{\Gamma} p_{ij}^* u_j d\Gamma = \int_{\Gamma} u_{ij}^* p_j d\Gamma + \int_{\Omega} \dot{\sigma}^* \dot{\varepsilon}_{jk}^p d\Omega, \quad (1)$$

де, u – заданий вектор переміщень на контактні границі фундаментної конструкції; p – шуканий вектор напружень на границі;

u^* , p^* , $\dot{\sigma}^*$ – ядра граничного рівняння [2] чи функції впливу МГЕ, це двоточкові функції (залежать від двох просторових точок і описують взаємозв'язок між ними в полі переміщень, напружень або потенціалу), їх компоненти – переміщення та напруження довільної точки поля півпростору в напрямку «і» (точка нагляду) від сили $P = 1$, прикладеної в «j»-му напрямку (джерелі) – прийнято рішення Р. Міндліна для переміщень, напружень та похідних від напружень, що відповідають одиничним взбуджуючим впливам ($P=1$) в півпросторі. Ядра інтегрального рівняння характеризують собою досліджуване середовище. Саме вони обертають в нуль інтеграл по області і тим самим зводять задачу лише до визначення граничних функцій, понижуючи порядок задачі на одиницю;

c_{ij} – постійна, визначається із умов руху тіла як цілого, з'являється при переводі краєвої задачі до інтегрального рівняння для отримання єдиного рішення; інтеграл по області Ω включає вектор пластичних деформації основи ε_p . Γ , ξ , x , Ω – відповідно гранична поверхня фундаментної конструкції, – точка збурення, – точка нагляду, – та границя трикутних осередків активної зони ґрунту [1, 2, 6].

З метою врахування дисипативних ефектів ґрунту крім рівняння рівноваги (1) в модель вводились ще 2 додаткових:

а) –критерій переходу до граничного стану – умова текучості Мізеса-Шлейхера - Боткіна;

б) – залежність між напруженнями та швидкостями деформацій для пластичного стану – неасоційований закон пластичної течії (2).

Запропонована модель на кожному кроці навантаження враховує зміну НДС основи, поверхню текучості, шлях навантаження, історію деформування, дилатансію і контрактанцію ґрунту. Взаємозв'язок між швидкостями пластичних деформацій і напруженнями при роботі ґрунту в нелінійній стадії описувався згідно неасоційованого закону пластичної течії:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{dF}{d\sigma_{ij}}, \quad F \neq f, \quad (2)$$

де F – пластичний потенціал, функція історії деформування; f – критерій переходу до пластичного стану; $d\lambda$ – (скалярний коефіцієнт простого навантаження, знаходиться в ході рішення пластичної задачі; $d\varepsilon_{ij}^p$ – вектор приростів пластичних деформацій.

Теорія пластичної течії враховує можливість існування поверхні навантаження, яка в прикладаннях до ґрунтів була запропонована Друкером Д., Прагером В. [7, 8].

Поверхня текучості f для описання нелінійних властивостей ґрунтів дає співвідношення між σ_m (І інваріант тензора напружень) та T (II інваріант девіатора напружень) на октаедричній площині і разом з рівняннями рівноваги забезпечує кількість рівнянь і кількість невідомих для замикання моделі:

$$\left| \begin{array}{ll} f = T + \sigma_m \cdot \operatorname{tg} \psi - \tau_s & \text{при } \sigma_m \leq P_0 \\ f = T + P_0 \cdot \operatorname{tg} \psi - \tau_s & \text{при } \sigma_m > P_0 \end{array} \right. \quad (3)$$

де f – умова текучості; σ_m – гідростатичний тиск; T – інтенсивність девіатора напруг; ψ – кут внутрішнього тертя та зчеплення на октаедричній площині; τ_s – параметр на октаедричній площині, аналогічний зчепленню; P_0 – параметр ґрунтового середовища, характеризує перехід від конуса до циліндра.

Нелінійне деформування ґрунту при досягненні граничного стану обумовлюється появою пластичних деформацій зсуву та об'ємних незворотних деформацій дилатансії.

Теорія пластичної течії використовує фізичні залежності між напруженнями та деформаціями $\sigma - \varepsilon$ у вигляді диференціальних залежностей (2). Компоненти повної деформації $d\varepsilon_{ij}$ в приростах мають вигляд:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad (4)$$

де $d\varepsilon_{ij}^e$ – приріст пружної складової деформацій (згідно закону Гука); $d\varepsilon_{ij}^p$ – приріст пластичної складової (згідно неасоційованого закону пластичної течії).

Деформування ґрунту в нелінійній стадії проведено згідно дилатансійної умови В.Н. Ніколаєвського, І.П. Бойка [3, 5].

Для корегування неспіввісності T_σ та T_ε при роботі ґрунту в пластичній стадії використано дилатансійну умову В.Н. Ніколаєвського, І.П. Бойка [3, 4, 5]:

$$d\varepsilon_{ij(\text{шар})}^p = \Lambda(\chi) \cdot d\gamma^p \quad (5)$$

де $d\varepsilon_{ij(\text{шар})}^p$ – скалярний еквівалент приросту непружних об'ємних деформацій (шарової частини тензора деформацій); $d\gamma^p$ – скалярний еквівалент приросту деформацій зсуву; $\Lambda(\chi)$ – швидкість (коефіцієнт) дилатансії:

$$\Lambda = d\varepsilon_v / d\gamma. \quad (6)$$

У використаній моделі швидкість дилатансії Λ визначалась згідно з дилатансійною теорією В.М. Ніколаєвського, І.П. Бойка [3, 5, 7].

Для надійного та економного геотехнічного проектування висотних будівель необхідна достовірна інформація про фізико-механічні властивості порід. В роботі проведена заміна геологічних показників багатофазового середовища показниками еквівалентного квазіоднорідного середовища, що є достатньо ефективним прийомом при розрахунках.

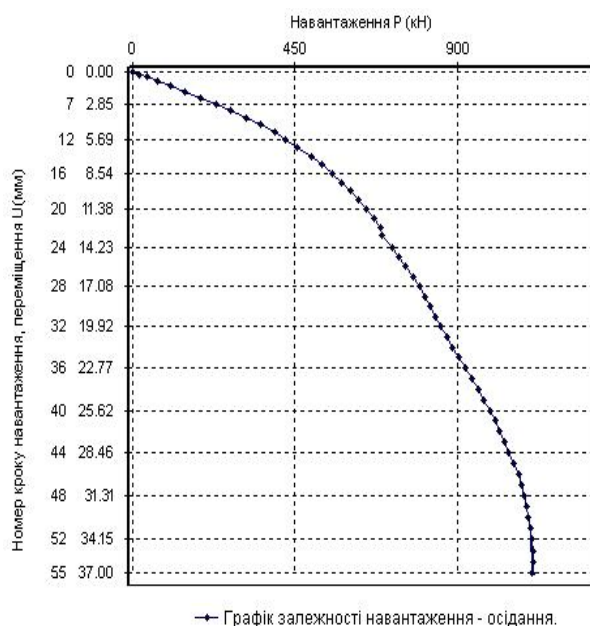


Рис 1. Результати числового моделювання за МГЕ поведінки буронабивної палі під навантаженням

Згідно наведеної математичної моделі проведено аналіз НДС буронабивної палі (рис.1) та результати співставлень з експериментом на будівельному майданчику в м. Вінниці (рис.2).

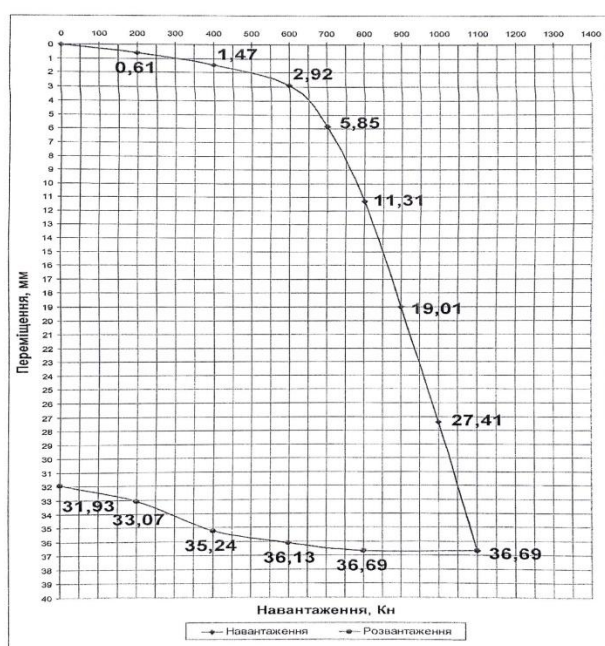


Рис 2. Результати експериментальних досліджень буронабивної палі

Порівняння експериментальних і числових результатів підтверджує високу точність методу граничних елементів для прогнозування несучої здатності буронабивних паль. Це відкриває можливості для оптимізації конструктивних рішень, зменшення обсягів матеріалів та підвищення економічної ефективності будівництва.

Таким чином, застосування МГЕ у геотехнічному проектуванні сприяє реалізації принципів зеленого будівництва, зокрема:

- раціональному використанню ресурсів;
- зниженню матеріаломісткості фундаментів;
- мінімізації впливу на ґрунтове середовище;
- підвищенню довговічності конструкцій.

Врахування ефектів дилатансії як ключового чинника нелінійності дозволяє більш точно описати поведінку ґрунтової основи та забезпечити надійність і екологічну доцільність інженерних рішень.

Робота присвячена актуальній науково-прикладній проблемі геомеханіки — розробці та застосуванню числового підходу до визначення несучої спроможності буронабивних паль із використанням методу граничних елементів.

Запропонована математична модель має як наукове, так і прикладне значення, оскільки дозволяє адекватно враховувати нелінійну поведінку ґрунтової основи та особливості взаємодії системи «паль – ґрунт».

Порівняння результатів числового моделювання з експериментальними даними дало наступні результати: при навантаженні $P=1100$ кН експериментально зафіксовано осідання $s = 36,69$ мм, тоді як за результатами числового аналізу при $s = 70$ мм отримано $P=1127$ кН, що свідчить про адекватність використаної моделі розрахунку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Моргун А. С. Теорія пластичної течії в механіці ґрунтів // А. С. Моргун. – Вінниця : ВНТУ. – 2013 – 108с.
2. Brebbia K. Applications of MGE in engineering // K. Brebbia, S. Walker. –1982.
3. Ніколаєвський В. Н. Дилатансія та закони незворотного деформування ґрунтів / В. Н. Ніколаєвський // 3б. Основи, фундаменти та механіка ґрунтів. – 1979. – № 5. – С. 29-31.
4. Зоценко М.Л., Яковлев А.В. Приклади розрахунку основ і фундаментів сільських будівель і споруд./ Київ. НМК ВО . 1982.
5. Бойко І. П. Теоретичні основи проектування пальових фундаментів на пружньо-пластичні основи / І. П. Бойко // Основи та фундаменти. – К. : Будівельник, 1985. № 18. – С. 11–18.
6. Моргун А. С. Застосування МГЕ у розрахунках паль в пластичному середовищі ґрунту. Вінниця: Універсум–Вінниця, 2001. – 64 с.
7. Бреббія К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методи граничних елементів. 1987. – 523 с.
10. Benerji P., Butterfield R. Boundary element methods in applied sciences. 1984, 492 с.
8. D. Drucker, W. Prager. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. Quarterly of Applied Mathematics. 1952.10. № 2.

ВПЛИВ МІЖНАРОДНИХ КЛІМАТИЧНИХ УГОД НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЗЕЛЕНЕ БУДІВНИЦТВО В УКРАЇНІ

Микола Мороз¹, Євгенія Михайлова²

*¹Харківський національний університет міського господарства
імені О. М. Бекетова, Mykola.Moroz@kname.edu.ua*

*²Харківський національний економічний університет
імені Семена Кузнеця, mykhailova.e@ukr.net*

Міжнародні зобов'язання України у сфері енергоефективності та зеленого будівництва формуються через участь держави у глобальних кліматичних ініціативах, співпрацю з Європейським Союзом (ЄС) та впровадження принципів сталого розвитку у будівельній галузі. Проблематика розвитку енергоефективного та екологічно орієнтованого будівництва активно досліджується як українськими, так і зарубіжними науковцями, що свідчить про її актуальність у контексті сучасної кліматичної політики [1–4].

Формування міжнародної системи протидії зміні клімату розпочалося з прийняття Рамкової конвенції ООН про зміну клімату (1992 р.), основною метою якої є стабілізація концентрації парникових газів в атмосфері на рівні, що запобігає небезпечному антропогенному впливу на кліматичну систему. Документ передбачає скорочення викидів парникових газів, підвищення енергоефективності економіки та впровадження екологічно безпечних технологій. З огляду на те, що будівельний сектор належить до найбільших споживачів енергетичних ресурсів, модернізація будівель, зменшення енергоспоживання житлового фонду та впровадження енергоефективних технологій є важливими напрямками виконання міжнародних кліматичних зобов'язань.

Подальший розвиток міжнародної кліматичної політики відбувся після прийняття Кіотського протоколу (1997 р.), який встановив кількісні зобов'язання щодо скорочення або обмеження викидів парникових газів для країн-учасниць. Ратифікація цього документа Україною сприяла впровадженню механізмів міжнародної співпраці у сфері скорочення викидів, зокрема механізму спільного впровадження (Joint Implementation, JI). У межах таких JI-проектів реалізуються заходи з підвищення енергоефективності та модернізації інфраструктури, що сприяє зменшенню викидів вуглекислого газу (CO₂) та розвитку енергозберігаючих технологій, у тому числі в будівельній галузі.

Важливим етапом розвитку міжнародної кліматичної політики стало прийняття Паризької кліматичної угоди (2015 р.), спрямованої на обмеження підвищення глобальної середньої температури та забезпечення переходу до низьковуглецевого розвитку. Україна приєдналася до цієї угоди

та взяла на себе зобов'язання щодо поступового скорочення викидів парникових газів, підвищення енергоефективності економіки та розширення використання відновлюваних джерел енергії. Реалізація цих завдань передбачає модернізацію промислового виробництва, розвиток відновлюваної енергетики, а також підвищення енергоефективності будівель та споруд.

Значну роль у формуванні національної політики у сфері енергоефективності відіграє Угода про асоціацію між Україною та ЄС (2014 р.), яка передбачає гармонізацію українського законодавства з європейськими стандартами у сфері енергетики, охорони довкілля та енергоефективності. У рамках виконання цієї угоди в Україні було ухвалено низку нормативно-правових актів, зокрема Закон України «Про енергетичну ефективність будівель», спрямований на підвищення енергоефективності будівель, скорочення споживання енергоресурсів та зменшення витрат на енергозабезпечення.

Подальший розвиток європейської кліматичної політики відображено у стратегічній ініціативі Європейський зелений курс (2019 р.), яка передбачає досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року. Для України реалізація цієї стратегії означає необхідність переходу до низьковуглецевої економіки, модернізації інфраструктури, розвитку енергоефективного житлового будівництва та впровадження екологічно орієнтованих технологій у будівельній галузі.

Загалом міжнародні кліматичні документи визначають ключові напрями розвитку зеленого будівництва, серед яких підвищення енергоефективності будівель, скорочення викидів парникових газів у будівельному секторі, використання екологічно безпечних будівельних матеріалів, розвиток відновлюваної енергетики та модернізація існуючого житлового фонду. Міжнародні кліматичні угоди та співпраця з ЄС формують основу державної політики України у сфері енергоефективності та зеленого будівництва. Їхня реалізація сприяє впровадженню сучасних енергозберігаючих технологій, використанню екологічних матеріалів та зменшенню негативного впливу будівельної галузі на довкілля.

Ще до початку повномасштабної війни Україна розпочала впровадження заходів, спрямованих на перехід до сталого розвитку та формування екологічно орієнтованої енергетичної політики. Зокрема, державою розроблено стратегічні документи щодо розвитку відновлюваної енергетики. Національний план дій з відновлюваної енергетики до 2030 року передбачає збільшення частки енергії з відновлюваних джерел до не менше ніж 27 % у кінцевому енергоспоживанні до 2030 року [5]. Крім того, Енергетична стратегія України до 2050 року визначає довгострокові напрями розвитку енергетичного сектору, зокрема поступовий перехід до низьковуглецевої економіки, збільшення частки «зеленої» енергії у виробництві електроенергії, підвищення енергетичної незалежності

держави та скорочення викидів парникових газів.

Одним із важливих механізмів стимулювання розвитку відновлюваної енергетики в Україні став «зелений тариф» – система державної підтримки виробників електроенергії з відновлюваних джерел. Вона передбачає гарантовану закупівлю електроенергії, виробленої з сонячних, вітрових, біо- та малих гідроелектростанцій, за фіксованим тарифом, що сприяє залученню інвестицій у розвиток зеленої енергетики.

Україна також активно співпрацює з міжнародними організаціями у сфері розвитку відновлюваної енергетики, зокрема з Програмою розвитку ООН, ЄС та міжнародними фінансовими установами, які підтримують реалізацію проєктів у сфері енергоефективності та використання відновлюваних джерел енергії.

На державному та місцевому рівнях здійснюється стимулювання використання відновлюваних джерел енергії у громадах і домогосподарствах. Це передбачає встановлення сонячних електростанцій на дахах будівель, розвиток енергетичних кооперативів та проведення інформаційних кампаній щодо популяризації альтернативної енергетики. Реалізація таких заходів сприяє підвищенню енергоефективності будівель та забезпечує поступовий перехід будівельної галузі України до принципів сталого розвитку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дорошенко В. Теоретико-методичні підходи до визначення поняття «Зелене будівництво». Актуальні проблеми розвитку економіки регіону. 2018. № 2 (14). С. 31–38. URL: <https://doi.org/10.15330/apred.2.14.31-38>.

2. Данилюк М. М., Дмитришин М. В. Зелене будівництво у досягненні сталого регіонального розвитку. Актуальні проблеми розвитку економіки регіону. 2020. Вип. 16 (1). С.153–162. URL: <https://doi.org/10.15330/apred.1.16.153-162>.

3. Соломніков І. В., Черненко Н. В. «Зелене» будівництво: проблеми та перспективи для сучасної економіки. Вісник економіки транспорту і промисловості. 2024. № 86. С. 124–130. URL: <https://doi.org/10.18664/btie.86.310020>.

4. Kibert C. J. Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery. 5th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2022. 656 p.

5. Energy Efficiency in Sustainable Buildings: A Systematic Review with Taxonomy, Challenges, Motivations, Methodological Aspects, Recommendations, and Pathways for Future Research. *Energy Strategy Reviews*. 2023. Vol. 45. Article 101013. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.101013>.

5. Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання : Розпорядження Каб. Міністрів України від 13.08.2024 р. № 761-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/761-2024->

ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ (LCA) МАТЕРІАЛІВ – ЯК ІНСТРУМЕНТ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ ESG-СТРАТЕГІЇ В БУДІВНИЦТВІ

Вікторія Мягкохліб¹, Марина Кравченко¹

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
miahkokhlib_vs-2025@knuba.edu.ua, kravchenko.mv@knuba.edu.ua*

Постановка проблеми в загальному вигляді. Сучасний глобальний ринок нерухомості перебуває на етапі фундаментальної трансформації, зумовленої кліматичними змінами та переходом до економіки сталого розвитку. Впровадження принципів ESG (Environmental, Social, and Governance) перестало бути добровільною ініціативою окремих компаній і перетворилося на критичну вимогу інвесторів, фінансових інституцій та регуляторів. У будівельному секторі, який відповідає за майже 40% світових викидів вуглецю, екологічна складова («Е») стає пріоритетною [1]. Однак традиційні методи оцінки, що зосереджуються переважно на стадії експлуатації об'єкта, не дають повної картини його екологічного впливу. Це створює попит на науково обґрунтовані інструменти, здатні кількісно виміряти екологічну ефективність на всіх етапах існування будівлі.

Питання «зеленого» будівництва та енергоефективності широко висвітлені у працях провідних фахівців, проте інтеграція технічних методів аналізу, таких як LCA (Life Cycle Assessment), у корпоративні ESG-стратегії залишається недостатньо вивченою. Стандарти ДСТУ ISO 14040:2013 «Екологічне управління. Оцінювання життєвого циклу. Принципи та структура» та ДСТУ EN 15978:2022 «Стійкість будівельних робіт. Оцінювання екологічних характеристик будівель. Метод розрахунку» заклали методологічну базу для оцінки життєвого циклу, але практичні механізми їх використання для підвищення інвестиційної привабливості об'єктів у поєднанні з ESG-звітністю потребують подальшої деталізації [2].

Водночас інтеграція результатів LCA у практику ESG-звітності потребує врахування міжнародних стандартів нефінансової звітності. Зокрема, стандарти Global Reporting Initiative (GRI) забезпечують універсальну рамку розкриття інформації щодо екологічних, соціальних та управлінських аспектів діяльності компаній, тоді як стандарти, розроблені European Financial Reporting Advisory Group (ESRS), орієнтовані на гармонізацію вимог до звітності в межах Європейського Союзу. Поєднання підходів LCA з цими стандартами дозволяє підвищити прозорість оцінки впливу будівельних матеріалів та забезпечити узгодженість між технічними екологічними показниками та вимогами інвесторів у сфері сталого розвитку.

Попри активне впровадження систем сертифікації LEED та BREEAM,

у вітчизняній та світовій практиці часто спостерігається фокус на «експлуатаційному вуглеці» (Operational Carbon) – системи опалення, освітлення, холодопостачання, тощо, тоді як «втілений вуглець» (Embodied Carbon) — той, що витрачається на видобуток, транспортування та виробництво матеріалів — часто залишається поза увагою [3]. Без урахування цього показника неможливо сформулювати об'єктивну ESG-звітність, що відповідає принципам декарбонізації.

Оцінка LCA кардинально змінює сприйняття «екологічності». Наприклад:

– пластик чи папір. Паперовий пакет потребує значно більше води та енергії при виробництві, ніж пластиковий, але він швидше розкладається. LCA допомагає знайти баланс;

– електромобілі. Їхнє виробництво (особливо акумуляторів) дорожче для довкілля, ніж виробництво авто з ДВС, проте етап експлуатації нівелює цю різницю.

Важливо розуміти, що без LCA неможливо побудувати циркулярну економіку (економіку замкненого циклу), де матеріали не стають сміттям, а повертаються у виробництво.

Виклад основного матеріалу. Енергію та викиди вуглецю, пов'язані з будівництвом, зазвичай вимірюють за допомогою адаптованої форми LCA — методу аналізу впливу на довкілля протягом усього терміну експлуатації продукту [4]. Методологічну основу дослідження становить комплексний підхід, що базується на поєднанні кількісного аналізу екологічного впливу будівельних матеріалів та якісного аналізу відповідності цих даних критеріям ESG-інвестицій.

Методологія ґрунтується на технічній базі LCA, визначеній стандартами ISO 14040/44:2006, і включає чотири фази (рис. 1):

- Визначення мети та обсягу;
- Інвентаризаційний аналіз життєвого циклу;
- Оцінка впливу життєвого циклу;
- У стандартах технічного Європейського комітету з нормалізації (CEN) TC350, як і в більшості сучасних практик, на етапі інвентаризації життєвого циклу в рамках аналізу LCA застосовується підхід, заснований на процесах. Цей метод дозволяє простежити весь спектр екологічних наслідків від усіх матеріалів, компонентів та процесів, що складають будівлю. Однак будь-який аналіз життєвого циклу вимагає визначення меж, що призводить до невідповідностей [4].
- Стандарти TC350 оцінюють вплив «від початку до кінця», виділяючи чотири етапи життєвого циклу: A1–3 — «Продукт» (видобуток сировини, транспортування та виробництво), A4–5 — «Процес будівництва» (доставка на майданчик та монтаж), B1–7 — «Експлуатація» (використання, обслуговування, споживання енергії

та води) та C1–4 — «Кінець життєвого циклу» (знесення, переробка та захоронення відходів) (рис.2) [4]. Аналіз розподілено на модулі для забезпечення точності результатів у межах ESG-стратегії.

- Інтерпретація життєвого циклу [5].

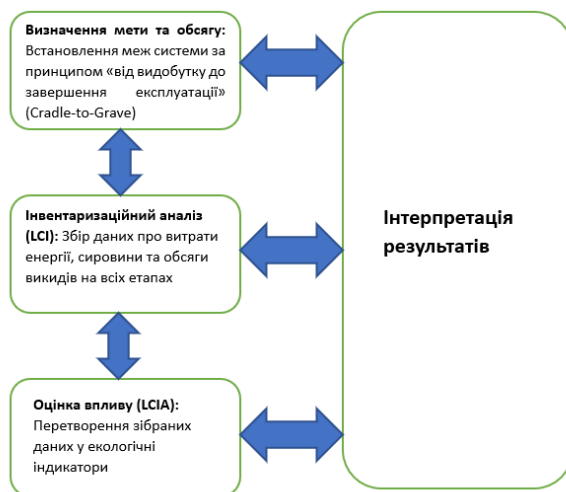


Рис.1. Етапи оцінки життєвого циклу

Додатково визначено етап D для врахування потенційного позитивного впливу переробки або повторного використання матеріалів та компонентів після закінчення життєвого циклу. Лише етап B1 (що включає B6 та B7) описує експлуатаційні впливи, які є предметом чинних нормативних актів ЄС. Усі інші етапи становлять впливи, що наразі не регулюються, і в цьому документі вони визначені як сукупність втілених впливів. Цей документ, як і більшість підходів, розглядає лише впливи, пов'язані з енергією та вуглецевим еквівалентом, виключаючи інші екологічні впливи, які також описані у стандартах TC350 [4].

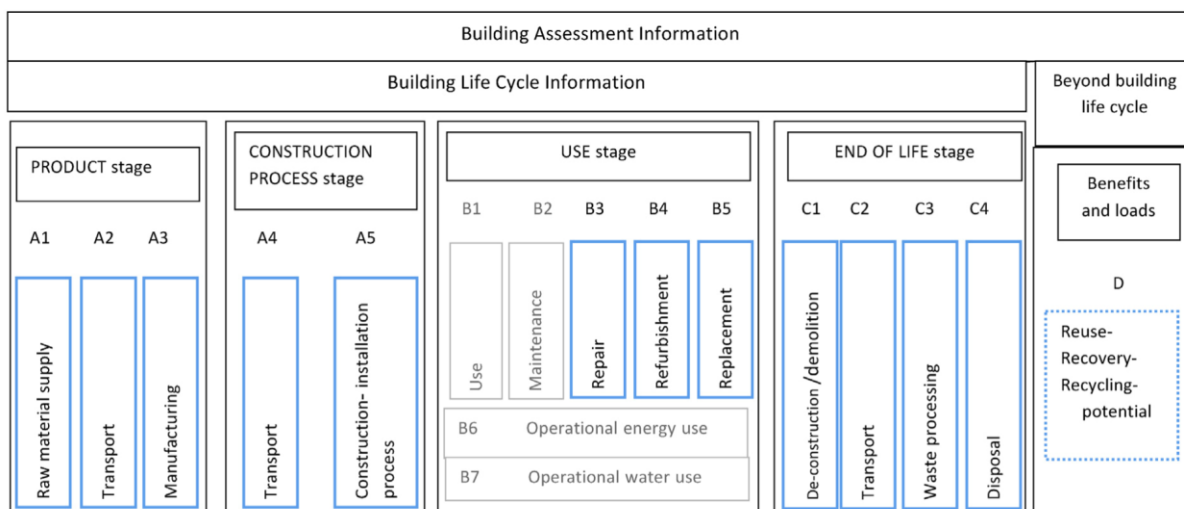


Рис. 2. Етапи життєвого циклу згідно з EN 15978:2011 «Екологічна стійкість будівельних робіт»

Інформаційною базою для розрахунку екологічних індикаторів у межах LCA є Екологічні декларації продукції (EPD), що відповідають стандарту ДСТУ EN ISO 14025:2022 «Екологічні маркування та декларації. Екологічні декларації типу III. Принципи та процедури» та ДСТУ EN 15804:2022 «Екологічність будівельних робіт. Екологічні декларації продукції. Основні правила для категорії будівельних виробів». EPD виступають як стандартизовані "екологічні паспорти" будівельних матеріалів, що містять верифіковані дані про вуглецевий слід, споживання енергії та ресурсів на всіх етапах виробництва. Використання специфічних EPD від виробників дозволяє значно підвищити точність ESG-звітності порівняно з використанням узагальнених середньостатистичних баз даних.

В Україні ринок власних EPD лише формується, тому для розрахунків найчастіше використовують дані сусідніх країн (через схожість логістики та енергоміксу виробництва):

1) IBU.data (Німеччина). Найбільша та найавторитетніша база в Європі. Більшість виробників преміальної цегли, фасадних систем та профілів, які можна використовувати в архітектурі, мають декларації саме тут;

2) EPD Hub. Зручний міжнародний портал, де можна знайти декларації за категоріями (бетон, сталь, ізоляція);

3) EPD Danmark. Відомий за жорсткими стандартами. Підходить для пошуку даних по дерев'яних конструкціях або ізоляційних матеріалів;

4) ITB EPD (Польща). Дуже корисна база для українського ринку, оскільки польські будівельні матеріали широко представлені у нас, а умови їх виробництва кліматично та енергетично ближчі до наших, ніж німецькі.

Основними показниками EPD декларації є наступні параметри:

- GWP-total – загальний потенціал глобального потепління (кг CO₂e);
- PERE – використання відновлюваної первинної енергії;
- PENRE – використання невідновлюваної первинної енергії;
- RMR – використання вторинної сировини.

GWP (Global Warming Potential) — це потенціал глобального потепління. Це ключовий показник в екологічній оцінці матеріалів (LCA), який вимірює, скільки тепла затримує в атмосфері певний парниковий газ порівняно з вуглекислим газом (CO₂). За еталон прийнято CO₂, тому його GWP завжди дорівнює 1. Всі інші гази перераховуються у так званий CO₂-еквівалент (CO₂e).

У будівництві GWP дозволяє порівнювати «непорівнюване». Таким чином можна звести вплив різних процесів до однієї цифри:

- випал цегли: викиди безпосередньо CO₂ від палива;
- виробництво XPS-утеплювача: викиди специфічних газів-фреонів (спінювачів), які мають GWP у тисячу разів вищий за CO₂.
- логістика: викиди від спалювання дизельного пального.

У деклараціях EPD зазвичай вказується GWP₁₀₀. Це означає вплив газу,

розрахований на відрізок 100 років. Це стандарт для будівельної галузі, оскільки він корелює з нормативним терміном служби капітальних споруд.

Включення LCA до звітності ESG стає важливою стратегією, що надає розширені можливості залучення інвестицій компаніям, які прагнуть до всебічного розкриття інформації щодо сталого розвитку. Ця систематична структура дозволяє організаціям оцінювати екологічний слід продуктів, процесів або послуг протягом усього їхнього життєвого циклу, поглиблюючи розуміння екологічних показників та підвищуючи прозорість у відносинах із зацікавленими сторонами [5].

Висновки. Поєднання ESG та LCA створює важливу основу для реалізації потенціалу науково обґрунтованих екологічних вигод та задоволення зростаючого попиту на прозору інформацію щодо впливу продуктів і послуг на довкілля. Застосовуючи LCA, компанії не тільки отримують можливість виявляти екологічні «гарячі точки» або процеси, що мають істотний вплив на навколишнє середовище, а й сприяють досягненню поставлених цілей, зосереджуючи увагу на конкретних напрямках поліпшення екологічної ситуації. Таке всебічне розуміння, яке забезпечує LCA, виходить за межі оцінки викидів вуглецю, дозволяючи кількісно оцінити різні екологічні наслідки. Це відповідає зростаючій важливості ґрунтовної екологічної оцінки. Крім того, LCA підсилює процес прийняття рішень компанією під час вивчення екологічних можливостей, таких як перехід на відновлювані джерела енергії, впровадження ресурсозберігаючих процесів та мінімізація забруднення для зменшення вуглецевого сліду. Врахування екологічного аспекту не лише відповідає нормативним вимогам, але й створює конкурентні переваги для екологічно чистих продуктів та послуг.

Незважаючи на потенційні капітальні витрати, пов'язані з технологіями відновлюваної та альтернативної енергетики, що є особливо складним завданням для малих підприємств, прозора прихильність до екологічної сталості покращує перспективи залучення інвесторів, орієнтованих на сталий розвиток, та використання можливостей «зеленого» бізнесу. По суті, включення LCA до звітності за критеріями ESG не лише відповідає стандартам та нормативним вимогам, а й забезпечує компаніям стратегічну позицію для сталого та конкурентоспроможного майбутнього.

ЛІТЕРАТУРА

1. EN 15978:2011 Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method.
2. Beyond product: organizational LCA methodologies for sustainability governance Manuela D'Eusaniol · Luigia Petti1 · Matthias Finkbeiner2
Published online: 6 August 2025 The International Journal of Life Cycle Assessment (2025) 30:2677–2682
3. Bringing Embodied Carbon Upfront: Advancing Net Zero Whole Life

Carbon. World Green Building Council (WorldGBC). 2019. 64 p.

4. A method and tool for 'cradle to grave' embodied carbon and energy impacts of UK buildings in compliance with the new TC350 standards A.M.Moncaster*, K.E. Symons, Energy and Buildings, 16 July 2013

5. ESG INVESTMENT AND REPORTING, Michaela Bednárová, Nataliia Tkalenko, Kullapa Soratana, Marisa Laokulrach, Marta Miranda García. MASUDEM, Springer Books, Springer, number 978-3-031-84235-1, August, 2025.

ІНФОРМАЦІЙНІ БАР'ЄРИ LCA ТА ЇХ ПОДОЛАННЯ В УМОВАХ ЦИФРОВІЗАЦІЇ БУДІВНИЦТВА

Вікторія Мягкохліб

*Київський національний університет будівництва і архітектури,
miahkokhlib_vs-2025@knuba.edu.ua*

Постановка проблеми в загальному вигляді. У сучасних умовах цифрової трансформації будівельної галузі зростає значення кількісної оцінки екологічного впливу об'єктів на основі методології LCA (Life Cycle Assessment). Водночас ефективне застосування цього підходу обмежується суттєвими інформаційними бар'єрами, зокрема нестачею верифікованих даних, фрагментарністю інформаційних баз та складністю їх інтеграції у проектні процеси [1]. Подолання цих викликів стає можливим завдяки впровадженню цифрових технологій, таких як BIM-моделювання (Building Information Modeling), штучний інтелект і блокчейн, які забезпечують автоматизацію збору, обробки та верифікації даних, підвищуючи достовірність LCA та його ефективність у формуванні ESG-стратегій у будівництві.

Виклад основного матеріалу. Методика дослідження передбачає конвертацію технічних результатів LCA у звітні показники ESG за такими напрямками:

- Показник "Е" (Environmental): Прямий вплив на зміну клімату через розрахунок «втіленого вуглецю» (Embodied Carbon).
- Економічна стійкість: Оцінка ризиків, пов'язаних із майбутнім впровадженням вуглецевого податку та зміною вартості ресурсів.
- Циркулярна економіка (Модуль D): Аналіз потенціалу повторного використання матеріалів після демонтажу як складника стратегії сталого управління ресурсами.

У межах екологічного критерію (Environmental) ESG-стратегії, особлива увага приділяється мінімізації прямого впливу на клімат. Застосування методології LCA дозволяє кількісно визначити "втілений вуглець" (Embodied Carbon), що становить значну частку сукупних викидів об'єкта. Це забезпечує прозорість екологічних даних для інвесторів та

дозволяє девелоперу обґрунтовано претендувати на верифікацію за міжнародними стандартами сталого розвитку, трансформуючи технічні розрахунки у стратегічні репутаційні та фінансові активи. Раніше показник "Е" у будівництві оцінювався переважно через операційну енергоефективність (споживання ресурсів під час проживання). Однак, впровадження LCA дозволяє зосередитися на «втіленому вугледі», який виникає ще до початку експлуатації. Це критично для ESG-стратегії, оскільки ці викиди є "незворотними" — їх неможливо виправити подальшим встановленням сонячних панелей [2]. Для забезпечення екологічної складової ESG, розрахунок втіленого вуглецю надає конкретні дані для таких розділів звітності, як сумарний обсяг викидів CO₂ (Вуглецевий слід) на етапах A1–A3 (виробництво матеріалів) та A4–A5 (будівництво) та потенціал глобального потепління як основний індикатор впливу на зміну клімату GWP (Global Warming Potential) [3]. Показник GWP зазначається у декларації EPD будівельних матеріалів.

Проектування з урахуванням мінімізації втіленого вуглецю безпосередньо впливає на вартість проекту та його економічні показники через прийняті технічні рішення для уникнення податків на викиди вуглецю в будівництві та залучення «зелених» облігацій при фінансуванні від міжнародних фондів.

Втілений вуглець тісно пов'язаний із вибором матеріалів. Використання вторинної сировини (рециклінгу) суттєво знижує показник "Е", оскільки енергія на переробку зазвичай значно менша, ніж на первинне виробництво.

Впровадження системи екологічних декларацій продукції (EPD) є інструментом прозорості в межах критерію Governance (G). Вимагаючи від постачальників наявності екологічних декларацій, девелопер забезпечує простежуваність ланцюга постачання та мінімізує ризики грінвошингу. Це дозволяє трансформувати вибір будівельних матеріалів із суто цінового рішення в стратегічний вибір, що базується на підтверджених екологічних характеристиках, які є обов'язковою умовою для отримання високих балів у системах LEED та BREEAM. Варто згадати, що наявність EPD стає важливою конкурентною перевагою для українських виробників будматеріалів при виході на ринок ЄС у межах регламенту CBAM (механізму вуглецевого коригування на кордоні).

Механізм перетворення технічних характеристик матеріалів у стратегічні ESG-метрики базується на послідовній передачі даних (рис. 1). Вихідною точкою є EPD, яка надає верифіковані значення екологічного впливу конкретного продукту. Ці дані інтегруються в BIM-середовище, де на основі кількісного аналізу проектних рішень формується підсумковий показник втіленого вуглецю об'єкта. На завершальному етапі ці кількісні дані стають основою для ESG-звітності, забезпечуючи доказову базу для інвесторів та підтверджуючи відповідність проекту принципам сталого

розвитку.

Інтеграція даних з EPD у BIM-моделі дозволяє автоматизувати процес підрахунку сукупного втіленого вуглецю об'єкта. Це створює "цифровий екологічний реєстр" будівлі, який може бути використаний для подальшої сертифікації за стандартами сталого розвитку та подання звітності інвесторам про реальне зниження антропогенного навантаження на довкілля.

Варто зазначити, що традиційно екологічна стратегія забудовників фокусувалася на експлуатаційній енергоефективності (класи А, А+). Однак аналіз життєвого циклу (LCA) показує, що для сучасних енергоефективних будівель до 50–70% сукупних викидів вуглецю за 50 років припадає саме на «втілений вуглець» (Embodied Carbon), тобто на етапи видобутку та виробництва матеріалів (модулі А1–А3) [4].

Проектування об'єктів зеленого будівництва сьогодні неможливе без BIM. Інтеграція LCA в BIM-моделі дозволяє архітекторам у реальному часі бачити, як зміна матеріалу (наприклад, заміна звичайного бетону на бетон із низьким вмістом клінкеру або дерев'яні конструкції) впливає на підсумковий ESG-рейтинг.

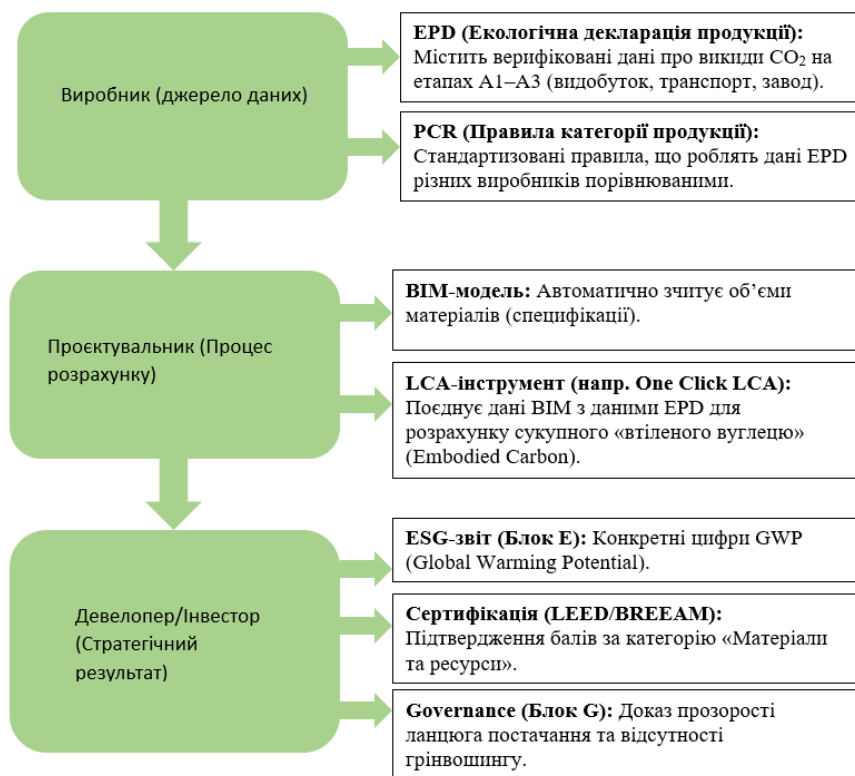


Рис. 1. Схема інтеграції даних EPD у структуру ESG-звітності

Це забезпечує автоматизацію збору даних, так як об'єми матеріалів беруться безпосередньо з цифрової моделі, та варіативність проектування, тобто можливість порівняння декількох сценаріїв життєвого циклу на ранніх стадіях, коли вартість змін є мінімальною. Інтеграція LCA у процес

проектування дозволяє знизити сукупний вуглецевий слід будівлі на 15–30% лише за рахунок оптимізації вибору конструктивних матеріалів. Це робить LCA не просто технічним додатком, а ключовим інструментом стратегічного планування в парадигмі ESG [5] (рис.1).

Для розрахунку втіленого вуглецю (CO_2e) для багатошарової конструкції (наприклад, пирога плоского даху), найкраще використовувати табличний підхід, де кожен шар має свій коефіцієнт згідно з **EPD**.

Нижче наведено структуру розрахунку для типового "пирога"

Для можливості порівняння різних конструктивних рішень дуже зручно визначати загальний показник втіленого вуглецю на одиницю площі, що обчислюється за формулою (1):

$$GWP_{unit} = \frac{\sum EC_{layer}}{S}, \quad (1)$$

GWP_{unit} – питомий показник втіленого вуглецю на одиницю площі, $\frac{кг CO_2e}{м^2}$;

EC_{layer} – кількість втіленого вуглецю шару конструкції, $кг CO_2e$;

$$EC_{layer} = d \cdot S \cdot \rho \cdot GWP. \quad (2)$$

експлуатованої плоскої покрівлі (табл.1).

Таблиця 1

Розрахунок втіленого вуглецю конструкції покрівлі

Назва шару (Матеріал)	Товщина d , м	Площа S , $м^2$	Густина ρ , $кг/м^3$	Вага M , кг	Коеф. GWP (EPD)	Разом EC_{layer} , $кг CO_2e$
З/Б плита перекриття	0,20	100	2500	50000	0,12	6000
Пароізоляція (ПВХ)	0,002	100	1200	240	2,50	600
Утеплювач (XPS)	0,25	100	35	875	3,20	2800
Стяжка (ухилоутворююча)	0,05	100	2000	10000	0,15	1500
Гідроізоляція (EPDM)	0,0015	100	1150	172,5	4,80	828
РАЗОМ						11728

Для прикладу порівняємо два популярні типи стінового огородження. Це дозволить наочно побачити різницю між традиційним багатошаровим рішенням та одношаровою енергоефективною конструкцією. Для порівняння візьмемо $1 м^2$ стіни при забезпеченні однакового опору теплопередачі ($R \approx 3,3 \frac{м^2 \cdot K}{Вт}$, згідно з ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель»). Варіант №1 – зовнішня стіна з газобетону товщиною 250 мм, утеплена мінеральною ватою товщиною 100 мм та облицьовану клінкерною цеглою (табл.2).

Таблиця 2

**Розрахунок втіленого вуглецю багат шарової конструкції
зовнішньої стіни за варіантом 1**

Шар конструкції	Товщина (d), м	Вага (M), кг	GWP (EPD)	Разом EC_{layer} , кг CO_2e
Клінкерна цегла (лицьова)	0,12	190	0,28	53,2
Мінеральна вата (100 кг/м ³)	0,1	10	1,2	12
Газобетон D500 (конструктив)	0,25	125	0,16	20
Внутрішнє штукатурення	0,02	30	0,12	3,6
РАЗОМ	0,49	355 кг		88,8

Варіант №2 – зовнішня стіна виконана із керамічного блоку товщиною 440 мм та облицьована клінкерною плиткою (табл.3). Внутрішнє опорядження однакове.

Таблиця 3

**Розрахунок втіленого вуглецю багат шарової конструкції зовнішньої
стіни за варіантом 2**

Шар конструкції	Товщина (d), м	Вага (M), кг	GWP (EPD)	Разом EC_{layer} , кг CO_2e
Клінкерна плитка (під цеглу)	0,015	25	0,35	8,75
Керамоблок (н-д Porotherm 44)	0,44	330	0,14	46,2
Внутрішнє штукатурення	0,02	30	0,12	3,6
РАЗОМ	0,475	385 кг		58,55

Як бачимо, варіант з керамоблоком та плиткою (варіант 2) має на ~34% нижчий вуглецевий слід, ніж класичний піріг з повнотілою клінкерною цеглою (варіант 1). Це відбувається переважно за рахунок заміни важкої цегли на легку плитку та відсутності синтетичного утеплювача. Хоча варіант 2 важчий, логістика одного об'ємного матеріалу (блоків) часто ефективніша, ніж збір трьох різних компонентів (цегла, вата, газобетон) від різних постачальників. Керамічні матеріали мають вищу теплову інерцію, що позитивно впливає на «тихий мікроклімат».

Висновки. Отже, LCA — це місток між архітектурою та глобальними фінансами. Методологія LCA є єдиним валідним інструментом для кількісного вимірювання екологічної складової (Environmental) стратегії сталого розвитку. На сьогоднішній день для компаній, що працюють на європейських ринках, розрахунок GWP протягом життєвого циклу є обов'язковою вимогою для визнання діяльності «сталою». Також позитивно

впливає на довгострокову оцінку капіталізації оцінка потенціалу повторного використання (Модуль D), що дозволяє компаніям включати будівлі у свої активи не як «сміття в майбутньому», а як «банк матеріалів» [4].

Доведено, що в умовах сучасного підвищення енергоефективності будівель центр ваги екологічного впливу зміщується з етапу експлуатації на етап виробництва матеріалів. Розрахунок «втіленого вуглецю» (Embodied Carbon) через інструменти LCA дозволяє оптимізувати проєктні рішення ще на стадії ескізу, забезпечуючи зниження вуглецевого сліду об'єкта на 20–30% [2].

Виявлено, що інтеграція LCA з BIM-технологіями трансформує процес проєктування в ітераційну модель управління сталим розвитком [5]. Це дозволяє архітекторам і девелоперам приймати рішення на основі даних (data-driven decisions), миттєво оцінюючи вплив вибору того чи іншого матеріалу на підсумковий ESG-рейтинг компанії.

Впровадження LCA безпосередньо впливає на блоки Governance та Social через підвищення прозорості управління ресурсами. Об'єкти, що мають верифіковану оцінку життєвого циклу та сертифікати (LEED, BREEAM), демонструють вищу ринкову капіталізацію, мають доступ до пільгового «зеленого» кредитування та є більш стійкими до майбутніх регуляторних змін, таких як впровадження вуглецевого податку.

Подальшого вивчення потребує питання створення національних баз даних екологічних декларацій продукції (EPD) в Україні, що дозволить адаптувати міжнародну методику LCA до вітчизняного ринку будівельних матеріалів та прискорити декарбонізацію будівельного сектору. Цифровізація — це єдиний спосіб зробити LCA реальним робочим інструментом, а не формальною припискою у звітах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Martínez-Blanco J, Forin S, Finkbeiner M (2020) Challenges of organizational LCA: lessons learned from road testing the guidance on organizational life cycle assessment. *Int J Life Cycle Assess* 25:311–331. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01699-3>
2. World Green Building Council. Bringing Embodied Carbon Upfront: Advancing Net Zero Whole Life Carbon. — London : WorldGBC, 2019. — 64 p.
3. ДСТУ ISO 14040:2013 Екологічне керування. Оцінювання життєвого циклу. Принципи та структура.
4. World Green Building Council. Beyond the Business Case: Higher value, lower risk and leading a sustainable real estate economy. — London : WorldGBC, 2021.
5. Soust-Verdaguer, B., Llatas, C., & García-Martínez, A. (2017). Critical review of BIM-based LCA method to buildings. *Energy and Buildings*, 136, 110–120. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.009>.

АПАРАТ З ЙОРЖАМИ ДЛЯ РЕАГЕНТНОГО ПОМ'ЯКШЕННЯ ПРИРОДНОЇ ВОДИ

Микола Омельченко¹, Олена Панченко¹

*Державне підприємство «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства»
tramelko@gmail.com; elena.panchenko.92@gmail.com*

Як відомо, загальна жорсткість води обумовлена наявністю в ній позитивних двовалентних іонів кальцію і магнію і виражається сумарною концентрацією наведених іонів в мг-екв/дм³ (мг-моль/дм³) [1]. Жорстка вода викликає відкладення на стінках труб, теплообмінних апаратів та котельних установок, які створюють додатковий гідравлічний опір, порушують процеси теплопередачі та можуть привести до аварійних ситуацій [2,3].

Тому для живлення систем паросилового господарства підприємств потрібне видалення іонів жорсткості – пом'якшення води. Одним із методів пом'якшення є хімічне осадження солей жорсткості – реагентне пом'якшення води, яке забезпечує зниження жорсткості води до рівня близько одного мг-моль/дм³. Метод реагентного пом'якшення води заснований на видаленні з води йонів кальцію і магнію у вигляді малорозчинних солей при додавання реагентів - вапна $\text{Ca}(\text{OH})_2$ і соди Na_2CO_3 . В результаті реакцій утворюються нерозчинні сполуки CaCO_3 (кристали) і $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (пластівці).

Для прискорення виділення з води продуктів CaCO_3 і $\text{Mg}(\text{OH})_2$ в воду одночасно додається коагулянт FeCl_3 або FeSO_4 , який також необхідний для видалення тонкодисперсних завислих домішок з природної води.

Вилучення продуктів реакцій в традиційних технологіях водопідготовки відбувається в освітлювачах із завислим шаром осаду [4].

Технології очищення води в завислому шарі осаду мають ряд недоліків, пов'язаних з його нестабільністю:

- при швидких змінах швидкості потоку води шар може руйнуватися,
- зміни температури висхідної води можуть створювати конвективні потоки води з виносом в очищену воду часток завислого шару,
- в обсязі завислого шару можуть утворюватися застійні зони.

Крім того, споруди з завислим шаром мають ускладнену конструкцію та здебільшого розраховані на значну продуктивність системи.

Разом з тим автором із співробітниками розроблені інноваційні технології та споруди для прояснення природних і виробничих стічних вод

з використанням волокнистого середовища у вигляді йоржів із синтетичних волокон [5]. Нова технологія передбачає обробку води реагентами з наступним фільтруванням крізь волокнисті насадки, які вилучають домішки з води. Для регенерації насадки використовується стиснене повітря, бульбашки якого збурюють воду навколо волокон, утворюють гідродинамічні сили, які відривають затримані домішки від волокон. Забруднена цими домішками вода скидається із споруд у стік.

Запропоновані технології мають переваги перед методами очищення води в шарі завислого осаду [5]:

- незалежність процесу від показників якості та температури висхідної води,
- гідродинамічна стійкість процесу, незалежність від коливань витрат води.

Крім того висока пористість волокнистого середовища (понад 99%) дозволяє затримувати великий обсяг забруднень, високу брудомісткість споруд також забезпечує висока питома поверхня (до 1500 м² на 1 м³ об'єму волокнистого середовища). Волокнисте середовище створює мінімальний гідравлічний опір (навіть в замуленому стані втрати напору не перевищують 0,1 м на 1 м товщини насадки). Середовище із синтетичних волокон є хімічно стійким.

Проведені лабораторні дослідження пом'якшення води у волокнистому середовищі довели можливість практичного застосування такого процесу [6].

На основі попередніх досліджень поставлена задача розробити нову технологію та споруду для здійснення процесу реагентного пом'якшення води у волокнистому середовищі в умовах живлення паросилового господарства з природних поверхневих джерел.

По-перше, пропонується розділити процеси змішування води з реагентами і пом'якшування, замість однієї споруди влаштувати дві – вертикальний змішувач і реактор-пом'якшувач. Змішувач такого типу буде відігравати роль також повітровідокремлювача, тому що для роботи волокнистої насадки пухирці газів також шкодять.

Запропонована технологічна схема наведена на рис. 1.

Після підігріву висхідної води в теплообміннику під залишковим напором вона обробляється трьома реагентами (розчинами коагулянта сірчанокислового заліза, соди та вапняним молоком), які вводяться шайбовими вузлами вводу, і потрапляє у вертикальний змішувач гідравлічного типу. В

його пірамідальній частині утворюються мікровихори, які ефективно перемішують воду з реагентами. Такий тип змішувача не лає випадати завислим речовинам і забезпечує видалення бульбашок газів.

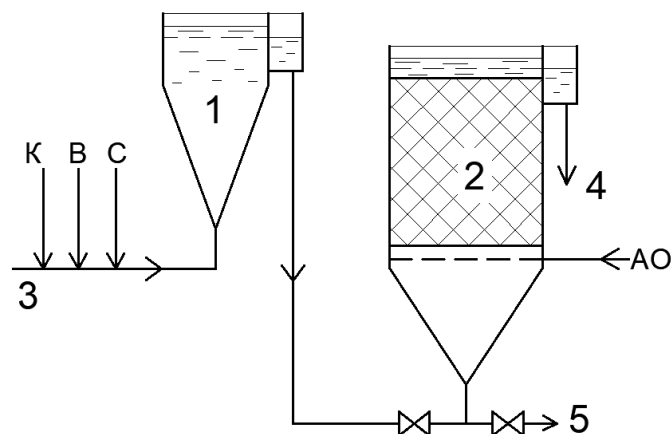


Рис. 1. Технологічна схема реагентного пом'якшення води з використанням волокнистої насадки: 1 – вертикальний змішувач, 2 - реактор-пом'якшувач з волокнистою насадкою, 3 – вода після підігріву, 4 – частково пом'якшена вода, 5 – скид брудної води при регенерації насадки; к – коагулянт, в – вапно (вапняне молоко), с – сода, АО – стиснене повітря

Після змішувача вода подається в вершину пірамідальної частини реактора (рис. 2) і розподіляється в ній по площі споруди. Головним елементом реактора є волокниста насадка у формі йоржів, яка заповнює без пустот весь об'єм сердовища. Саме в ньому на волокнах відбувається затримання продуктів реакції - кристалів карбонату кальцію, пластівців гідроксиду магнію і гідроксиду заліза. Прояснена та частково пом'якшена вода збирається зверху дірчастими трубами, потрапляє в боковий канал та відводиться із споруди.

Для чищення насадки під нею влаштована система розподілу стисненого повітря, яка складається з колектора і дірчастих розподільних відгалужень. В режимі регенерації волокнистої насадки перекривається підведення води, в заповнений водою корпус через розподільну систему підводиться стиснене повітря. Утворені бульбашки повітря піднімаються догори крізь насадку, струшують волокна і зривають затримані забруднення. Через короткий проміжок часу після початку продування відкривається патрубок скидання брудної води 5 і корпус спорожнюється. Далі поновлюється робочий цикл споруди.

Такі споруди забезпечують прояснення і часткове пом'якшення

природних вод поверхневих джерел.

Запропонована методика розрахунку реактора-пом'якшувача, яка базується на публікації [6]. За цією методикою розрахована та розроблена споруда типовою продуктивністю 2000 м³/добу, представлена на рис. 2.

Висновки

Розроблена нова конструкція реактора-пом'якшувача для обробки води з природних поверхневих джерел; така споруда позбавлена недоліків традиційного способу реагентного пом'якшення в шарі завислого осаду, дає економічний ефект.

Запропонована інновація заповнює прогалину в технологічних схемах реагентного пом'якшення води, оскільки при малих продуктивностях пом'якшувальних установок є проблематичним використання традиційних освітлювачів із завислим шаром осаду.

ЛІТЕРАТУРА

1. Запольський А. К. Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод: Підруч. / А.К.Запольський, Н.А. Мішкова-Клименко, І.М. Астрелін та ін. – К. : Лібра, 2000. – 552 с.

2. Тугай А.М. Водопостачання: підручник / А.М. Тугай, В.О. Орлов. – К.: Знання, 2009. – 735 с.

3. Гомеля М.Д., Сучасні методи кондиціонування та очистки води у промисловості / В.М. Радовенчик, Т.О. Шаблій – К.: Графіка, 2007. – 168 с.

4. Лифшиц О. В. Справочник по водоподготовке котельных установок. – М.: Энергия, 1976. – 288 с.

5. Омельченко М.П., Коваленко Л.І. Йоржеві волокнисті насадки в технологіях очищення природних і промислових стічних вод: наукова монографія. - Краматорськ: ДонНАБА. - 2019. - 137 с.

6. Омельченко М.П. Лабораторні дослідження помякшення води в волокнистому середовищі / М.П. Омельченко, Л.І. Коваленко, С.О. Левченко // Електронний науково-технічний журнал «Збірник наукових праць ДонНАБА», № 1 – 2023 (28), С.64–69.

7. Омельченко М.П. Про розрахунок волокняних фільтрів / М.П. Омельченко, Л.І. Коваленко. // «Проблеми екології». – Донецьк, ДонНТУ, №1 – 2012, С. 37–42.

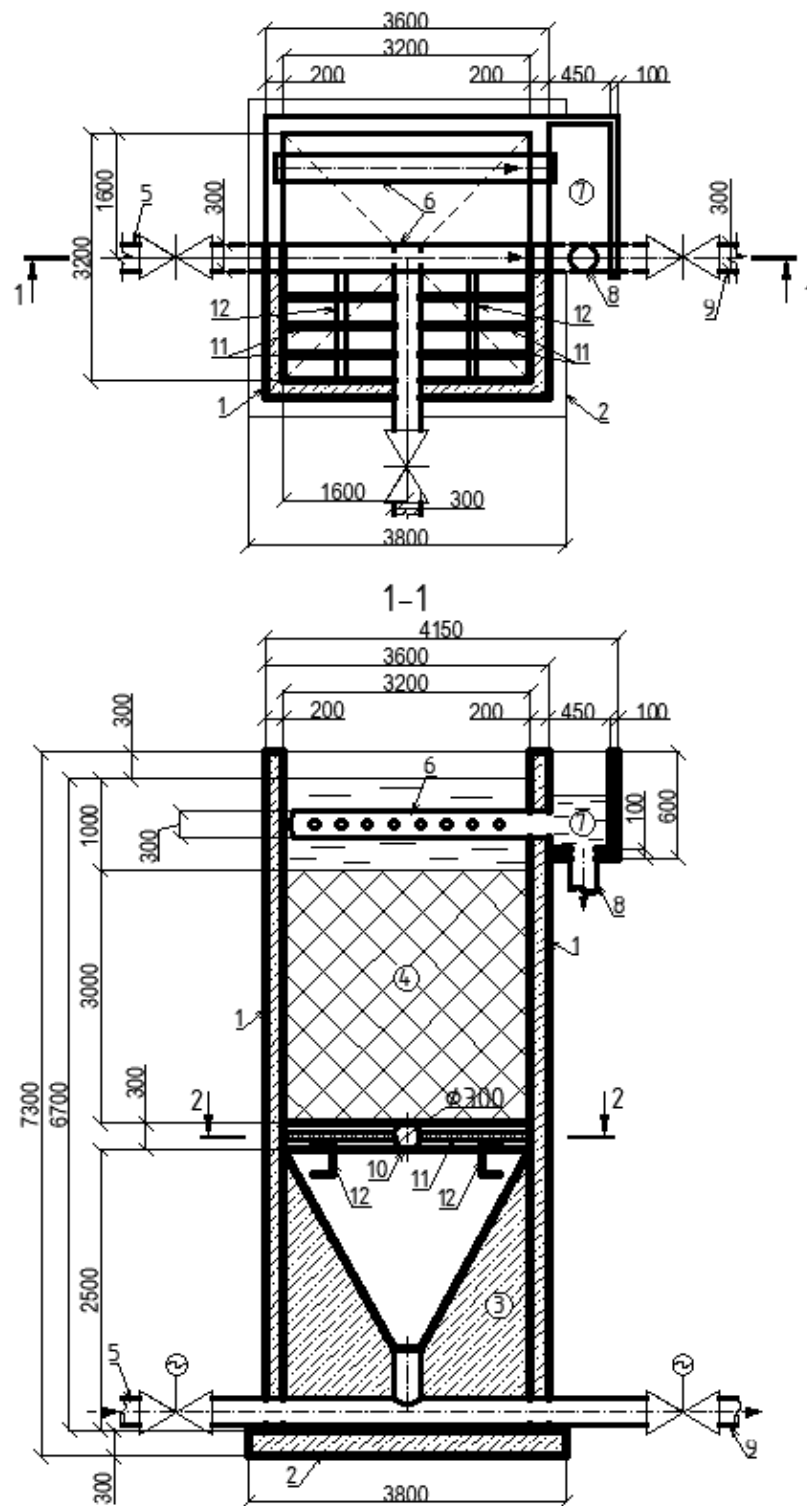


Рис. 2. Устрій реактора-пом'якшувача з волокнистою насадкою
 1 – залізобетонний корпус, 2 – залізобетонне днище, 3 – бетонна відмостка,
 4 – волокниста насадка, 5 – підвід висхідної води, 6 – дірчасті водозбірні
 труби, 7 – боковий водозбірний канал, 8 – відвід пом'якшеної води, 9 –
 скид брудної води при чищенні насадки, 10 – колектор стисненого повітря,
 11 – дірчасті труби розподілу стисненого повітря, 12 – опорні балки
 (швелери)

ІМПЕДАНСНИЙ МЕТОД ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНИХ ЗБИТКІВ ГРУНТІВ ВНАСЛІДОК ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ

Інна Пітак¹, Кіріл Себко¹

¹*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Inna.Pitak@khpі.edu.ua, Kiril.Sebko@mit.khpі.edu.ua*

Стан ґрунтів значною мірою визначається антропогенним навантаженням, яке різко зросло через військові дії. Вибухи, пожежі, руйнування та витoki небезпечних речовин спричиняють комплексні зміни їхніх властивостей. У цих умовах особливо важливим є оперативний моніторинг екологічних збитків і оцінка деградації ґрунтів для забезпечення сталого розвитку та екологічно безпечного відновлення територій.

У зеленому будівництві оцінка ґрунтів є ключовою, адже визначає безпечність територій для забудови, озеленення й рекреації. Якість ґрунту впливає на довговічність споруд, дренаж і мікроклімат. Забруднення створює ризики для здоров'я та обмежує сталий розвиток міського середовища.

Перспективним методом оцінки ґрунтів є імпедансний аналіз, що забезпечує неруйнівний контроль у широкому частотному діапазоні та надає комплексну інформацію про електрохімічні й структурні властивості. Особливо ефективний для оцінки територій, запланованих під забудову або рекультивацію за стандартами зеленого будівництва.

Електропровідність ґрунту визначається за співвідношенням:

$$\sigma = \frac{1}{(R \times S)} \quad (1)$$

де l – відстань між електродами, S – площа перерізу зразка.

Діелектричні властивості характеризуються комплексною проникністю

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2)$$

а втрати енергії визначаються як:

$$\tan \varphi = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (3)$$

Зміна цих параметрів відображає вплив техногенного навантаження. Вибухові й термічні фактори спричиняють деградацію структури ґрунту, зменшення пористості та гумусу, порушення водного режиму. Водночас накопичуються важкі метали й продукти згоряння, змінюючи електропровідність і кислотність. Це суттєво знижує придатність ґрунтів для будівництва, озеленення та створення екологічно стійких ландшафтів.

Добротність системи визначається як:

$$Q = \frac{X}{R} \quad (4)$$

де R – активна складова опору, X – реактивна складова.

Для інтегральної оцінки стану ґрунту використовується узагальнений параметр:

$$x = a_0 + a_{1\sigma} + a_2 pH + a_3 \tan \varphi + a_4 Q \quad (5)$$

Отримані параметри дають змогу оцінити ступінь деградації ґрунтів, рівень екологічного ризику та обґрунтувати заходи відновлення. Інтеграція імпедансного аналізу в зелене будівництво забезпечує науково обґрунтоване планування територій, визначення ділянок для рекультивації, раціональне використання ресурсів і екологічну безпеку будівництва.

Отже, імпедансний аналіз є ефективним інструментом моніторингу екологічних збитків від військових дій та важливим елементом реалізації принципів зеленого будівництва, спрямованих на відновлення порушених територій, формування стійких урбаністичних екосистем та забезпечення довготривалої екологічної безпеки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Байрачний В. Б., Самойленко Н. М., Пітак І. В. Сталий розвиток міст : навч. посіб. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 188 с.
2. Лисенко Ю. Ю., Куц Ю. В., Левченко О. Е. Імпульсний вихрострумний контроль із застосуванням багатоелементних перетворювачів // Приладобудування: стан і перспективи : матеріали XXI Міжнар. наук.-техн. конф., 17–18 трав. 2022 р., Київ. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. С. 207–209.

МІЖНАРОДНІ СТАНДАРТИ ЗЕЛЕНОГО БУДІВНИЦТВА І ОСОБЛИВОСТІ ЇХ ВПРОВАДЖЕННЯ В УКРАЇНІ

Владислава Марценюк¹, Антоніна Савченко¹

¹*Київський національний університет будівництва і архітектури,
martseniuk_vi-2022@knuba.edu.ua, savchenko.am@knuba.edu.ua*

Сучасні глобальні екологічні виклики та євроінтеграційні процеси в Україні спонукають до впровадження принципів зеленого будівництва як складової сталого розвитку. Фактично охоплюється проєктування, зведення та експлуатація будівель із мінімальним впливом на довкілля, раціональним використанням ресурсів та забезпеченням комфортних умов для людини. Міжнародні стандарти задають чіткі критерії, формуючи актуальні методи оцінки екологічності будівель.

У міжнародній практиці переважно орієнтуються на сертифікаційні системи LEED чи BREEAM. Вони дають оцінку будівлі за певними показниками: енергоефективність, водозбереження, специфіка матеріалів, вплив на навколишнє середовище та якість внутрішнього мікроклімату [1]. Юридично такі стандарти добровільні, проте на практиці їх розглядають як елементи м'якого права. Вони активно використовуються в європейських директивах чи національних програмах (особливо коли йдеться про

політику Green Deal) [2; 3].

Процес впровадження міжнародних стандартів зеленого будівництва в Україні зараз на стадії формування. Національна нормативно-правова база представлена законами у сфері енергоефективності, охорони довкілля та містобудування, зокрема Законом України «Про енергетичну ефективність будівель», Законом України «Про оцінку впливу на довкілля» та Законом України «Про регулювання містобудівної діяльності» [4–6]. Проте чинна нормативно-правова база має дещо фрагментарний характер. Відсутня обов'язкова інтеграція міжнародних критеріїв у процедури видачі будівельних дозволів, державної експертизи та державних закупівель. Це призводить до серйозних правових прогалин [3; 7; 8]. Закони створюють певний фундамент, однак поки що не формують єдиної системи регулювання.

Важливу роль відіграють також державні будівельні норми, зокрема ДБН Б.2.2-12:2019 «Планування і забудова територій», які частково враховують принципи сталого розвитку та екологічної безпеки [9]. Але, на жаль, як показують нові дослідження, наша нормативно-правова база недостатньо узгоджена з міжнародними вимогами і потребує значно глибшої гармонізації [3; 10]. Як прямо зазначає Голіус В. А., відсутність комплексного національного зеленого стандарту, адаптованого до наших умов, сертифікованих об'єктів у нас досі лише кілька десятків — і то переважно в офісному сегменті [11].

Серед головних правових проблем — відсутність комплексного механізму імплементації міжнародних стандартів зеленого будівництва та слабке державне стимулювання [8; 12; 13]. Зокрема, у Законі України «Про регулювання містобудівної діяльності» відсутні положення щодо обов'язкової зеленої сертифікації для об'єктів класів наслідків СС2–СС3. Додатковим викликом є необхідність адаптувати європейські підходи до післявоєнного відновлення. Це передбачає швидке оновлення нормативної бази з урахуванням принципів зеленої реконструкції [8]. Савченко А. М. та Ткаченко Т. М. також наголошують, що важливо імплементувати в національне законодавство європейські еколого-правові аспекти [10].

Перспективи розвитку зеленого будівництва в Україні пов'язані з реалізацією європейських практик, зокрема в межах політики Green Deal, а також із вдосконаленням правового регулювання у сфері ресурсів, відходів та енергоефективності [12; 14]. Реалізація цих перспектив на пряму залежить від виконання Плану UNIDO. Він передбачає картографування стандартів CEN/CENELEC та ISO, зміни технічних регламентів і запровадження обов'язкових зелених критеріїв у державних закупівлях та відбудові [8]. Особливе значення, як свідчить аналіз літератури, мають європейські практики інвестування зеленого будівництва — вони детально розглянуті у підручнику Чали В. С. та співавторів [15].

Отже, міжнародні стандарти зеленого будівництва в Україні потрібно

застосовувати. Для цього необхідна системна робота для повного балансу нормативно-правової бази з міжнародними вимогами. Особливо важливо створити ефективний механізм державного регулювання. Без цього ми ризикуємо сильно відстати. Саме тому це питання є одним із ключових не лише для будівельної галузі та створення якісного середовища, а й для євроінтеграції країни загалом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Височанська М. Я., Косовський Є. О. Міжнародні системи оцінки «зеленого» будівництва // Збалансоване природокористування. 2022. № 2. С. 9–13. DOI: <https://journals.uran.ua/bnusing/article/download/261242/258576> (дата звернення: 20.03.2026)
2. Зимогляд Б. Г., Чала В. С., Нагорний Д. В. Екологічна сертифікація як нормативна архітектура екологізації будівельного сектору: національні пріоритети та глобальні тренди // Економічний простір. 2025. № 204. С. 117–123. DOI: <https://economic-prostir.com.ua/wp-content/uploads/2025/09/204-117-123-zymoglyad.pdf> (дата звернення: 20.03.2026)
3. Гошовський Є. М. Міжнародні екологічні стандарти у сфері містобудування: правові засади та механізми імплементації в Україні // Аналітично-порівняльне правознавство. 2025. № 5 (1). DOI: <https://journal-app.uzhnu.edu.ua/article/view/341857/329763> (дата звернення: 20.03.2026)
4. Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» від 22 червня 2017 року № 2118-VIII : чинний, поточна редакція від 03.08.2025, підстава – 2392-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text> (дата звернення: 21.03.2026).
5. Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» від 23 травня 2017 року № 2059-VIII: чинний, поточна редакція від 15.11.2024, підстава – 4017-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19> (дата звернення: 21.03.2026).
6. Закон України «Про регулювання містобудівної діяльності» від 17 лютого 2011 року № 3038-VI : чинний, поточна редакція від 19.12.2025, підстава – 4625-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17#Text> (дата звернення: 21.03.2026).
7. Савченко А. М. Імплементація еколого-правових аспектів зеленого будівництва в законодавство України // Репозитарій КНУБА. 2022. DOI: <https://repository.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/8d049564-4390-4bb2-b3be-cb4da0a76bfd/content> (дата звернення: 22.03.2026).
8. План впровадження практичних кроків реалізації національної нормативної бази стандартів і технічних регламентів для зеленої реконструкції України / Організація Об'єднаних Націй з промислового розвитку (UNIDO). 2024. 29 с. [Електронний ресурс] – Режим доступу:

<https://hub.unido.org/sites/default/files/publications/Implementation%20Plan%20UA.pdf> (дата звернення: 22.03.2026).

9. ДБН Б.2.2-12:2019 Планування і забудова територій (зі Зміною № 1, офіційна редакція від 08.12.2025, чинні з 01.01.2026). URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/b_2_2_12/1-1-0-1802 (дата звернення: 23.03.2026)

10. Савченко А. М., Ткаченко Т. М. Implementation of European regulations of green building in the construction industry of Ukraine // Environmental Safety and Natural Resources. 2022. Vol. 43. DOI: <https://es-journal.in.ua/article/view/255262/252320> (дата звернення: 23.2026)

11. Голиць В. А. Architecture green standards in Ukraine: current state of the problem // Modern construction and architecture. 2025. № 13. С. 9–19. DOI: <https://www.visnyk-odaba.org.ua/2025-13/13-1.pdf> (дата звернення: 24.03.2026)

12. Троцюк Н. В., Кононенко А. С. Реалізація політики Green Deal у законодавстві України: проблематика теорії та практичної реалізації // Юридичний вісник. 2024. № 3 (72). С. 43–52. DOI: <https://jrnل.nau.edu.ua/index.php/UV/article/view/19057/26307> (дата звернення: 24.03.2026)

13. Гудима Л. О. Імплементация стандартів екологічного будівництва — чинник сталого розвитку держави // Економіка та суспільство. 2024. № 60. DOI: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/download/3644/3573> (дата звернення: 25.03.2026)

14. Закон України «Про управління відходами» від 20 червня 2022 року № 2320-IX: чинний, поточна редакція від 02.03.2026, підстава – 4718-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20> (дата звернення: 25.03.2026).

15. Чала В. С., Орловська Ю. В., Глущенко А. В. Європейські практики інвестування зеленого будівництва: підручник (видання друге, доповнене). Дніпро: УДУ НТ, 2025. 170 с. DOI: <http://srd.pdaba.edu.ua:8080/bitstream/123456789/16314/1/%D0%A7%D0%B0%D0%BB%D0%B0%20%D0%92.%D0%A1.%20%D0%9E%D1%80%D0%B%D0%BE%D0%B2%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B0%20%D0%AE.%D0%92.%20%D0%93%D0%BB%D1%83%D1%89%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%20%D0%90.%D0%92.%20%D0%84%D0%B2%D1%80%D0%BE%D0%BF%D0%B5%D0%B9%D1%81%D1%8C%D0%BA%D1%96%20%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B8.pdf> (дата звернення: 25.03.2026).

ФОРМУВАННЯ СТАЛОГО БІОКЛІМАТИЧНОГО ПРОСТОРУ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ТЕПЛООВОГО КОМФОРТУ НАСЕЛЕННЯ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ

Ілля Святогорів¹, Тетяна Ткаченко¹, Олена Волошкіна¹

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
tall.arh@gmail.com, tkachenkoknuba@gmail.com,
evoloshki@gmail.com*

При післявоєнній відбудові країни в рамках концепції кліматичної нейтральності міст насамперед необхідно враховувати тепловий комфорт людей, які перебувають на відкритому повітрі прибудинкового простору.

Одним із найпоширеніших типів забудови, яке проєктується в сучасних містах, як універсальне економічне рішення, є багатоповерхове секційне житло з відкритими дворами на дві та більше сторін. Така планувальна структура навіть при забезпеченні нормативної інсоляції, візуальної відкритості і відносній простоті зонування двору, не враховує зростання середньорічних температур в умовах зміни клімату. Формування несприятливого мікроклімату та вираженого перегріву поверхонь територій різко знижують комфорт і якість перебування мешканців на відкритому повітрі. Попередні дослідження авторів на прикладі взаємозв'язку між прогностичними температурними показниками та тепловим індексом для здоров'я населення для першої кліматичної зони України довів, що рівень ризику для здоров'я населення за індексом WBGT при підвищенні прогностичних температурних показників на кінець 2030-х на 2,24°C при інших рівних умовах і при вологості 80% перейде від помірного до високого і, відповідно, в 2050 році навіть при вологості 50% ризик для здоров'я населення буде визначатися за приведеною шкалою, як високий [1].

В умовах поступових кліматичних змін в рамках концепції «зеленого будівництва» дедалі очевиднішими стають суттєві недоліки такої забудови, оскільки вони пов'язані з вираженням перегрівом прибудинкових територій.

В дослідженнях вважалося, що основним з багатьох факторів, що впливають на тепловий комфорт населення, яке перебуває на відкритому просторі міського середовища є кількість сонячної радіації на підстильній поверхні двору. З метою аналізу механізмів формування теплового режиму прибудинкової території був використаний середній відсоток затінення в комплексі з температурними даними, що дозволить коригувати архітектурно-планувальні рішення ще на ранніх стадіях проєктування. Затінення, створюване будівлями, може як знижувати теплове навантаження в спекотний період, так і, за невдалої конфігурації, призводити до надмірної інсоляції або, навпаки, до дефіциту сонячного світла. При цьому при аналізі затіненості стандартних планувальних рішень автори враховували не лише сумарну кількість сонячної радіації, а й її

часовий розподіл протягом доби.

На підставі отриманих у TownScore – карт розподілу теплового навантаження – здійснено визначення середнього відсотка затінення підстильної поверхні внутрішнього двору для пікового літнього періоду з урахуванням різної орієнтації відносно сторін світу досліджуваних типових рішень забудови квартальних комірок [2,3].

З метою вибору оптимальної схеми планування житлового кварталу на стадії проєктування була здійснена оцінка біокліматичної ефективності як існуючих типових, так і запропонованих альтернативних проєктних рішень у контексті прогнозованих кліматичних змін, що має сприяти підвищенню рівня теплового комфорту населення в міському середовищі.

Встановлено, що інтеграція технологій пасивного охолодження у сучасну міську забудову в умовах спекотного періоду року, за різних варіантів компонування проєктуємих об'ємів будинків у поєднанні з комплексними заходами благоустрою прибудинкових територій, створює передумови для зниження прогнозованих ризиків для здоров'я населення, зокрема через зменшення значень теплового індексу.

На рис.1 представлено варіанти кварталу асиметричної схеми розпланування при різній орієнтації відносно сторін світу.

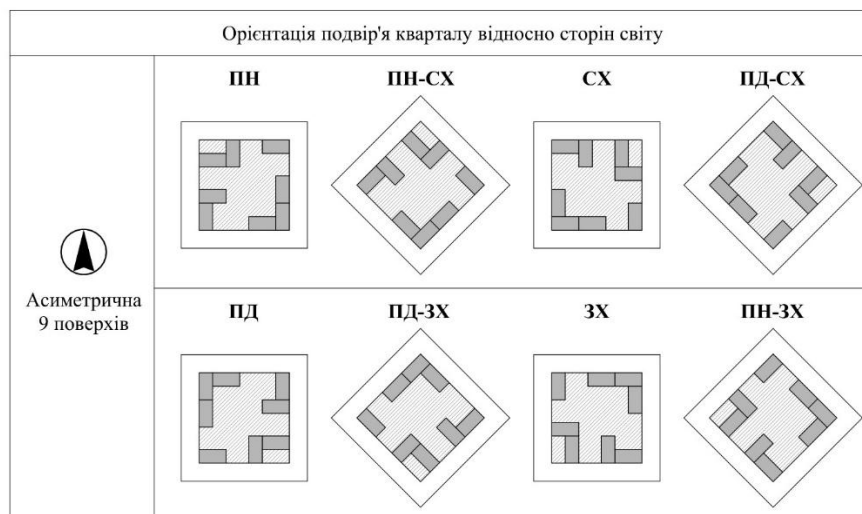


Рис.1. Варіанти орієнтації асиметричної забудови житлового кварталу відносно сторін світу, які досліджувалися

Запропоновані альтернативні рішення квартальної житлової забудови, які полягають у використанні принципів асиметричного розпланування та додаткового озеленення спираються на природні механізми терморегуляції природного ландшафту, що перешкоджає рівномірному та тривалому сонячному опроміненню всіх поверхонь одночасно.

Результати моделювання свідчать, що при різних варіантах орієнтації забудови відносно сторін світу, рівень затінення змінюється у порівняно вузькому діапазоні – від 51,8 % до 60,4 %, що дозволяє знизити ризик

формування великих зон перегріву і сприяє значно комфортному перебуванню населення на прибудинковій території.

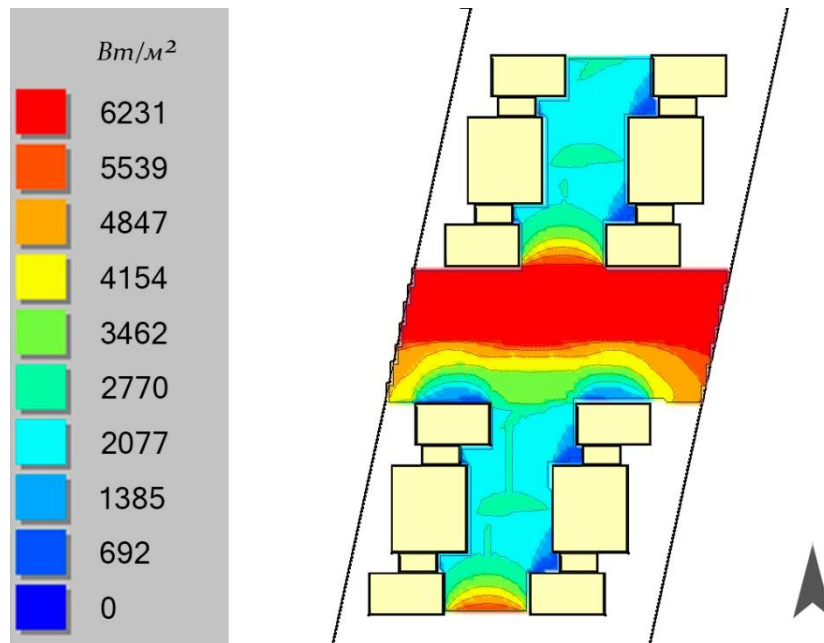


Рис.2. Схема розподілу прямої сонячної радіації у внутрішньому дворі кварталу, що імітує геометрію природного каньйону

На рис.2 представлено розподіл прямої сонячної радіації у внутрішньому дворі кварталу, що імітує в плані геометрію природного каньйону.

Також запропонований теоретичний підхід дозволяє розрахувати вплив озеленення подвір'я на температуру прибудинкової території в літні місяці року, в період максимальної сонячної активності з 11:00 до 14:00 та пасивних методів охолодження прибудинкової території для комфортного перебування міського населення та зниження прогнозного теплового індексу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Святогорів І. (2024). Посилення теплового стресу для населення урбанізованих територій на фоні глобальних кліматичних змін. *Екологічна безпека та природокористування*, 49(1), 49–59. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.1.49-59>
2. Святогорів І. (2024). Тепловий режим території внутрішнього двору секційного житлового будинку в залежності від його орієнтації. *Техніка будівництва*, (40), 109–118. <https://doi.org/10.32347/tb.2024-40.0311>
3. Voloshkina O., Tkachenko T., Sviatohorov I., Bereznytska Y. (2024). The influence of urbanbuilding orientation on the risk of heat stress from being in the courtyard area during the peaksummer period. *Sci. Rev. Eng. Env. Sci.*, 33 (4), 388–400. DOI 10.22630/srees.9953

РЕЦИКЛІНГ ВІДХОДІВ РУЙНАЦІЇ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО БУДІВНИЦТВА

Олена Сорочинська¹

¹Національний транспортний університет,
o.sorochynska@ntu.edu.ua

У сучасних умовах інтенсивного розвитку будівельної галузі та зростання обсягів руйнувань будівель і споруд особливої актуальності набуває проблема ефективного управління відходами руйнації. Значні обсяги будівельних відходів, що утворюються внаслідок демонтажу, реконструкції та аварійного руйнування об'єктів, створюють суттєве навантаження на довкілля та потребують впровадження сучасних підходів до їх переробки і повторного використання.

Одним із ключових напрямів вирішення цієї проблеми є рециклінг відходів руйнації, який дозволяє трансформувати відходи у вторинні матеріальні ресурси. Такий підхід сприяє зменшенню обсягів захоронення відходів, зниженню споживання природних ресурсів і скороченню енергетичних витрат на виробництво будівельних матеріалів.

У контексті концепції сталого розвитку будівництва рециклінг виступає не лише як технологічний процес, а як ефективний інструмент забезпечення екологічної, економічної та ресурсної збалансованості галузі. Використання вторинних матеріалів у будівництві дозволяє підвищити ресурсоефективність, зменшити вуглецевий слід та оптимізувати витрати на будівельні роботи.

Таким чином, дослідження можливостей і ефективності рециклінгу відходів руйнації є важливим завданням для впровадження принципів сталого будівництва та формування циркулярної економіки у будівельній галузі.

В умовах України проблема управління відходами руйнації набула критичного масштабу внаслідок широкомасштабних руйнувань з 2022 року. За оцінками, наведеними у спільному звіті Уряду України, Світового банку, Європейської Комісії та ООН (*Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment*), загальні прямі збитки інфраструктури перевищують 195 млрд дол. США, тоді як потреби у відновленні оцінюються на рівні близько 588 млрд дол. США. Такий масштаб руйнувань супроводжується утворенням значних обсягів будівельних відходів, що потребує впровадження ефективних систем їх переробки та повторного використання [1].

У зв'язку з цим активно впроваджуються інноваційні підходи, зокрема мобільні переробні комплекси та автоматизовані системи сортування [2]. Застосування таких рішень підвищує рівень вилучення вторинних матеріалів до 60–80% та скорочує логістичні витрати і мінімізує негативний вплив на навколишнє середовище.

Відходи руйнації розглядаються як джерело вторинної сировини, придатної для використання як заповнювач у бетоні та основа дорожніх покриттів. Їх використання сприяє зниженню навантаження на полігони, скороченню споживання первинної сировини та підвищенню рівня екологізації будівельної діяльності [3]. Перероблені матеріали можуть ефективно застосовуватися у дорожньому будівництві, виробництві бетонних сумішей та інших конструкційних елементів, що відповідає принципам циркулярної економіки та забезпечує ресурсозбереження у будівельній галузі [4].

Відходи руйнації утворюються внаслідок демонтажу або руйнування будівель і включають широкий спектр матеріалів. Основні їх види наведено на рисунку 1.

Аналіз структури відходів руйнації (рис. 1) свідчить, що переважаючу частку становлять мінеральні матеріали (бетон, залізобетон, цегла), які сумарно формують близько 70–80% загального обсягу. Частка металів становить у середньому 5–10%, тоді як інші компоненти (деревина, пластик, змішані матеріали) займають не більше 10–15%. Така структура підтверджує доцільність орієнтації технологій переробки саме на вилучення та повторне використання мінеральної складової.

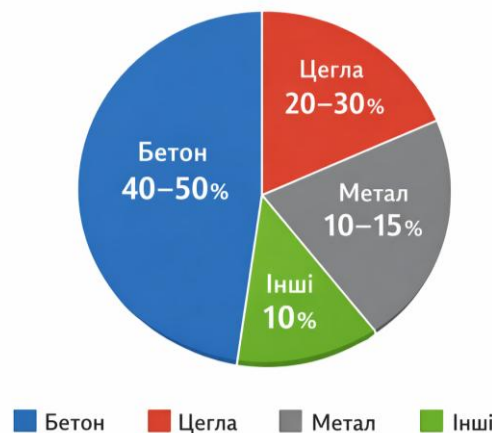


Рис 1. Структура відходів руйнації будівельних об'єктів

Найбільшу частку становлять мінеральні матеріали (бетон, залізобетон, цегла), які мають високий потенціал для повторного використання після дроблення та сортування [5].

Переробка відходів руйнації (рис. 2) включає такі основні етапи: сортування; дроблення; очищення від домішок; фракціонування. У результаті отримують вторинні матеріали, які можуть використовуватися як заповнювачі в бетонах, основи дорожніх покриттів або насипні матеріали [6].

На відміну від традиційних схем, запропонована послідовність

процесів із інтеграцією попереднього сортування та локальної переробки забезпечує зменшення частки змішаних відходів, підвищення якості вторинної сировини та скорочення транспортних витрат. Це дозволяє підвищити ступінь вилучення придатних матеріалів, мінімізувати втрати ресурсів та оптимізувати логістичні процеси, що в цілому сприяє зростанню ефективності рециклінгу та зниженню екологічного навантаження.



Рис 2. Схема переробки відходів руйнації

З метою підвищення ефективності переробки відходів руйнації запропоновано авторську схему оптимізації, яка, на відміну від традиційного підходу, передбачає інтеграцію етапів сортування та логістики на основі принципу попередньої селекції матеріалів безпосередньо на місці демонтажу.

Запропонована схема додатково враховує інтеграцію попереднього сортування, локальної переробки та цифрової оптимізації логістики безпосередньо на етапі демонтажу, що забезпечує зменшення обсягів змішаних відходів та підвищення ефективності рециклінгу.

Запропонована схема включає такі додаткові елементи:

- первинну ідентифікацію матеріалів на етапі демонтажу;
- розділення потоків відходів за класами придатності;
- використання мобільних дробильних установок;
- оптимізацію транспортних маршрутів на основі цифрових моделей.

Реалізація такого підходу дозволяє зменшити обсяги змішаних відходів на 20–30% та підвищити якість вторинної сировини.

Систематизація напрямів використання вторинних матеріалів наведена в таблиці 1.

Таблиця 1

Використання вторинних ресурсів у будівництві

Вид відходів	Продукт переробки	Напрямок використання
Бетон, залізобетон	Вторинний щебінь	Дорожнє будівництво, бетонні суміші
Цегла	Цегляний бій	Засипки, теплоізоляційні матеріали
Асфальт	Асфальтова крихта	Ремонт дорожніх покриттів
Метал	Металобрухт	Повторне виробництво

Застосування вторинних ресурсів дозволяє знизити витрати на будівельні матеріали та зменшити обсяг відходів. Використання вторинних ресурсів має низку переваг:

- зменшення обсягів захоронення відходів;
- скорочення використання природних ресурсів;
- зниження енергоспоживання;
- зменшення викидів CO₂ [4].

Крім того, сучасні дослідження підтверджують можливість використання перероблених будівельних відходів для створення нових цементних матеріалів із нижчим рівнем енергоспоживання та викидів парникових газів [6].

В умовах післявоєнного відновлення особливо важливим є впровадження комплексних систем управління відходами руйнації, що передбачає використання інтелектуальних технологій, цифрових моделей та автоматизованих систем сортування.

Порівняльний аналіз традиційного та інноваційного підходів до управління відходами руйнації показує суттєві відмінності в їх ефективності. Традиційна модель, що базується на централізованому сортуванні та захороненні відходів, характеризується низьким рівнем повторного використання матеріалів (до 30%) та значними логістичними витратами.

Натомість інноваційний підхід, який передбачає попереднє сортування, локальну переробку та використання цифрових технологій, забезпечує підвищення рівня рециклінгу до 60–80%, зменшення транспортних витрат та зниження екологічного навантаження. Це підтверджує доцільність переходу до децентралізованих моделей переробки відходів у будівельній галузі.

Для кількісної оцінки ефективності переробки відходів руйнації доцільно використовувати показник рівня утилізації матеріалів, який визначається як відношення маси вторинно використаних ресурсів до загальної маси відходів. Цей показник є ключовим індикатором ефективності системи рециклінгу:

$$\eta = \frac{M_{rec}}{M_{tot}} \cdot 100\% \quad (1)$$

де M_{rec} — маса перероблених та повторно використаних матеріалів; M_{tot} — загальна маса відходів руйнації.

Практичні оцінки показують, що при застосуванні сучасних технологій сортування та дроблення значення показника η може досягати 60–80%, тоді як при традиційному підході (захоронення або мінімальна переробка) цей показник не перевищує 20–30%.

Економічна ефективність використання вторинних матеріалів проявляється у зниженні витрат на будівництво в середньому на 15–25% за

рахунок зменшення витрат на придбання первинної сировини та транспортування. Водночас екологічний ефект полягає у скороченні викидів CO₂ до 20–40%, що досягається за рахунок зменшення енерговитрат на виробництво нових матеріалів.

У роботі обґрунтовано доцільність розгляду рециклінгу відходів руйнації як комплексного інструменту забезпечення сталого будівництва, що поєднує технологічні, логістичні та цифрові рішення.

На відміну від традиційних підходів, запропонована модель управління відходами передбачає інтеграцію процесів попереднього сортування на етапі демонтажу, локальної переробки та цифрової оптимізації матеріальних потоків, що дозволяє підвищити керованість процесів та якість вторинної сировини.

Практична значущість отриманих результатів полягає у підтвердженні ефективності децентралізованих підходів до переробки відходів, які забезпечують одночасне досягнення економічного та екологічного ефектів. Це створює передумови для широкого впровадження циркулярних принципів у будівельній галузі.

Отримані результати можуть бути використані при розробці стратегій управління відходами руйнації та плануванні відновлювальних робіт, що особливо актуально в умовах післявоєнної відбудови України.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA3). (2024). Government of Ukraine, World Bank Group, European Commission, United Nations. URL: <https://www.worldbank.org> (дата звернення: 24.03.2026).
2. European Commission. (2020). *Construction and Demolition Waste Management Protocol*. Publications Office of the European Union. <https://ec.europa.eu>
3. Moschen-Schimek, J., Kasper, T., & Huber-Humer, M. (2023). *Recovery rates of construction and demolition waste in the EU*. Waste Management, **161**, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.05.020>
4. Bayram, B., & Greiff, K. (2023). *Life cycle assessment on construction and demolition waste recycling: A systematic review analyzing three important quality aspects*. The International Journal of Life Cycle Assessment, **28**, 967–989. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02145-1>
5. Akhtar, A., Sarmah, A. K. (2022). Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *Journal of Cleaner Production*, **332**, 129898. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129898>
6. Jean, B., Liu, H., Zhu, X., Wang, X., Yan, X., Ma, T. (2024). Enhancing the Mechanical and Durability Properties of Fully Recycled Aggregate Concrete Using Carbonated Recycled Fine Aggregates. *Materials*, **17**(8), 1715. <https://doi.org/10.3390/ma17081715>.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ МОНІТОРИНГ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПРОДОВЖЕННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ТА ЗНИЖЕННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО СЛІДУ ОБ'ЄКТІВ БУДІВНИЦТВА

Роман Степанюк¹,

¹Інститут інноваційної освіти КНУБА, StepaniukR@gmail.com

На сучасному етапі розвитку світової економіки будівельна галузь постає перед викликом радикальної трансформації в межах «зеленого» курсу. Традиційна модель «проектування–будівництво–знесення» вичерпала свій ресурс через критично високий вуглецевий слід. За даними Global Status Report, на сектор будівництва припадає близько 37% глобальних викидів CO₂. Лівова частка цих викидів генерується під час виробництва сталі та цементу.

Найбільш дієвим методом декарбонізації є не лише підвищення енергоефективності нових споруд, а й максимальне подовження життєвого циклу існуючого фонду. Впровадження систем інтелектуального моніторингу дозволяє перетворити пасивні споруди на інтерактивні об'єкти, де рішення про ремонт приймаються на основі предиктивної аналітики, що мінімізує потребу в нових ресурсомістких конструкціях.

В умовах України, де інфраструктура зазнає безпрецедентних руйнувань, задача декарбонізації галузі нерозривно пов'язана з подовженням терміну безпечної експлуатації відновлюваних об'єктів. Пролонгація життя існуючих конструкцій замість їх повного демонтажу та заміни новими є найбільш ефективним способом зниження «втіленого вуглецю» (embodied carbon). Це вимагає впровадження високотехнологічних інтелектуальних систем моніторингу, що здатні забезпечити предиктивне обслуговування об'єктів критичної інфраструктури.

Методичне підґрунтя та трирівнева цифрова архітектура системи

Дослідження пропонує перехід від концепції періодичних візуальних оглядів до безперервного цифрового супроводу об'єкта. Архітектура розробленої інтелектуальної системи має ієрархічну структуру.

Рівень 1. Сенсорний рівень (Data Acquisition):

Основою системи є мережа IoT-датчиків (тензометри, акселерометри, інклінометри), що фіксують напружено-деформований стан у реальному часі. Використання БПЛА, оснащених камерами високої роздільної здатності та тепловізорами, дозволяє здійснювати неруйнівний контроль важкодоступних вузлів. Це забезпечує вхідний масив «Big Data», необхідний для навчання нейронних мереж.

Рівень 2. Аналітичне ядро (AI Processing):

Центральним елементом є нейронна мережа, архітектура якої оптимізована за допомогою алгоритму Bayesian Optimization. Це дозволяє

системі не просто фіксувати відхилення, а класифікувати дефекти та прогнозувати швидкість їх розвитку. Використання функції активації ReLU забезпечує високу обчислювальну швидкість.

Рівень 3. Візуалізація та управління (BIM-інтеграція):

Результати аналізу інтегруються в середовище Autodesk Revit. Це трансформує статичну BIM-модель у динамічний «цифровий двійник». Кожен елемент конструкції отримує цифровий статус, що дозволяє інженерам бачити проблемні зони безпосередньо в 3D-моделі споруди.

Екологічні переваги інтелектуального підходу в концепції Green Building

Інтелектуальний моніторинг є ключовим інструментом реалізації екологічної стратегії будівництва за декількома напрямками:

- Принципи Circular Economy (Економіка замкненого циклу): Економіка замкненого циклу передбачає збереження вартості та функціональності об'єктів якомога довше. Точна діагностика залишкового ресурсу дозволяє уникнути передчасного знесення. З огляду на те, що будівельні відходи складають до 40% загального обсягу сміття у світі, подовження експлуатації об'єкта на 10–20 років дає колосальний екологічний ефект.

- Зниження матеріаломісткості обслуговування: Завдяки предиктивній аналітиці ремонтні роботи стають точковими. Замість повної заміни прогонових будов, ШІ вказує на конкретні локальні вузли, що потребують посилення. Це знижує потребу в новому бетоні та металі.

- Інтеграція з міжнародними стандартами (LEED/BREEAM): Впровадження систем SHM дозволяє об'єкту отримати додаткові бали в категоріях «Управління» та «Інновації», що підвищує ринкову та екологічну цінність нерухомості.

Цінність полягає в розробці адаптивної моделі оцінювання технічного стану, яка враховує не лише фізичні параметри, а й експлуатаційну історію та кліматичні чинники. Експериментальні дослідження, проведені на мостових спорудах, продемонстрували точність прогнозування на рівні 94% при класифікації стану згідно з п'ятибальною шкалою.

П'ятиетапний алгоритм реалізації:

1. Створення детальної інформаційної моделі (BIM) у Revit.
2. Автоматизована екстракція параметрів за допомогою Python-скриптів.
3. Очищення та нормалізація даних для усунення «шумів» від сенсорів.
4. Навчання нейронної мережі на базі відібраних ознак деградації конструкцій.
5. Розгортання моделі у продукційному середовищі для контролю якості прогнозів у реальному часі.

Відбудова України: від руйнації до «стійких міст» (Resilient Cities)

Для України питання моніторингу технічного стану сьогодні має екзистенційне значення. Масштабні руйнування інфраструктури внаслідок воєнних дій вимагають не просто швидкого відновлення, а реалізації принципу «Build Back Better» — будувати краще та сталіше, ніж було.

Впровадження інтелектуальних систем у процеси відбудови дозволяє:

- Створювати стійку інфраструктуру: Нові мости та будівлі мають бути оснащені інтегрованими датчиками ще на стадії зведення. Це дозволить миттєво реагувати на деформації від можливих подальших впливів, забезпечуючи безпеку населення.

- Оптимізація відновлювальних ресурсів: Використання алгоритмів ШІ для аналізу пошкоджених об'єктів дозволяє визначити, які частини конструкції можна зберегти. Це критично важливо для зменшення обсягів будівельного сміття, яке наразі є однією з найбільших екологічних проблем у деокупованих регіонах.

Цифрова трансформація процесів моніторингу через впровадження інтелектуальних систем є невід'ємною частиною «зеленого» будівництва. В умовах відбудови інфраструктури України інтеграція ШІ та BIM у процеси експлуатації стає запорукою створення стійких та екологічно нейтральних міст. Перехід до концепції smart maintenance дозволяє будівельній галузі перестати бути найбільшим забруднювачем і стати прикладом сталого управління ресурсами.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДБН В.1.2-5:2007. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Науково-технічний супровід будівельних об'єктів. Київ: Мінрегіонбуд України, 2007. 32 с.
2. ДСТУ-Н Б В.2.3-37:2016. Настанова з виконання моніторингу технічного стану мостів та труб. Київ: ДП «ДерждорНДІ», 2016. 45 с.
3. ДБН А.2.2-21:2015. Склад та зміст науково-проектної документації щодо впровадження будівельного інформаційного моделювання (BIM). Київ: Мінрегіон України, 2015.
4. Трач Р. В. Інформаційне моделювання та інтелектуальні системи в будівництві: монографія. Київ: Основа, 2021. 240 с.
5. Sacks R., Eastman C., Lee G., Teicholz P. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers. 3rd ed. John Wiley & Sons, 2018. 688 p.
6. Farrar C. R., Worden K. Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective. John Wiley & Sons, 2012. 656 p.
7. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. MIT Press, 2016. 800 p.
8. Snoek J., Larochelle H., Adams R. P. Practical Bayesian Optimization of Machine Learning Algorithms. Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS). 2012. Vol. 25. P. 2951–2959.

9. Арутюнян І. А. Оптимізація нейромережових моделей моніторингу будівельних конструкцій. Журнал інженерних наук. 2022. № 4. С. 112–119.
10. Kibert C. J. Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery. 4th ed. John Wiley & Sons, 2016. 600 p.
11. ISO 15392:2019. Sustainability in buildings and civil engineering works — General principles. International Organization for Standardization, 2019.
12. U.S. Green Building Council. LEED v4.1 Building Design and Construction Guide. 2023. URL: <https://www.usgbc.org/leed> (дата звернення: 08.04.2026).
13. Build Back Better: Звіт щодо стратегії відновлення інфраструктури України. Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. 2024. 84 с.
14. Довгалюк В. Б. Цифрові двійники як інструмент декарбонізації при відновленні зруйнованих об'єктів. Вісник КНУБА. 2023. Вип. 78. С. 44–51.
15. European Green Deal. European Commission communication on a set of policy initiatives. Brussels, 2019.

ЕКСПЕРТИЗА ТА МОНІТОРИНГ ЕКОЛОГІЧНИХ ЗБИТКІВ ВІД ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ НА ОСНОВІ АЕРОКОСМІЧНИХ ТА ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Олександр Трофимчук¹, Василь Триснюк¹

*Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН
України, trysnyuk@ukr.net*

Повномасштабна військова агресія проти України спричинила формування нового класу антропогенно трансформованих територій, що характеризуються комплексною деградацією природного середовища, яка охоплює ґрунти, підземні води, ландшафти та екосистемні зв'язки. Найбільший внесок у формування екологічних збитків пов'язаний із масованими артилерійськими обстрілами, які призводять до масштабного геохімічного забруднення, механічного руйнування ґрунтового покриву та активізації ерозійних і гідрогеологічних процесів. Метою дослідження є розроблення інтегрованого підходу до експертизи та моніторингу екологічних збитків на основі використання аерокосмічних даних, геоінформаційних систем і аналітичного моделювання геохімічних процесів. Отримані результати свідчать про довготривалий, нелінійний характер деградаційних процесів, формування стійких осередків забруднення та необхідність впровадження інтегрованих систем моніторингу для забезпечення післявоєнного відновлення територій.

Екологічні наслідки сучасних військових конфліктів формують якісно новий тип антропогенного впливу, який поєднує високу інтенсивність,

просторову неоднорідність і довготривалість дії, охоплюючи всі компоненти природного середовища. В умовах України зазначені процеси накладаються на історично сформовану високу техногенну навантаженість територій, що зумовлює підвищену вразливість природних систем і прискорене поширення деградаційних змін у ландшафтах.

Ключовою особливістю військово зумовлених екологічних трансформацій є домінуюча роль ґрунтів як основного акумулятора забруднювальних речовин. Проведений аналіз свідчить, що понад 80% сумарного екологічного впливу концентрується у верхніх горизонтах геологічного середовища, де накопичуються токсичні елементи, що надходять із фрагментів боєприпасів та продуктів розкладу вибухових речовин. Масове використання артилерійських снарядів призводить до формування регіональних геохімічних аномалій, що характеризуються підвищеним вмістом важких металів, зокрема Pb, Cd, Ni, Cr, Cu, Zn, Fe, а також мікроелементів, таких як Mo та Sb . Просторова щільність артилерійських уражень, яка в активних зонах бойових дій досягає приблизно 485 вибухів на 1 км², спричиняє кратне збільшення площі впливу геохімічних процесів, що значно перевищує природні фонові варіації.

Геохімічне забруднення супроводжується глибокими геомеханічними трансформаціями ґрунтово-породного масиву. Кожен вибух формує складну систему зон деформації, включаючи подрібнення, ущільнення та тріщиноутворення, що призводить до суттєвого порушення структури ґрунтів. Сукупний ефект багаторазових вибухів зумовлює значні обсяги переміщення та розрихлення ґрунтових мас, які можуть досягати десятків тисяч кубічних метрів на одиницю площі . У результаті формується просторово неоднорідне середовище з підвищеною проникністю, що радикально змінює фільтраційні властивості ґрунтів та сприяє інтенсифікації вертикальної і горизонтальної міграції забруднювальних речовин.

Одним із найбільш критичних наслідків зазначених процесів є активізація ерозійних явищ. Порушена структура ґрунтів стає вкрай чутливою до поверхневого стоку, що спричиняє інтенсивний перенос забруднених часток у річкові системи, водосховища та заплавні території. Оцінки свідчать, що тривалість ерозійно зумовленого перерозподілу забрудненого матеріалу може сягати від кількох десятиліть до понад століття, що вказує на довготривалий характер вторинного забруднення гідрологічних систем . Унаслідок цього відбувається поступове розширення зон впливу за межі первинних осередків ураження та формування дифузних полів забруднення на регіональному рівні.

Поряд із поверхневими процесами, істотним фактором екологічної небезпеки є погіршення природної захищеності підземних вод. Руйнування ґрунтового покриву внаслідок утворення вибухових вирв і тріщин значно підвищує ефективну проникність ґрунтів, створюючи умови для

прискореної інфільтрації забруднювальних речовин. Розрахунки свідчать, що площа порушення захисного шару може перевищувати 70% у межах інтенсивно уражених територій, що фактично призводить до втрати природних бар'єрних функцій геологічного середовища та підвищує ризики забруднення водоносних горизонтів, особливо у районах із неглибоким заляганням ґрунтових вод.

Особливу небезпеку становлять процеси хімічного розкладу вибухових речовин, насамперед тринітротолуолу, який широко застосовується у боєприпасах. У результаті його трансформації утворюються нітратні сполуки, що характеризуються високою рухливістю у системі «ґрунт – вода». Кількісні оцінки свідчать, що сумарна маса нітратів, сформованих унаслідок масштабного застосування боєприпасів, може призводити до забруднення значної частини запасів підземних вод, причому рівень потенційного забруднення може перевищувати 20%. Це становить суттєву загрозу для систем питного водопостачання та екологічної безпеки територій.

Часова динаміка геохімічного забруднення характеризується нелінійним характером і може бути описана експоненційними залежностями, подібними до процесів радіоактивного розпаду. Сукупна дія ерозійного виносу, вертикальної міграції та біогеохімічних трансформацій зумовлює поступове зниження концентрацій забруднювальних речовин, проте період їх напівочищення становить десятки років і, за оцінками, може досягати близько 70 років. Це свідчить про тривалий характер екологічних наслідків військових дій і необхідність їх урахування при плануванні післявоєнного відновлення.

З огляду на масштабність і складність зазначених процесів, традиційні методи наземного моніторингу не забезпечують достатньої повноти оцінювання. У цьому контексті інтеграція аерокосмічних даних дистанційного зондування Землі та геоінформаційних систем створює ефективну основу для комплексного аналізу екологічних збитків. Використання супутникових даних дозволяє здійснювати ідентифікацію порушених територій, аналіз змін рослинного покриву, оцінювання інтенсивності впливу та моніторинг просторово-часової динаміки деградаційних процесів, тоді як ГІС-технології забезпечують інтеграцію різномірної інформації, побудову карт ризиків і формування моделей прогнозування.

Запропонований підхід базується на поєднанні геохімічного аналізу, геомеханічного моделювання та методів дистанційного зондування у єдиній інформаційно-технологічній системі, що дозволяє перейти від фрагментарного аналізу до системної оцінки екологічних збитків. Це створює наукове підґрунтя для розроблення ефективних стратегій відновлення порушених територій та мінімізації екологічних ризиків у повоєнний період. Інтеграція даних дистанційного зондування з

геоінформаційними системами створює основу для формування комплексних моделей оцінювання екологічних ризиків. У межах таких моделей поєднуються результати спектрального аналізу, геоморфологічні характеристики територій, дані про гідрогеологічні умови та результати польових досліджень. Це дозволяє не лише локалізувати осередки найбільш інтенсивного забруднення, але й прогнозувати напрями міграції токсичних речовин, зокрема важких металів та нітратних сполук, у системі «грунт – вода – біота». Важливим аспектом є можливість оцінювання втрати природної захищеності підземних вод унаслідок вибухових деформацій ґрунтового шару, що суттєво підвищує ризики їх забруднення.

Суттєвою перевагою аерокосмічних технологій є їх здатність забезпечувати регулярний моніторинг великих територій у режимі, близькому до реального часу, що є критично важливим в умовах динамічної зміни ситуації в зоні бойових дій. Використання сучасних алгоритмів обробки супутникових даних, включаючи методи машинного навчання та автоматизованої класифікації зображень, дозволяє підвищити точність виявлення пошкоджених ділянок і кількісного оцінювання рівнів деградації. Це створює передумови для формування цифрових геопросторових баз даних екологічних збитків, які можуть використовуватися як інструмент підтримки прийняття управлінських рішень у сфері відновлення територій.

Висновки. Таким чином, застосування аерокосмічних технологій у поєднанні з геоінформаційним моделюванням формує науково обґрунтовану методологічну основу експертизи екологічних збитків від військових дій, забезпечуючи підвищення об'єктивності оцінювання, просторову деталізацію результатів та можливість довгострокового прогнозування змін стану довкілля. Це дозволяє розглядати аерокосмічний моніторинг як один із ключових інструментів екологічної безпеки та стратегічного планування післявоєнного відновлення.

Запропонований науково-методичний підхід забезпечує підвищення достовірності оцінювання стану довкілля та створює передумови для ефективного управління процесами післявоєнного відновлення територій

ЛІТЕРАТУРА

1. Трофимчук О.М., Зорін Д.О., Триснюк В.М. Екологічна безпека підтоплених паводками територій / О.М. Трофимчук, Д.О. Зорін, В.М.Триснюк – Наукова думка. - Київ , 2024. (Триснюк В. 1 /3) С.248.
<http://repositc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/17917/1/Monograph-09-06-2023.pdf#page=167>.
2. Триснюк В. М., Марущак В.М. Інформаційні технології для візуалізації та обробки даних у сфері геопросторової розвідки. Телекомунікаційні та інформаційні технології. № 4 (83). 2024. р.С.80-88. ISSN 2412-4338. DOI:0.31673/2412-4338.2024.027280, <https://fileview.ukr.net/?url=https://mail.ukr.net/api/public/file>

ОЦІНЮВАННЯ ВІЙСЬКОВО-ОБУМОВЛЕНИХ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ НА ОСНОВІ АЕРОКОСМІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ТА ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

***Тарас Триснюк¹, Віктор Шумейко¹, Роман Белоус¹, Володимир Дзюба¹,
Дмитро Мосійчук¹***

*¹Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН
України, taras24t@gmail.com*

Сучасні військові дії в Україні супроводжуються масштабними трансформаціями природного середовища, що мають виражений кількісний прояв і можуть бути об'єктивно зафіксовані за допомогою аерокосмічних технологій дистанційного зондування Землі. На відміну від традиційних техногенних факторів, військові процеси поєднують механічні, термічні, хімічні та гідрологічні ефекти, які одночасно впливають на всі компоненти геосистем, формуючи каскадні екологічні порушення. У таких умовах оцінювання військових ризиків для навколишнього середовища повинно ґрунтуватися на інтегрованому підході, що враховує просторово-часову динаміку руйнувань, їхню інтенсивність, характер пошкоджень і довготривалі наслідки для екосистем. Довготривалі наслідки військових дій для довкілля мають кумулятивний характер і можуть проявлятися протягом десятиліть. Забруднення ґрунтів і вод токсичними речовинами, знищення біорізноманіття, порушення екосистемних зв'язків і зміна біогеохімічних циклів формують складну систему екологічних ризиків, що потребує довгострокового моніторингу та відновлення. За оцінками, період природного відновлення деяких екосистем може становити від кількох десятків до понад ста років, що свідчить про масштабність і тривалість впливу військових дій.

Одним із ключових факторів деградації довкілля є масовані артилерійські обстріли, які призводять до глибоких порушень ґрунтового покриву, формування вирв, руйнування структури ґрунтів і зміни їх фізико-механічних властивостей. Вибухові процеси супроводжуються викидом великої кількості токсичних речовин, включаючи продукти розкладу тринітротолуолу, важкі метали та інші хімічні елементи, які проникають у ґрунтові горизонти та формують довготривалі осередки забруднення. Унаслідок цього відбувається підвищення фонових концентрацій токсикантів, що створює ризики їхнього потрапляння у харчові ланцюги та негативного впливу на біоту та здоров'я населення. Одночасно відбувається порушення захисної функції ґрунтового покриву, що сприяє інфільтрації забруднювальних речовин у підземні води, формуючи додаткові екологічні ризики. Просторовий аналіз супутникових даних свідчить про значне зростання інтенсивності екологічних порушень, зокрема на територіях природно-заповідного фонду, де зафіксовано щонайменше 1865 термічних

аномалій, пов'язаних із пожежами, та понад 2100 га земель із механічно порушеним ґрунтовим покривом. Виявлено також 3499 об'єктів військової присутності, що формують локалізовані осередки інтенсивного антропогенного навантаження та визначають структуру просторового розподілу екологічних ризиків.

Кількісне оцінювання деградації рослинного покриву здійснюється на основі аналізу спектральних індексів, насамперед NDVI, значення якого у зоні активних бойових дій знижуються з фонового рівня 0,6–0,8 до 0,2–0,3, що відповідає переходу від здорової рослинності до стану значного пригнічення або повного знищення біомаси[1,]. У районах інтенсивних пожеж значення індексу NBR зменшуються на 0,3–0,6 відносних одиниць, а диференційний показник dNBR перевищує порогові значення 0,44–0,66, що відповідає високому та дуже високому ступеню вигорання територій. Використання мультиспектральних даних із просторовою роздільною здатністю 10–20 м (Sentinel-2) та надвисокодетальних знімків 0,3–0,5 м дозволяє здійснювати детальне картографування зон пошкодження та визначати межі деградації з точністю до окремих ділянок.

Порушення ґрунтового покриву супроводжується зміною фізико-хімічних властивостей ґрунтів і зростанням концентрацій токсичних речовин. За оцінками, у зонах інтенсивних обстрілів концентрації важких металів (Pb, Cu, Zn) можуть перевищувати фонові значення у 2–5 разів, а локально – до 8–10 разів, що створює довготривалі осередки забруднення. Площа вторинного забруднення, пов'язаного з переміщенням ґрунтових мас і ерозійними процесами, може перевищувати площу первинного ураження у 1,5–2 рази, що суттєво ускладнює процеси рекультивації. Унаслідок порушення структури ґрунтів коефіцієнт інфільтрації зростає на 20–40 %, що сприяє проникненню забруднювачів у підземні води та формуванню додаткових ризиків для водних ресурсів.

Гідрологічні зміни, спричинені руйнуванням інженерної інфраструктури, характеризуються різким порушенням водного балансу територій. У випадках катастрофічних подій, таких як руйнування гідротехнічних споруд, площі затоплення можуть досягати десятків тисяч гектарів, що супроводжується переміщенням значних обсягів забруднювальних речовин та формуванням нових зон екологічного ризику.

Кількісне оцінювання військових ризиків здійснюється на основі інтегрованих моделей, що враховують інтенсивність уражень, площі пошкоджень і щільність військової інфраструктури[2,3.]. Індекс екологічного ризику може бути представлений як безрозмірний показник у діапазоні 0–1, де значення 0,7–0,9 відповідають критичному рівню деградації екосистем. У зонах активних бойових дій такі значення досягаються на площах, що становлять 15–30 % від загальної території дослідження, тоді як у прилеглих районах спостерігаються середні значення 0,4–0,6, що відповідає помірному рівню ризику.

Застосування методів стохастичного моделювання, зокрема методу Монте-Карло, дозволяє враховувати невизначеність вхідних параметрів і оцінювати ймовірність розвитку критичних екологічних сценаріїв. За результатами моделювання, ймовірність переходу територій до стану незворотної деградації може становити 0,6–0,8 у зонах інтенсивного військового впливу, тоді як у периферійних районах цей показник знижується до 0,2–0,4. Використання таких моделей дозволяє визначати пріоритетні ділянки для проведення відновлювальних заходів і оптимізувати розподіл ресурсів.

Інтеграція супутникових даних, геоінформаційних систем і алгоритмів штучного інтелекту забезпечує формування багаторівневих моделей екологічного стану територій, що включають аналіз спектральних характеристик, текстурних ознак і просторових взаємозв'язків[4]. Використання нейронних мереж дозволяє підвищити точність класифікації пошкоджених територій до 85–92 %, що значно перевищує показники традиційних методів аналізу. Це створює передумови для автоматизованого формування цифрових карт екологічних ризиків і забезпечує можливість оперативного реагування на зміни стану довкілля.

Інтегровані геоінформаційні моделі воєнних екологічних змін дозволяють об'єднувати дані різного походження в єдину систему, що забезпечує комплексний аналіз і підтримку прийняття рішень[5]. Такі моделі включають цифрові екологічні індикатори, що характеризують стан ґрунтів, рослинності, водних ресурсів і біорізноманіття, а також дозволяють здійснювати картографування зон ризику та прогнозування розвитку екологічних процесів. Важливим елементом є інтеграція результатів моделювання з системами управління, що забезпечує можливість оперативного реагування на екологічні загрози.

Умови воєнного часу характеризуються високим рівнем невизначеності, що пов'язано з обмеженим доступом до територій, швидкою зміною ситуації та недостатністю польових даних. У цьому контексті дистанційні методи дослідження стають основним джерелом інформації, що дозволяє забезпечити безперервний моніторинг і своєчасне виявлення змін. Формування локальних і регіональних систем моніторингу, які забезпечують збір, обробку та аналіз даних, є необхідною умовою ефективного управління екологічною безпекою.

Довготривалі наслідки військових дій для довкілля мають кумулятивний характер і можуть проявлятися протягом десятиліть. Забруднення ґрунтів і вод токсичними речовинами, знищення біорізноманіття, порушення екосистемних зв'язків і зміна біогеохімічних циклів формують складну систему екологічних ризиків, що потребує довгострокового моніторингу та відновлення. За оцінками, період природного відновлення деяких екосистем може становити від кількох десятків до понад ста років, що свідчить про масштабність і тривалість

впливу військових дій

Таким чином, оцінювання військових ризиків для навколишнього середовища є складною міждисциплінарною задачею, що потребує інтеграції сучасних інформаційних технологій, методів аналізу даних і екологічних знань. Використання аерокосмічних технологій, геоінформаційного моделювання та методів штучного інтелекту дозволяє забезпечити об'єктивну оцінку масштабів і наслідків екологічних порушень, формувати науково обґрунтовані рекомендації щодо відновлення територій і забезпечувати екологічну безпеку в умовах воєнного часу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Трофимчук О.М., Адаменко О.М., Триснюк В.М. Геоінформаційні технології захисту довкілля природно-заповідного фонду /Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України; Івано-Франківський нац. тех. ун-т нафти і газу. - Івано-Франківськ :Супрун В.П., 2021. – 343 с.// ISBN 978-617-7468-53-9 10.3997/2214-4609.201902083 (Триснюк В. 1 /3) <https://itgip.org/wp-content/uploads/2023/01/monografiya-trofymchuk-adamenko-try snyuk.pdf>
2. . Vasyl Trysnyuk, Volodymyr Yehorov, Serhii Tymchuk, Taras Trysnyuk. Geo-information system for ensuring the functioning of the VHF range radio direction finding network. ITTAP 2022. Information Technologies: Theoretical and Applied Problems 2022. Proceedings of the 2nd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAP 2022). P. 117-123. Ternopil, Ukraine , November 22-24, 2022. <https://ceur-ws.org/Vol-3309/> <https://ceur-ws.org/Vol-3309/short5.pdf>
3. Serhii Zaitsev, Vladyslav Vasylenko, Vasyl Trysnyuk, Taras Trysnyuk. Adaptive method for assessing information reliability under uncertainty for 5G and IoT systems. International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, November 22–24, 2023, Ternopil, Ukraine, Opole, Poland. Vol-3628. <https://ceur-ws.org/Vol-3628/paper2.pdf>.
4. В.М. Триснюк, В.О. Шумейко, Т.В. Триснюк, Т.В. Марущак. Моніторинг радіоактивного забруднення місцевості та ліквідації наслідків природних та техногенних катастроф. Екологічна безпека та природокористування. Київський національний університет будівництва і архітектури. Збірник наукових праць. Випуск 2 (42), квітень-червень 2022 р. с. 35-46. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.2>
5. В.М. Триснюк, В.О. Шумейко Інформаційно-технічне моделювання балочних структур за матеріалами мультиспектральних знімків. Збірник наукових праць Екологічна безпека та природокористування. Том 47 № 3 (2023),. с. 144-153. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.3>

БІО-ОРІЄНТОВАНІ НАНОМАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО ВИДАЛЕННЯ АРСЕНУ З ЗАБРУДНЕНИХ ПІДЗЕМНИХ ВОД: ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Дмитрій Трохименко¹, Марина Кравченко¹

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
dmitrijtrohimenko@gmail.com*

Арсен є двадцятим за поширенням мікроелементом у земній корі та входить до складу приблизно 245 мінеральних видів, переважно руд, які містять мідь, сульфід, свинець, нікель, кобальт або інші метали. Завдяки специфічним хімічним властивостям цей елемент широко використовується у багатьох сферах: електронній промисловості, аграрному секторі, металургії, консервації деревини, лісозаготівлі а також у медицині [1]. Таке широке застосування призводить до зростання антропогенного навантаження, яке разом із природними процесами - вивітрюванням арсеновмісних мінералів і вулканічною активністю - сприяє його накопиченню в довкіллі.

Арсен належить до групи високотоксичних металоїдів і за класифікацією Всесвітньої організації охорони здоров'я віднесений до канцерогенів першої групи. Його міграція та поведінка в навколишньому середовищі визначаються передусім типом вихідної мінеральної сировини, ступенем окиснення та особливостями перенесення у конкретних умовах. [2]. Забруднення води арсеном становить одну з найсерйозніших екологічних проблем і загроз для громадського здоров'я у світовому масштабі. Мільйони людей у різних регіонах світу змушені використовувати для пиття неглибокі підземні води, що містять підвищені концентрації миш'яку.

Наноматеріали сьогодні розглядаються як одне з найперспективніших рішень для ефективного видалення арсену з води, оскільки вони можуть застосовуватися як самостійно, так і в поєднанні з іншими технологіями очищення, забезпечуючи підвищення загальної результативності процесу за рахунок високої питомої поверхні, активних центрів сорбції та специфічних фізико-хімічних властивостей.

При цьому порівняльний аналіз основних методів очищення з використанням різних типів наноматеріалів, що охоплює їх склад, функціональні характеристики, механізми взаємодії з арсеном, а також показники ефективності, селективності та можливості практичного впровадження, свідчить про те, що вибір оптимального підходу визначається умовами середовища, рівнем забруднення, технологічними обмеженнями та економічною доцільністю кожного конкретного рішення (табл. 1). [3,4,5]

Таблиця 1

Порівняльний аналіз методів видалення арсену з використанням наноматеріалів

№	Метод	Механізм	Матеріали	Переваги	Недоліки
1	Адсорбція	Зв'язування арсену на поверхні	Хітозан, біочар, оксиди Fe	Простота, дешевизна, висока ефективність	Низька селективність, зниження ефективності з часом
2	Фільтрація та мембрани	Фільтрація через нанопори	Нанofільтраційні мембрани, TiO ₂	До 99% очищення, селективність	Дороговизна, забруднення мембран
3	Фотокаталіз	Окиснення As(III) → As(V) та адсорбція	TiO ₂ , CNT, композити	Використання світла, висока ефективність	Залежність від освітлення
4	Окисно-відновні реакції	Перетворення токсичних форм у більш адсорбовані форми	Fe/Cu, MnO ₂ , металорганічні каркасні структури	Перетворення токсичного As(III) у менш токсичний As(V)	Вимагаються специфічні умови pH; деградація матеріалу з часом
5	Комплексоутворення	Утворення стабільних комплексів між функціональними групами та іонами арсену	Біочар Fe/Cu, стабілізовані хітозаном магнітні наночастинки, нанокомпозити MnFe ₂ O ₄	Висока ефективність	Дорога модифікація
6	Іонний обмін	Заміщення іонів арсену (As ⁵⁺ /As ³⁺) функціональними групами (наприклад, -NH ₃ ⁺ , -OH) на поверхні наноматеріалу	Хітозан, хітин	Високо ефективний метод для низьких концентрацій арсену, оборотний процес	Мала ємність, чутливість до конкуруючих іонів
7	Коагуляція	Утворення флокул	Хітозан, біополімери	Дешевизна, швидкість	Осад, потрібна доочистка

Одним із ключових напрямів сучасних досліджень є поглиблене розуміння та цілеспрямована оптимізація фізико-хімічних властивостей наноматеріалів з метою підвищення їх селективності та ефективності у процесах видалення арсену. Розробка таких матеріалів суттєво залежить від умов їх практичного застосування, оскільки механізми видалення арсену включають складні поверхневі взаємодії, окисно-відновні перетворення

(реакції) та процеси іонного транспорту. Додатковим ускладнювальним фактором є присутність конкуруючих іонів, зокрема фосфатів, які знижують ефективність адсорбції, що створює труднощі при масштабуванні технологій від лабораторних до польових (реальних) умов. Водночас недостатньо дослідженими залишаються довгострокові екологічні наслідки та потенційні ризики для здоров'я людини, пов'язані з використанням наноматеріалів, що безпосередньо впливає на їхню сталість та економічну доцільність. Значні технічні труднощі також пов'язані з ефективним розділенням і регенерацією наноадсорбентів після використання. Подолання цих викликів потребує комплексного підходу, який передбачає оптимізацію дизайну матеріалів, розробку ефективних і економічно обґрунтованих методів регенерації, а також оцінку їх ефективності в реальних умовах експлуатації.

Суттєвим сучасним викликом залишається забезпечення хімічної стабільності та селективності біо-орієнтованих наноматеріалів в реальних умовах ремедіації води від арсену. Хоча багато біо-орієнтованих матеріалів, таких як наночастинки, модифіковані хітозаном, або металеві оксиди на основі біовуглецю, демонструють високі показники ефективності в контрольованих лабораторних умовах, їх продуктивність суттєво знижується при переході до природних водних систем [6]. Головною причиною такого зниження є присутність конкуруючих аніонів, які конкурують за активні центри на поверхні наноматеріалу та перешкоджають адсорбції арсену. Крім того, деякі біосумісні нанокомпозити з часом можуть зазнавати структурного або хімічного розкладання. Це пов'язано з їх природною біосумісністю та екологічно -безпечними властивостями. Зокрема, активність мікробів, тривалий вплив коливань рН та змінних іонних умов можуть суттєво змінювати поверхневу хімію матеріалів на основі біовуглецю.

Тому ключовим завданням є підвищення селективності та довгострокової стабільності цих матеріалів під час експлуатації в різних екологічних матрицях. Це можна досягти шляхом цілеспрямованої функціоналізації поверхні та посилення їх хімічної стійкості [7].

Важливим аспектом сталого застосування біо-орієнтованих наноматеріалів для ремедіації підземних вод від арсену є їх можливість багаторазового використання та простота регенерації. Хоча багато адсорбентів на основі біополімерів або біовуглецю спочатку демонструють високу ефективність видалення арсену, при повторному використанні вони часто зазнають забруднення поверхні, структурної деградації або незворотного зв'язування миш'яку, що призводить до поступового зниження їх продуктивності.

Регенерація таких матеріалів повинна проводитися з урахуванням їх екологічних переваг, тому бажано уникати застосування сильних хімічних реагентів, які можуть нівелювати «зелені» властивості наноматеріалів.

Перспективними є «м'які» методи регенерації, зокрема низькотемпературна термічна обробка або використання слабких лужних розчинів. Ці підходи дозволяють відновлювати адсорбційну здатність без суттєвого пошкодження матеріалу та утворення небезпечних відходів.

Додатковим ефективним рішенням є створення магнітних біо-орієнтованих композитів, наприклад, наночастинок магнетиту, покритих хітозаном. Такий підхід забезпечує просте магнітне відділення, швидке відновлення та повторне використання матеріалу [8].

Біо-орієнтовані наноматеріали, зокрема на основі хітозану та біовуглецю, демонструють підвищену адсорбційну здатність завдяки сильним електростатичним взаємодіям, що робить їх ефективними для видалення арсену як із водних розчинів, так і з осадів. Останні досягнення в галузі ремедіації арсену привернули значну увагу саме до цих матеріалів [7].

Окрім високої хімічної та екологічної стійкості, біо-орієнтовані наноматеріали характеризуються швидкою кінетикою адсорбції та винятково високою ефективністю видалення забруднювачів. Одним із ключових факторів, що визначають їх продуктивність, є розмір частинок. Дослідження показують, що частинки зі співвідношенням площі поверхні до об'єму менше 30 нм проявляють значно вищу хімічну реакційну здатність, а також суперпарамагнітні властивості [9].

Реакційна здатність наноматеріалів також посилюється завдяки квантовим розмірним ефектам, які змінюють електронну структуру речовини на нанорівні. Завдяки цим властивостям біо-орієнтовані наноматеріали забезпечують швидшу кінетику та ефективніше видалення арсену, відкриваючи нові можливості для сталої екологічної ремедіації.

Біо-орієнтовані наноматеріали стали однією з найперспективніших категорій адсорбентів завдяки своїй біорозкладності, екологічній безпеці та здатності брати участь у різноманітних механізмах видалення забруднювачів, зокрема адсорбції, окисненні, електростатичних взаємодіях та поверхневій комплексоутворюючій взаємодії [10].

Таким чином, біо-орієнтовані наноматеріали є перспективною та екологічно обґрунтованою альтернативою традиційним методам очищення води від арсену. Незважаючи на існуючі виклики щодо стабільності, селективності, регенерації та масштабування, подальший розвиток гібридних систем, удосконалення поверхневої функціоналізації та створення «зелених» методів регенерації дозволять реалізувати їхній повний потенціал. Інтеграція інноваційних нанотехнологій із принципами сталого розвитку відкриває шлях до ефективних, безпечних і доступних рішень для забезпечення якісної питної води в регіонах, найбільш уражених арсеновим забрудненням.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sharma V., Sohn M., Aquatic arsenic: Toxicity, speciation, transformations, and remediation. - Env. Int. - 2009. - № 35. - P. 743-759

2. Al-Abed S., Jegadeesan G., Purandare J., Allen D., Arsenic release from iron rich mineral processing waste: Influence of ph and redox potential. - Chemosphere - 2007. - № 66. - 775-782
3. Chakraborty, R.; Asthana, A.; Singh, A.K.; Jain, B.; Susan, A.B.H. Adsorption of heavy metal ions by various low-cost adsorbents: A review. Int. J. Environ. Anal. Chem. 2022, 102, P. 342-379 . DOI: <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1722811>
4. Gokcek, O.B.; Uzal, N. Arsenic Removal by the Micellar-Enhanced Ultrafiltration Using Response Surface Methodology. Water Supply 2020, 20, 574-585. DOI: <https://doi.org/10.2166/ws.2019.188>
5. Kolya, H.; Kang, C.-W. Bio-based polymeric flocculants and adsorbents for wastewater treatment. Sustainability 2023, 15, P. 9844. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15129844>
6. Burbano, A.A.; Lassalle, V.L.; Horst, M.F.; Méndez, A. The Effect of Carbon Coating on the Arsenite Sorption by Magnetic Carbon Nanocomposites. Int. J. Environ. Sci. Technol. 2025, 22, 4749 - 4760. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05924-x>
7. Feng, W.Y.; Wei, S.D.; Liu, C.B.; Chen, T.; Tang, Y.H.; Ma, J.H.; Yin, K.; Luo, S.L. Efficient removal of arsenic from groundwater using iron oxide nanoneedle array-decorated biochar fibers with high Fe utilization and fast adsorption kinetics. J. Hazard. Mater. 2019, 373, P. 141–151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.03.042>
8. Shaumbwa, V.R.; Liu, D.; Archer, B.; Li, J.; Su, F. Preparation and Application of Magnetic Chitosan in Environmental Remediation and Other Fields: A Review. J. Appl. Polym. Sci. 2021, 138, 51241. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.51241>
9. Chaturvedi, S.; Dave, P.N. Water Purification Using Nanotechnology: An Emerging Opportunity. Chem. Methodol. 2019, 3, 115–144 DOI: <https://doi.org/10.22034/chemm.2018.143461.1069>
10. Yamen, R.; Bashir, H.; Bibi, I.; Shaheen, S.M.; Niazi, N.K.; Shahid, M.; Hussain, M.M.; Antoniadis, V.; Shakoor, M.B.; Al-Solaimani, S.G.; et al. A critical review on arsenic removal from water using biochar-based sorbents: The significance of modification and redox reactions. Chem. Eng. J. 2020, 396, 125195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125195>

ЖИТТЄСТІЙКІСТЬ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ В КОНЦЕПЦІЇ GREEN CONSTRUCTION

Інга Уряднікова

*Київський національний університет будівництва і архітектури,
ingavictory@gmail.com*

У сучасних умовах зростання воєнно-техногенних загроз традиційні

методи забезпечення надійності систем водопостачання як об'єктів критичної інфраструктури, що базуються на принципах екстенсивного дублювання компонентів і створення статичних резервних потужностей відповідно до положень ДСТУ 2860-94 [1], поступово вичерпують свою ефективність.

Такі підходи були результативними в умовах стабільного функціонування систем водопостачання та орієнтовані на попередження типових технічних відмов, однак виявляються недостатніми в умовах цілеспрямованих деструктивних впливів, що супроводжуються високим рівнем невизначеності та динамічності

Просте нарощування кількості резервних елементів не гарантує підвищення рівня системної безпеки, оскільки зовнішні впливи можуть одночасно виводити з ладу як основні, так і резервні компоненти, а обмеженість ресурсів ускладнює подальший розвиток систем водопостачання шляхом їх надлишковості.

У зв'язку з цим обґрунтованою є необхідність переходу від класичної теорії надійності до концепції життєстійкості систем водопостачання, у межах якої технічні системи розглядаються як динамічні структури, здатні до адаптації, реконфігурації та відновлення після дії дестабілізуючих факторів.

Концепція життєстійкості орієнтована на забезпечення виконання цільових функцій систем водопостачання навіть за умов їх часткової деградації, що є критично важливим для функціонування інфраструктури в умовах воєнної нестабільності.

Для реалізації зазначеного підходу доцільним є використання комплексу науково-методичних інструментів.

1. Математичне моделювання на основі нечіткої логіки виступає ефективним інструментом підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності. Застосування нечіткої логіки зумовлене обмеженістю або відсутністю достовірних статистичних даних щодо стану систем у кризових умовах. Використання нечітких множин дозволяє формалізувати експертні оцінки та якісні характеристики у вигляді кількісних параметрів. Основними перевагами цього підходу є: формалізація невизначеності через використання лінгвістичних змінних; можливість багатокритеріального аналізу з урахуванням технічних, екологічних та безпекових факторів відповідно до принципів управління ризиками за стандартом ISO 31000 [2]; забезпечення інтелектуальної діагностики та прогнозування потенційних відмов.

2. Методологія оцінювання коефіцієнта технологічної адаптивності (K_{at}) є ключовим елементом аналізу життєстійкості. Даний показник відображає здатність системи до оперативної зміни режимів функціонування з метою збереження працездатності в умовах деструктивного впливу. На відміну від статичних показників надійності,

коефіцієнт K_{at} характеризує динамічну гнучкість технологічних процесів. Його використання передбачає: аналіз функціональної гнучкості систем; оцінювання часу реконфігурації; визначення рівня ресурсної автономності; прогнозування ймовірності каскадних відмов. Впровадження цього показника дозволяє кількісно оцінити здатність систем до адаптації та визначити оптимальні сценарії їх функціонування.

3. Локалізація каскадних ефектів шляхом створення автономних сегментів інфраструктури є важливим напрямом підвищення життєстійкості. В умовах деструктивних впливів відмова одного елемента може спричинити лавиноподібне поширення порушень. Застосування принципів «зеленого будівництва» сприяє формуванню децентралізованих, енергоефективних та автономних систем. Основними заходами є: створення локальних енергетичних і водних кластерів; сегментація мереж із використанням інтелектуальних систем управління; зниження жорсткої залежності між інфраструктурними секторами. Це дозволяє локалізувати аварійні процеси та забезпечити функціонування неушкоджених елементів системи.

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що традиційні підходи до забезпечення надійності в умовах воєнно-техногенної нестабільності є недостатніми. Перехід до парадигми життєстійкості передбачає використання інтегрованих методів управління, що поєднують математичне моделювання, оцінку адаптивності та структурну трансформацію інфраструктури.

Запропонований підхід формує науково-методичну основу для відновлення критичної інфраструктури за принципами «Build Back Better» [3] та впровадження концепції екологічно орієнтованого розвитку у межах «Green Construction».

ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. – Київ : Держстандарт України, 1994. – Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=54021 (дата звернення: 05.05.2026).
2. ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.iso.org/standard/65694.html> (дата звернення: 05.05.2026).
3. Hallegatte S., Rentschler J., Walsh B. Building Back Better: Achieving resilience through stronger, faster, and more inclusive post-disaster reconstruction [Electronic resource]. – Washington, DC: World Bank, 2018. – 224 p. – Mode of access: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/29867> (дата звернення: 05.05.2026). – DOI: 10.1596/29867.

ЕКОБРУТАЛІЗМ ЯК НАПРЯМ ЗЕЛЕНОГО БУДІВНИЦТВА: ПОЄДНАННЯ АРХІТЕКТУРНОЇ СПАДЩИНИ ТА СУЧАСНИХ ЕКОЛОГІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Леся Василенко¹, Станіслав Федоренко¹, Віктор Ліпатов¹

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
vasylenko.lo@knuba.edu.ua , fedorenko.sv@knuba.edu.ua, lipatov_vv-
2022@knuba.edu.ua*

Вступ. У сучасних умовах розвитку міст питання екологічної безпеки будівель та раціонального використання ресурсів набувають особливої актуальності. Урбанізоване середовище характеризується підвищеним рівнем шумового та повітряного забруднення, ефектом «міського острова тепла», значним енергоспоживанням будівель і скороченням площі зелених насаджень. У зв'язку з цим концепція зеленого будівництва розглядається як один із ключових напрямів забезпечення сталого розвитку територій.

Зелене будівництво передбачає застосування енергоефективних технологій, використання екологічно безпечних матеріалів, інтеграцію природних елементів у структуру будівель та зменшення негативного впливу на довкілля протягом усього життєвого циклу споруди. Одним із сучасних архітектурних підходів, що поєднує принципи сталого розвитку з переосмисленням архітектурної спадщини ХХ століття, є екобруталізм.

Екобруталізм виник як трансформація стилю бруталізму, що сформувався у середині ХХ століття і характеризувався використанням масивних бетонних конструкцій, відкритої фактури матеріалів та підкресленої конструктивної виразності. У сучасних умовах ці принципи доповнюються впровадженням енергоефективних систем, відновлюваних джерел енергії та біофільних елементів, що дозволяє розглядати екобруталізм як один із перспективних напрямів зеленого будівництва.

Принципи екобруталізму у системі зеленого будівництва

Однією з основних особливостей екобруталізму є поєднання масивних конструкційних матеріалів із сучасними екологічними технологіями. Використання бетону та сталі не суперечить принципам сталого розвитку за умови застосування матеріалів зі зниженим вуглецевим слідом, повторного використання конструкцій та впровадження технологій енергоощадності.

Сучасні стандарти зеленого будівництва передбачають оцінювання будівель за такими критеріями, як енергоефективність, вплив на довкілля, використання ресурсів та комфорт внутрішнього середовища. У міжнародній практиці широко застосовуються системи сертифікації LEED, BREEAM та DGNB, які враховують повний життєвий цикл будівлі. Впровадження принципів екобруталізму дозволяє забезпечити відповідність будівель цим вимогам шляхом інтеграції зелених дахів, вертикального озеленення, систем збору дощової води та використання

відновлюваних джерел енергії.

Важливим елементом екобруталізму є застосування пасивних архітектурних рішень. Масивні бетонні конструкції можуть виконувати функцію теплових акумуляторів, що сприяє стабілізації температурного режиму всередині будівлі та зменшенню витрат енергії на опалення і кондиціювання. Поєднання таких конструкцій із природною вентиляцією, сонцезахисними елементами та зеленими фасадами дозволяє значно підвищити енергоефективність будівель.

Інтеграція зелених конструкцій у бруталістську архітектуру

Одним із ключових напрямів розвитку екобруталізму є використання зелених конструкцій — зелених дахів, фасадного озеленення, внутрішніх атріумів із рослинністю та ландшафтних терас. Такі рішення виконують не лише декоративну функцію, а й сприяють покращенню мікроклімату, зниженню рівня шуму та очищенню повітря.

Вертикальне озеленення створює додатковий звуко- та теплоізоляційний шар, що особливо важливо в умовах щільної міської забудови. Зелені фасади можуть зменшувати рівень зовнішнього шуму, знижувати температуру поверхні стін та покращувати якість повітря за рахунок поглинання пилу і шкідливих речовин. Зелені дахи, у свою чергу, забезпечують затримання дощової води, зменшують навантаження на інженерні мережі та підвищують теплоізоляційні властивості покрівлі.

Поєднання важких матеріалів із живою рослинністю створює характерну естетику екобруталізму, у якій підкреслюється контраст між монументальністю конструкцій та природною пластикою зелених елементів. Такий підхід дозволяє формувати нову архітектурну ідентичність, що відповідає сучасним екологічним вимогам.

Перспективи застосування екобруталізму в Україні

Для України концепція екобруталізму є особливо актуальною, оскільки значна кількість будівель громадського та навчального призначення була зведена у другій половині ХХ століття. Багато з них мають високий потенціал для модернізації, але не відповідають сучасним вимогам енергоефективності та екологічності.

Замість знесення таких споруд доцільним є їх переосмислення шляхом реновації із застосуванням технологій утеплення, встановлення сонячних панелей, систем рекуперації тепла, зелених фасадів і дахів. Такий підхід відповідає принципам циркулярної економіки та дозволяє зменшити витрати матеріалів і енергії.

У світовій практиці вже існують приклади поєднання бруталістської архітектури з екологічними технологіями, де використання масивних конструкцій доповнюється вертикальним озелененням, терасами з рослинністю та інтегрованими системами відновлюваної енергії. Подібні рішення можуть бути адаптовані і для українських умов, особливо в процесі післявоєнної відбудови та модернізації міської інфраструктури.

Висновки. Екобруталізм можна розглядати як перспективний напрям зеленого будівництва, що поєднує збереження архітектурної спадщини з впровадженням сучасних екологічних технологій. Використання масивних конструкцій у поєднанні з зеленими фасадами, енергоефективними системами та відновлюваними джерелами енергії дозволяє створювати будівлі з високим рівнем екологічної та енергетичної ефективності.

Застосування принципів екобруталізму є особливо актуальним для України, де існує значний фонд будівель другої половини ХХ століття, що потребують модернізації. Їх адаптація до сучасних вимог зеленого будівництва дозволить зберегти архітектурну спадщину, підвищити комфорт міського середовища та зменшити негативний вплив на довкілля.

Таким чином, екобруталізм може стати важливим напрямом розвитку архітектури в умовах переходу до сталого та енергоефективного будівництва, а також одним із перспективних підходів у процесі відбудови та модернізації українських міст.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція будівель. – Київ: Мінрегіон України, 2021. – 115 с.
2. ДБН В.2.2-9:2018. Громадські будівлі та споруди. – Київ: Мінрегіон України, 2018. – 258 с.
3. LEED v4 for Building Design and Construction. – Washington, DC: U.S. Green Building Council, 2014. – 210 p.
4. BREEAM International New Construction 2016. Technical Manual. – Watford : BRE Global, 2016. – 352 p.
5. DGNB System : Criteria for Environmental Quality. – Stuttgart: German Sustainable Building Council, 2020. – 148 p.
6. Foster J. The Ecology of Architecture: Green Design in the Age of Climate Change. – London : Routledge, 2019. – 286 p.
7. Mostafavi M., Doherty G. Ecological Urbanism. – Zurich: Lars Müller Publishers, 2016. – 656 p.
8. Bosco Verticale / Stefano Boeri Architetti. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.stefanoboeriarchitetti.net/en/project/bosco-verticale/> (дата звернення: 03.10.2025).
9. MVRDV Architects. Green projects. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mvrdv.nl> (дата звернення: 03.10.2025).
10. United Nations. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. – New York: UN, 2015. – 41 p.
11. Фоменко О. О., Чечельницький С. Г. Коефіцієнт екологічного сліду архітектури як фактор формування національних зелених стандартів // Український журнал будівництва та архітектури. – 2023. – № 5. – С. 110–110. – Режим доступу: <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/11642>

12. Щемелев М. В., Белоусова П. В., Гаджівердієв А. А. Екологічно чисті матеріали в будівництві // Науковий вісник будівництва. – 2024. – № 111. – С. 180–186. – Режим доступу: <https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/en/article/view/1808>

13. Pavilion 13 is a brutalist architecture landmark, reborn as a 21st-century Ukrainian cultural hub. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.wallpaper.com/architecture/pavilion-13-forma-kyiv-ukraine> (дата звернення: 03.10.2025).

14. New green lighthouse project: Ukrainian multi-family building equipped with geothermal and solar energy. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.greenpeace.org/ukraine/en/news/3208/new-green-lighthouse-project-ukrainian-multi-family-building-equipped-with-geothermal-and-solar-energy/> (дата звернення: 26/03/2026).

КОМПЛЕКСНЕ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ ДЛЯ ПЕРСОНАЛУ ІТ-ІНФРАСТРУКТУРИ: ПСИХОЕМОЦІЙНА БЕЗПЕКА ТА ПРИНЦИПИ ЗЕЛЕНОГО БУДІВНИЦТВА В УМОВАХ РОЗВИТКУ ДАТА-ЦЕНТРІВ

Євгеній Шайдюк

*Київський національний університет будівництва і архітектури,
shaidiuk_ys@knuba.edu.ua*

За даними спеціальної доповіді Міжнародного енергетичного агентства “Energy and AI” (2025), у 2024 році дата-центри споживали 415 ТВт’год електроенергії у глобальному масштабі. За базовим прогнозом МЕА, до 2030 року цей показник зросте до 945 ТВт’год, а до 2035 — перевищить 1 200 ТВт’год, що більш ніж утричі перевищує поточний рівень. Ключовим драйвером зростання є розгортання інфраструктури для задач штучного інтелекту (ШІ): споживання акселерованих серверів для ШІ прогнозується зростання на 30% щорічно, тоді як конвенційні сервери — лише на 9% на рік. Це зростання зумовило не лише рекордну активність будівництва нових дата-центрів в Україні та Європі, а й суттєве розширення штату персоналу, що обслуговує цю інфраструктуру. Разом з тим, умови праці у серверних і промислових ІТ-приміщеннях лишаються значною мірою поза увагою наукових досліджень у сфері охорони праці. Відмінністю сучасного дата-центру є поєднання у єдиному виробничому середовищі кількох категорій шкідливих чинників одночасно: теплового (перепади температури між “гарячими” і “холодними” коридорами), акустичного (безперервне навантаження від систем охолодження), електромагнітного, хімічного (під час технічного обслуговування) та психосоціального. Саме цей комплексний профіль ризику не може бути адекватно описаний у межах традиційних одиничних підходів до оцінки умов праці.

Аналіз зарубіжних матеріалів з охорони праці у дата-центрах [1] виявляє системний характер порушень: відсутність базового оцінювання шумового навантаження, недостатня оцінка теплового стресу в зонах обслуговування серверного обладнання, неврегульовані ергономічні умови для технічного персоналу. У Великобританії діють Control of Noise at Work Regulations 2005, що імплементують відповідну Директиву ЄС, однак у дата-центрах ці вимоги систематично недотримуються. Паралельно, доповідь EU-OSHA [2] фіксує принципово нові категорії психосоціальних ризиків, пов'язаних із цифровізацією та впровадженням ШІ-систем: когнітивне перевантаження, посилений алгоритмічний контроль, страх технологічного заміщення, розмивання меж між робочим і позаробочим часом. В умовах дата-центрів ці ризики додатково посилюються через цілодобовий режим роботи, ізольованість виробничих приміщень і підвищену відповідальність за безперебійність критичної інфраструктури.

Вагомим, але недостатньо дослідженим аспектом є прямий зв'язок між ергономічною якістю робочого місця та психоемоційним станом ІТ-фахівців. За даними EU-OSHA [3], скелетно-м'язові розлади в умовах цифрового виробничого середовища мають виражену психосоціальну складову: вимушена статична поза поєднується з інформаційним навантаженням, часовим тиском і знеособленим контролем через цифрові системи. Таке поєднання чинників типове для персоналу дата-центрів і зумовлює підвищений ризик емоційного вигорання. Дослідження Zhao et al. (2025) [4] підтвердило, що якість просторового середовища прямо корелює з психологічним благополуччям офісних працівників: виробничі простори без природних елементів, позбавлені ергономічних рішень, є самотійним чинником психоемоційного виснаження. Зважаючи на те, що дата-центри зазвичай є закритими будівлями без природного освітлення та озеленення, ця залежність набуває особливої практичної значущості для охорони праці.

Відповіддю на описані виклики в сучасній зарубіжній науці є концепція біофільного дизайну виробничих просторів. Систематичний огляд 74 рецензованих публікацій [5] підтвердив, що інтеграція природних елементів у робоче середовище забезпечує вимірювані психологічні, фізіологічні та когнітивні переваги для працівників. Дослідження Zhang et al. (2024) [6], виконане із застосуванням функціональної ближньоінфрачервоної спектроскопії (fNIRS), встановило, що комбінований біофільний вплив, а саме живе рослинне озеленення у поєднанні з природним освітленням, достовірно відновлює когнітивну продуктивність після стрес-індукованої ментальної втоми. Панельне дослідження Valor et al. (2024) [7], виконане на вибірці 636 офісних працівників у режимі двохвильового дизайну, показало, що природна стимуляція підвищує загальне і трудове благополуччя через механізм вігорності (vigor), незалежно від галузі чи типу офісного простору. Gonçalves et al. (2023) [8], систематизуючи 16 кількісних досліджень, зафіксували статистично значущий позитивний ефект природних просторів

у всіх розглянутих роботах. Зазначені результати свідчать, що організація рекреаційних зон з живими зеленими насадженнями, природним освітленням та акустичним комфортом може стати дієвим засобом відновлення психоемоційного ресурсу персоналу ІТ-об'єктів. Принципи LEED, BREEAM та WELL вже містять критерії якості внутрішнього середовища, однак психоемоційна безпека персоналу дата-центрів і серверних приміщень досі не виокремлена в них як самостійний пріоритет.

На основі проведеного аналізу сформульовано рекомендації для роботодавців ІТ-галузі:

1. При проектуванні та сертифікації ІТ-об'єктів за стандартами LEED, BREEAM або WELL виокремити психоемоційну безпеку персоналу як самостійний критерій оцінювання умов праці у серверних і промислових приміщеннях.

2. Включити до планувальних рішень дата-центрів обов'язкові рекреаційні зони з елементами біофільного дизайну: живим озелененням, природним або якісним штучним освітленням, акустичним комфортом.

3. Запровадити програми психологічної підтримки, що враховують специфічний профіль ризику персоналу дата-центрів: хронічний стрес, когнітивне перевантаження, підвищену відповідальність і ризик вигорання за умов цілодобових режимів роботи.

4. Забезпечити ергономічний супровід на всіх рівнях ІТ-інфраструктури, включно з зонами технічного обслуговування серверного обладнання, де фізичне навантаження поєднується з психосоціальним.

Висновки. Сучасний дата-центр, особливо орієнтований на ІІІ-навантаження, формує принципово новий виробничий контекст, у якому ризики для здоров'я персоналу мають комплексний характер і охоплюють фізичні, ергономічні та психосоціальні виміри. Психоемоційна безпека стає самостійним пріоритетом охорони праці, а її ефективне забезпечення вимагає системної інтеграції принципів зеленого будівництва і біофільного дизайну в модель управління ризиками. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку нормативних критеріїв оцінювання умов праці у приміщеннях ІТ-інфраструктури та верифікацію ефективності біофільних рішень у промислових будівлях відповідного типу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Antea Group. Top 5 Health and Safety Findings from Data Center Audits. 2023. URL: <https://us.anteagroup.com/news-events/blog/top-5-health-and-safety-findings-from-data-center-audits>

2. EU-OSHA. Digital technologies at work and psychosocial risks: evidence and implications for occupational safety and health. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024. URL: https://osha.europa.eu/sites/default/files/documents/Digitalisation-and-PSR_EN.pdf

3. EU-OSHA. Musculoskeletal disorders: association with psychosocial risk factors at work. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021. URL: https://osha.europa.eu/sites/default/files/2021-11/MSDs_association_pshychosocial_risks_factors_at_work_executive_summary.pdf
4. Zhao M., Jiao D., Tang J. Research on the impact of biophilic office space environments on employee health promotion. Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation. 2025. DOI: 10.1177/10519815251345816
5. Investigating restorative effects of biophilic design in workplaces: a systematic review. Intelligent Buildings International. 2024. DOI: 10.1080/17508975.2024.2306273
6. Zhang P., Yu Z., Hou G. et al. Enhancing Cognitive Performance and Physiological Benefit in Workspaces Through Patterns of Biophilic Design: A Restorative Approach. Buildings. 2024. Vol. 14. P. 3293. DOI: 10.3390/buildings14103293
7. Valor C., Redondo R., Carrero I. Explaining the influence of biophilic design on employee well-being. Scientific Reports. 2024. Vol. 14. 32090. DOI: 10.1038/s41598-024-83791-9
8. Gonçalves G., Sousa C., Fernandes M.J., Almeida N. Restorative Effects of Biophilic Workplace and Nature Exposure during Working Time: A Systematic Review. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2023. Vol. 20(21). P. 6986. DOI: 10.3390/ijerph20216986
9. IEA. Energy and AI. Paris: International Energy Agency, 2025. URL: <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>

РЕЦИКЛІНГ БУДІВЕЛЬНИХ ВІДХОДІВ І ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В СУЧАСНИХ АРХІТЕКТУРНИХ РІШЕННЯХ

Марія Шинкарчук¹, Антоніна Савченко¹

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, shynkarchuk_mi-2022@knuba.edu.ua, savchenko.am@knuba.edu.ua

Актуальність даної теми полягає у змінні ставлення до екологічного відновлення та економічної вигоди. Колосальні обсяги будівельного сміття, утвореного внаслідок бойових дій та руйнувань, вимагають негайного переходу до принципів циркулярної економіки [1, 3]. Ця концепція передбачає, що необхідні для будівництва матеріали, вже знаходяться на будівельному майданчику або в мінімальному радіусі від нього.

Ключовою умовою ефективного застосування вторинних ресурсів є докірна зміна технології поводження з об'єктом наприкінці його життєвого циклу. Запропоновано перехід від лінійної до циркулярної економіки, що неможливе без заміни традиційного знесення на метод селективного

демонтажу. Цей підхід дозволяє уникнути критичного пошкодження елементів та їхнього змішування з токсичними речовинами, такі як – азбест, залишки бітуму, синтетичний утеплювач. Данний процес включає такі етапи як - попередній аудит та паспортизація, цифровізація ресурсів, сортування та первинна обробка. До початку фізичних робіт проводиться оцінка об'єкта. На цьому етапі визначається, які елементи можна зберегти цілими, а які підлягають глибокій переробці. Для точного розрахунку обсягів вторинної сировини сьогодні активно застосовуються інструменти інформаційного моделювання будівель (BIM-технології), що дозволяє робітникам розраховувати матеріали ще на стадії концептуального проектування.

Рециклінг - операція з відновлення, у результаті якої відходи переробляються у продукцію, матеріали або речовини для їх використання за первинною або іншою метою. Ця операція включає перероблення органічного матеріалу, але не включає виробництва енергії чи перетворення відходів у матеріали, що можуть бути використані як паливо або як матеріали для зворотного заповнення [6]. Технологічний процес переробки відходів відбувається за допомогою мобільних дробильно-сортувальних комплексів на будівельному майданчику. Процес переробки включає первинне оздоблення, магнітну сепарацію та просіювання через систему вібрацій. Отриманий вторинний щебінь стає повноцінною сировиною. Цей матеріал можна використовувати для влаштування підстиляючих шарів фундаментів, створення тимчасових під'здних шляхів чи для виробництва циркулярного бетону. Особливої уваги заслуговує інтеграція рециклінгованих матеріалів із технологіями екологічного будівництва (Low-Impact). Наприклад, поєднання вторинного цегляного бою або бетонного щебеню з місцевими природними в'язучими речовинами (глиною, вапном) дозволяє створювати масивні теплоємні огорожувальні конструкції за принципом осучасненого саману або трамбованої землі. Непошкоджені дерев'яні конструкції (балки, крокви) після антисептичної обробки можуть слугувати елементами каркаса або вентильованих фасадів, а бите скло переплавляється на енергоефективне піноскло, що є чудовим утеплювачем [4].

Практичну життєздатність та естетичний потенціал рециклінгу підтверджує передовий європейський досвід. Проєкт Resource Rows (Копенгаген, Данія) [5]. Для створення фасадів нового багатоквартирного житлового комплексу були використані цегляні стіни демонтованих історичних броварень. Оскільки старий цементний розчин був занадто міцним для поштучного розбирання цегли, інженери ухвалили рішення вирізати стіни цілими блоками (квадратами) розміром 1х1 метр. Ці модулі були вмонтовані у нові сталеві каркаси, створивши неповторний патерн фасаду, що поєднав сучасну геометрію з історичною фактурою, при цьому значно знизивши вуглецевий слід будівництва. Проєкт Super Circular Estate

(Керкраде, Нідерланди) є показовим прикладом масштабування циркулярних процесів в урбанізованому середовищі. З матеріалів повністю розібраної 10-поверхової панельної будівлі 1960-х років на тому ж самому місці було зведено комплекс нових сучасних таунхаусів. Проєкт довів можливість забезпечення майже 100% замкненого циклу матеріалів у житловому будівництві на рівні міського кварталу. Японський проєкт Kamikatz Public House - головною архітектурною та інженерною домінантою будівлі є 8-метровий світлопрозорий фасад. Замість використання нових склопакетів, конструкція була повністю зібрана з кількох сотень старих дерев'яних вікон різного формату, демонтованих із покинутих будинків та шкіл у радіусі містечка. Принцип тотального апсайклінгу був застосований і у внутрішньому просторі об'єкта. Для облицювання підлоги використовувалася відновлена керамічна плитка зі зруйнованої місцевої фабрики, меблювання було зібрано з відбракованих предметів інтер'єру, а системи освітлення (люстри) сконструйовані з порожніх скляних пляшок. Зовнішнє облицювання глухих стін виконане з некондиційних дощок із додаванням натуральних барвників природного походження (екстракту хурми).

Впровадження принципів рециклінгу будівельних відходів має комплексний ефект. Економічно це забезпечує суттєве зниження логістичних витрат та зменшення залежності від видобутку нових копалин. В екологічному вимірі — кардинально знижує викиди CO₂ та розв'язує проблему переповнення сміттєвих полігонів. Проте для масового переходу до такої моделі в Україні необхідна адаптація державних будівельних норм (ДБН) для стандартизації вторинної сировини. Новий рівень розвитку архітектури вимагає зміни самої філософії проєктування. Сучасна будівля має бути не лише енергоефективною під час експлуатації, але й спроектованою за принципом готовності до майбутнього демонтажу, де ще на стадії концепції закладено розрахунок подальшого життєвого циклу кожного матеріалу. Саме такий підхід дозволить перетворити наслідки руйнувань на ресурсну базу для створення сталої архітектури.

ЛІТЕРАТУРА

1. Рециклінг будівельних відходів під час війни в Україні. N Antoniuk, V KostiukAktual'ni Problemy Ekonomiky= Actual Problems in Economics, 130-142
2. Рециклінг будівельних відходів / Е. А. Шишкін, Ю. І. Гайко, К. І. Вяткін, А. О. Чала. Містобудування та територіальне планування. 2018. Вип. 66. С. 654-665. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/МТР_2018_66_77
3. Уваров П. Є., Татарченко Г. О., Шпарбер М. Є. Сучасні проблеми рециклінгу вторинних будівельних ресурсів. Наукові вісті Давіського університету. 2019. № 16. URI <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/2131>

4. Оптимізація демонтажу та повторного використання будівельних матеріалів у рамках циркулярної економіки / Н. М. Левченко, М. Д. Помазан, М. В. Чечель та ін. // Український журнал будівництва та архітектури. – 2025. – № 5. – С. 73-81

5. Resource Rows. Назва з сайту. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://eumiesawards.com/heritageobject/the-resource-rows/> (дата звернення: 25.04.2026)

6. Про управління відходами. Закон України № 2320-IX від 20.06.2022. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>

ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ АКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕЛЕНОГО ФАСАДУ НА ОСНОВІ *PARTHENOCISSUS QUINQUEFOLIA*

Костянтин Шумбар

*Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,
k.w.shumbar@gmail.com*

Зростання шумового забруднення в умовах щільної міської забудови зумовлює необхідність пошуку ефективних рішень для акустичного захисту будівель. Одним із перспективних підходів є застосування зелених фасадів, які здатні знижувати рівень звукового тиску за рахунок поглинання, розсіювання та дифракції звукових хвиль у неоднорідному рослинному середовищі. Водночас натурні експерименти є трудомісткими та обмеженими за варіативністю умов, що актуалізує використання числового моделювання [1].

Аналіз сучасних досліджень [2, 3] показує, що акустична ефективність зелених фасадів значною мірою залежить від морфологічних характеристик рослинності (густота, структура, розмір листя) та проявляється переважно у середньо- і високочастотному діапазонах. Попри наявність експериментальних і оглядових робіт, питання формалізованого числового опису акустичної поведінки таких систем, зокрема з використанням рослин виду *Parthenocissus quinquefolia*, залишається недостатньо дослідженим. Відсутність уніфікованих підходів до параметризації рослинного шару ускладнює прогнозування ефективності зелених фасадів у різних умовах.

Крім того, сучасні підходи до проєктування будівель дедалі частіше орієнтуються на принципи сталого розвитку, що передбачають інтегрування природних компонентів у конструктивні системи. У цьому контексті зелені фасади розглядаються не лише як архітектурно-екологічний елемент, але й як функціональний засіб підвищення акустичного комфорту міського середовища. Проте відсутність узгоджених методик оцінювання їх шумозахисної ефективності та обмеженість даних щодо впливу сезонних змін і фізичних параметрів рослинності зумовлюють необхідність

подальших досліджень із застосуванням числового моделювання, що дозволяє системно враховувати складну структуру рослинного шару та прогнозувати його акустичні властивості [3, 4, 5].

Метою роботи є розроблення числової моделі для оцінювання акустичного імпедансу та коефіцієнта звукопоглинання зеленого фасаду на основі рослин виду *Parthenocissus quinquefolia* з урахуванням фізико-геометричних параметрів рослинного шару.

Наукова новизна полягає в адаптації моделі Делані–Базлі для опису листяного покриву зеленого фасаду та встановленні кількісної залежності коефіцієнта звукопоглинання від товщини рослинного шару.

Для оцінки акустичної ефективності зеленого фасаду з *Parthenocissus quinquefolia* виконано числове моделювання поширення звуку в пористому середовищі на основі модифікованої моделі Делані–Базлі [6, 7]. Розрахунки проведено в частотному діапазоні 125–2000 Гц із варіюванням товщини рослинного шару (0,1–0,3 м) та питомого акустичного опору (10 000–20 000 Па·с/м²).

Коефіцієнт звукопоглинання визначався через акустичний імпеданс за формулою (1):

$$\alpha(f) = 1 - \left| \frac{Z(f) - Z_0}{Z(f) + Z_0} \right|^2, \quad Z_0 = \rho_0 \cdot c \quad (1)$$

Імпеданс шару обчислювався за моделлю Делані–Базлі, що описано рівнянням (2):

$$Z(f) = Z_0 \cdot \left(1 + 0.0571 \cdot \left(\frac{\rho f}{\sigma} \right) - i \cdot 0.087 \cdot \left(\frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.732} \right)^{-0.754} \quad (2)$$

де f — частота (Гц), σ — питомий акустичний опір (Па·с/м²), i — уявна одиниця. Ця формула дозволяє врахувати частотну залежність імпедансу і адекватно моделювати акустичні властивості листяного та гіллястого покриву фасаду.

Результати моделювання показали, що збільшення товщини рослинного шару та питомого акустичного опору призводить до зростання коефіцієнта звукопоглинання, особливо у середньо- та високочастотному діапазонах. Для шару товщиною 0,3 м значення $\alpha(f)$ перевищує 0,9 при частотах понад 1000 Гц, тоді як у низькочастотному діапазоні (до 500 Гц) становить 0,3–0,4. Виявлено резонансний ефект у діапазоні 1000–2500 Гц, пов'язаний із інтенсивними втратами енергії в пористій структурі.

Показано, що акустична ефективність визначається морфологією рослинного шару (густота, структура, товщина) та змінюється сезонно: у літній період ефект зростає за рахунок збільшення біомаси. Порівняння з експериментальними даними підтвердило узгодженість результатів (зниження шуму до 20 дБ у високочастотному діапазоні).

Отримані результати [8] підтверджують ефективність використання рослин виду *Parthenocissus quinquefolia* як природного звукопоглинального шару та доцільність застосування числового моделювання для

прогнозування акустичних характеристик зелених фасадів.

Додатковий аналіз показав, що ключову роль у формуванні акустичних властивостей відіграє не лише товщина шару, але й його внутрішня структура, яка визначає характер взаємодії звукової хвилі з пористим середовищем. Зокрема, збільшення щільності листя та складності просторової конфігурації рослинного покриву призводить до зростання ефективного шляху поширення звуку та інтенсифікації в'язких і теплових втрат. Це дозволяє розглядати зелений фасад як багатошарову акустично активну систему, параметри якої можуть бути цілеспрямовано оптимізовані на етапі проєктування.

Водночас застосована модель має певні обмеження, пов'язані з припущенням однорідності пористого середовища та спрощеним описом геометрії рослинного шару [1, 6, 9]. У реальних умовах акустичні характеристики можуть змінюватися під впливом вологості, напрямку поширення звуку, наявності повітряних зазорів і конструктивних особливостей фасаду. Це визначає необхідність подальших досліджень, спрямованих на вдосконалення моделей та поєднання числового моделювання з експериментальними вимірюваннями.

У результаті проведеного дослідження розроблено числову модель оцінювання акустичних характеристик зеленого фасаду на основі *Parthenocissus quinquefolia* з використанням модифікованої моделі Делані–Базлі. Отримані результати показали, що рослинний шар може ефективно знижувати рівень шуму, особливо у середньо- та високочастотному діапазонах.

Встановлено, що збільшення товщини рослинного шару та питомого акустичного опору є ключовими факторами підвищення коефіцієнта звукопоглинання: для шару товщиною 0,3 м значення $\alpha(f)$ перевищує 0,9 при частотах понад 1000 Гц, а зниження рівня шуму може досягати 20 дБ. У низькочастотному діапазоні ефективність залишається обмеженою, що узгоджується з теоретичними уявленнями про взаємодію довгохвильового звуку з пористими середовищами.

Показано, що акустична ефективність зеленого фасаду визначається не лише геометричними параметрами, але й морфологічними характеристиками рослинного покриву та їх сезонною мінливістю. Це підтверджує доцільність використання густого листяного покриву як природного звукопоглинального елемента у будівельних конструкціях.

Отримані результати узгоджуються з експериментальними даними та підтверджують перспективність застосування числового моделювання для прогнозування акустичних властивостей систем вертикального озеленення. Практична значущість роботи полягає у можливості використання зелених фасадів як елемента комплексного шумозахисту в умовах щільної міської забудови.

ЛІТЕРАТУРА

1. Tang V. T., Rene E. R., Hu L., Behera S. K., Phong N. T., Thi Da C. Vertical green walls for noise and temperature reduction – An experimental investigation. *Science and Technology for the Built Environment*, 2021. Vol. 27(7). P. 806–818. <https://doi.org/10.1080/23744731.2021.1911154>
2. Chen L., Huang L., Hua J., Chen Z., Wei L., Osman A. I., Fawzy S., Rooney D. W., Dong L., Yap P.-S. Green construction for low-carbon cities: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 2023. Vol. 21. P. 1627–1657. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01544-4>
3. Yan F., Shen J., Zhang W., Ye L., Lin X. A review of the application of green walls in the acoustic field. *Building Acoustics*, 2022. Vol. 29(4). P. 295–313. <https://doi.org/10.1177/1351010X221096789>
4. Adel T. K., Pirooznezhad L., Ravanshadnia M., Tajaddini A. Global policies on green building construction from 1990 to 2019: A scientometric study. *Journal of Green Building*, 2021. Vol. 16(4). P. 227–245. <https://doi.org/10.3992/jgb.16.4.227>
5. Fu R. Research on the application of green materials in the design of building facades. *Journal of Physics: Conference Series*, 2025. Vol. 3068. P. 012106. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3068/1/012106>
6. Delany M. E., Bazley E. N. Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics*, 1970. Vol. 3(2). P. 105–116. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(70\)90031-9](https://doi.org/10.1016/0003-682X(70)90031-9)
7. Teagle-Hernandez A., Ohtmer O., Nguyen D. Mathematical modeling of porous medium for sound absorption simulations II: Wave propagation and interface conditions. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 2019. Vol. 7. P. 2780–2795. <https://doi.org/10.4236/jamp.2019.711191>
8. Shumbar K., Tkachenko T. Acoustic efficiency of green facades: Evaluation of the impact of *Parthenocissus quinquefolia* on noise pollution reduction. *Esanr*, 2025. Vol. 55. P. 153–162. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.153-162>
9. Wong N. H., Tan A. Y. K., Tan P. Y., Chiang K., Wong N. C. Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment*, 2010. Vol. 45(2). P. 411–420. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.017>

ЧИСЕЛЬНІ РОЗРАХУНКИ ТОВЩИНИ БІОПЛІВКИ ПРИ ОЧИСТЦІ СТІЧНИХ ВОД В БІОРЕАКТОРАХ

Сергій Телима¹, Юрій Калугін¹

Інститут гідромеханіки НАН України, sertelyma@gmail.com

Формування постійної товщини біоплівки відбувається у значному часовому інтервалі. Якщо такі процеси, як дифузія субстрату та його

гідродинаміка відбуваються протягом декількох хвилин, то для досягнення стаціонарних умов при формуванні товщини біоплівки потрібно не менше кількох діб і, навіть, тижнів [1, 2, 5]. Таким чином, при розрахунках товщини біоплівки доцільно визначати час, коли настає стаціонарний режим її роботи в реакторі.

При моделюванні біоплівки процес закріплення мікроорганізмів опускається з розгляду так як приймаються умови про первинне відкладення біомаси на елементах пористої засипки. Крім того, розглядалась однорідна структура біоплівки без врахування її гетерогенності, що має місце в реальних умовах біоочистки. Математична модель біоплівки у даному випадку може бути представлена наступними рівняннями: рівнянням транспорту субстрату та його споживання всередині біоплівки [1, 5, 6]:

$$\frac{\partial L}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 L}{\partial x^2} - \frac{\mu_{\max} X_L}{Y} \frac{L}{K_{mL} + L}, \quad (1)$$

з граничними умовами

$$\text{при } x=0 \quad -D_L \frac{dL}{dx} = K_L (L_e - L), \quad (2)$$

$$\text{при } x=\delta \quad \frac{dL}{dx} = 0 \text{ і} \quad (3)$$

рівнянням, що описує зростання біоплівки

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\mu_{\max} X_L}{\rho_b} \int_0^\delta \frac{L}{K_{mL} + L} dx - r\delta. \quad (4)$$

тут L – концентрація субстрату всередині біоплівки, г/м³; $\mu_{\max}$ – питома максимальна швидкість росту мікроорганізмів в біоплівці; X_L – початкова концентрація біомаси в біоплівці, г/м³; Y – стехіометричний коефіцієнт приросту біомаси в біоплівці; K_{mL} – коефіцієнт напівнасичення, г/л. L_e – концентрація субстрату на виході із біоплівки, г/м³; D_L – коефіцієнт молекулярної дифузії в біоплівці, м²/год, r – інтенсивність відриву біомаси з поверхні біоплівки, 1/год; ρ – густина біоплівки.

Система рівнянь (1)– (4) вирішується з наступними початковими умовами:

$$L(0, x) = L_0, \quad \delta(0) = \delta_0. \quad (5)$$

Шуканими функціями є концентрація $L(x, t)$ та товщина біоплівки $\delta(t)$.

Для отримання розв'язку системи рівнянь (1)–(5) був використаний метод послідовної зміни стаціонарних станів, тобто, на кожний момент часу t при відповідній товщині плівки δ розподіл концентрацій $L(\delta)$ знаходиться шляхом розв'язання стаціонарних рівнянь транспорту субстрату та балансу біомаси.

Розглянемо рівняння зростання біоплівки [3,5]:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\mu_{\max} X_L}{\rho_b} \int_0^{\delta} \frac{L}{K_{mL} + L} dx - r\delta \quad (6)$$

де r – інтенсивність відриву субстрату від біоплівки.

Запишемо його з використанням декількох безрозмірних комплексів у вигляді (товщина плівки δ та час t залишаються розмірними):

$$\frac{d\delta}{dt} = \delta \lambda \int_0^1 \frac{\bar{L}(\bar{x}, \delta)}{\bar{K}_{mL} + \bar{L}(\bar{x}, \delta)} d\bar{x} - r\delta, \quad (6a)$$

$$\text{де } \bar{L} = \frac{L}{L_e}, \bar{K}_{mL} = \frac{K_{mL}}{L_e}, \bar{x} = \frac{x}{\delta}, \lambda = \frac{\mu_{\max} X_L}{\rho_b}. \quad (7)$$

Шукані функції розподілу концентрацій $\bar{L}(\delta)$ та $\bar{X}_L(\delta)$ знаходимо із вирішення стаціонарних рівнянь транспорту субстрату:

$$\frac{d^2 \bar{L}}{d\bar{x}^2} - \alpha \frac{\bar{L}}{\bar{K}_{mL} + \bar{L}} = 0, \quad (8)$$

з граничними умовами:

$$\text{при } \bar{x} = 0 \quad \frac{d\bar{L}}{d\bar{x}} = \beta(\bar{L} - 1),$$

$$\text{при } \bar{x} = 1 \quad \frac{d\bar{L}}{d\bar{x}} = 0,$$

та рівняння балансу біомаси:

$$\bar{X}_L = \gamma \frac{\bar{L}}{\bar{K}_{mL} + \bar{L}}, \quad (9)$$

перетворених з урахуванням нових змінних:

$$\alpha = \frac{\mu_{\max} X_L \delta^2}{Y D_L L_e}, \quad \beta = \frac{K_L \delta}{D_L}.$$

Очевидно, що при такому підході функції розподілу концентрацій $\bar{L}$ і $\bar{X}_L$ є також функціями (через параметри $\alpha = \frac{\mu_{\max} X_{L0} \delta^2}{Y D_L L_e}$ і $\beta = \frac{K_L \delta}{D_L}$) від товщини біоплівки, тобто, $\bar{L} = \bar{L}(\bar{x}, \delta)$ та $\bar{X}_L = \bar{X}_L(\bar{x}, \delta)$. Рішення рівняння (8) і (9) отримуємо за допомогою методу скінченних різниць.

Перепишемо рівняння для товщини біоплівки (6) у вигляді:

$$\frac{d\delta}{dt} = f(\delta), \quad (10)$$

$$\text{де } f(\delta) = \delta \left(\lambda \int_0^1 \frac{\bar{L}(\bar{x}, \delta)}{\bar{K}_{mL} + \bar{L}(\bar{x}, \delta)} d\bar{x} - r \right), \text{ а } \bar{L} = \bar{L}(\bar{x}, \delta) \text{ та } \bar{X}_L = \bar{X}_L(\bar{x}, \delta)$$

знайдемо із вирішення стаціонарних рівнянь транспорту субстрату (8) і (9). Чисельне рішення можна представити у наступному вигляді як:

$$\int_{\delta_0}^{\delta} \frac{d\delta}{f(\delta)} = t, \text{ а } \int_{\delta_0}^{\delta} \frac{\left(ch(\sqrt{\alpha}\delta) + \frac{\sqrt{\alpha}}{\beta} sh(\sqrt{\alpha}\delta) \right) d\delta}{\gamma \frac{\sqrt{\alpha}}{\beta} sh(\sqrt{\alpha}\delta) - (b + b_s) \left(ch(\sqrt{\alpha}\delta) + \frac{\sqrt{\alpha}}{\beta} sh(\sqrt{\alpha}\delta) \right) \delta} = t$$

де $\gamma = \frac{Y^2 K_L L_e}{X_L}$.

На рис.1,2 приведено графіки стаціонарної товщини біоплівки та часу її стабілізації в залежності від величини інтенсивності відриву біомаси від біоплівки r для різних значень коефіцієнту напівнасичення K_{mL} $\left(K_{mL} = 5, 10, 20 \frac{\text{г}}{\text{м}^3} \right)$ та при значенні концентрації субстрату в біоплівці $X_L = 20000 \text{ г/м}^3$. Решта вхідних даних, використаних при розрахунках, приведена в Таблиці 1.

Таблиця 1

$\mu_{\max} = 0.12 \text{ год}^{-1}$	$Y = 0.52 \frac{\text{г}}{\text{г}}$	$K_L = 0.08 \frac{\text{м}}{\text{год}}$	$L_0 = 30 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$
$\delta_0 = 0.000010 \text{ м}$	$D_L = 2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{год}}$	$L_e = 10 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$	$r = 0.02 \div 0.09 \frac{1}{\text{год}}$

Аналіз результатів чисельного моделювання процесу формування біоплівки при заданих вхідних даних показує, що по мірі збільшення швидкості відриву біомаси її стаціонарна товщина зменшується від 1300мкм до 250-350мкм. Згідно даних експериментальних досліджень стосовно впливу товщини біоплівки на ефективність роботи біореактора, вважається, що її товщина повинна бути в межах 250-400мкм і залежить також від концентрації в ній біомаси [2-5]. При заданих вхідних даних відносна стабілізація товщини біоплівки спостерігається наближено через 180-240 год при швидкостях відриву біомаси $r \geq 0.02 \text{ год}^{-1}$. Значення величини коефіцієнту напівнасичення впливають на процес формування стаціонарної товщини біоплівки в незначній мірі, так як і параметри, представлені в Таблиці 1, що вимагає додаткових досліджень та проведення імітаційного моделювання з широким вибором вхідних даних.

Виходячи із отриманих результатів чисельного моделювання, передбачається подальше проведення чисельних експериментів по уточненню критеріїв і оцінок основних параметрів, впливаючих на ефективність експлуатації очисних споруд з використанням біоплівкових технологій.

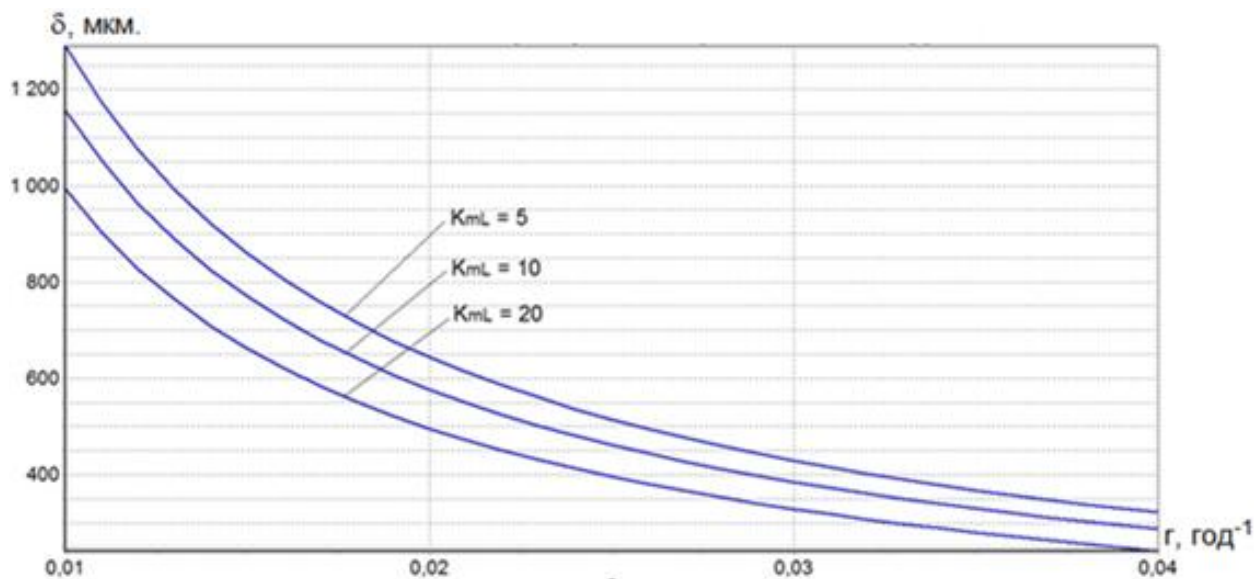


Рис.1. Графіки залежності стаціонарної товщини біоплівки від величини r

$$\text{при } X_L = 20000 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$$

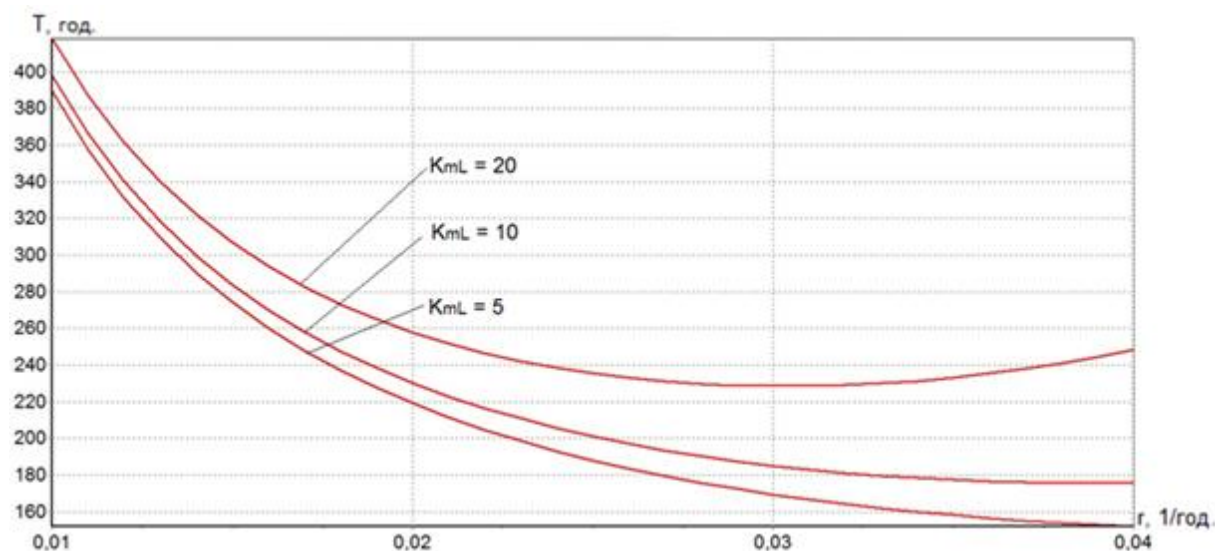


Рис.2. Графіки залежності часу стабілізації товщини біоплівки від

$$\text{величини } r \text{ при } X_L = 20000 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}.$$

ЛІТЕРАТУРА

1. Henze M., M van Loosdrecht M.E., Ekama G.A., Brdjanovic D. (2008). Biological Wastewater Treatment. IWA Publishing, London, 511p.
2. Moira Alvi et.al. (2023). Deep learning in wastewater treatment: a critical reviw. Water Research, vol.245.pp.1-15.
3. Boltz J., Morgenroth C., Dipankar S. (2010). Mathematical modeling of biofilms and biofilm reactors. Water Science and Technology, vol.62(8). pp.1821-1836.

4. Levandowsky Z., Beynal H. (2014). Fundamentals of biofilm research. CRC Press.157p.

5. Elenter D., Milferstedt K., Zhang W., Hausner M., Morgenroth E. (2007). Influence of detachment on substrate removal and microbial ecology in a heterotrophic / autotrophic biofilm. Water Res., 41. pp.4657-4671.

6. Телима С.В.(2025). Про формування структури закріпленого біоценозу біореакторах при очищенні стічних вод. Матеріали 1У Міжнародної науково-практичної конференції “Green Construction”.Київ, КНУБА,14-15 травня 2025.С.292-297.

УДОСКОНАЛЕННЯ НОРМАТИВНО-ПРАВОВОЇ БАЗИ РОЗВИТКУ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕРОБКИ ПВХ-ПРОФІЛІВ

Сергій Кожевніков

Київський національний університет будівництва і архітектури

²GEALAN Україна, e-mail: slondie7@gmail.com

У сучасних умовах розвитку будівельної галузі проблема ефективного поводження з полімерними відходами, зокрема відпрацьованими ПВХ-профілями, набуває критичного значення. Стрімке зростання обсягів виробництва віконних конструкцій, а також збільшення кількості демонтованих виробів у процесі реконструкції житлового фонду зумовлюють накопичення значних обсягів відходів, які часто не залучаються до повторного використання. В Україні система переробки ПВХ-відходів перебуває на стадії формування та характеризується низьким рівнем розвитку інфраструктури, відсутністю єдиних стандартів якості вторинної сировини та недосконалістю нормативно-правової бази. Це призводить до втрати значного ресурсного потенціалу та створює додаткове екологічне навантаження на довкілля.

Особливої актуальності проблема набуває в контексті євроінтеграційного курсу України та необхідності гармонізації національного законодавства з підходами ЄС у сфері циркулярної економіки. Європейська практика доводить, що рециклінг ПВХ-профілів може бути не лише екологічно доцільним, а й економічно вигідним за наявності чітких стандартів якості вторинної сировини, механізмів простежуваності матеріалів, ефективної інфраструктури збору та економічних стимулів для учасників ринку. Саме тому удосконалення нормативно-правової бази розвитку екологічно безпечних технологій переробки ПВХ-профілів є важливою передумовою підвищення ресурсної ефективності, зниження викидів парникових газів та скорочення залежності від імпорту первинної полімерної сировини [1].

Метою дослідження є наукове обґрунтування та розроблення

комплексних пропозицій щодо вдосконалення нормативно-правової бази розвитку екологічно безпечних технологій переробки ПВХ-профілів в Україні. Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання: проаналізувати сучасний стан законодавчого регулювання у сфері переробки ПВХ-відходів; дослідити європейські підходи до стандартизації вторинного ПВХ; сформувати проєкт національного стандарту на RePVC; запропонувати зміни до законів України «Про управління відходами», «Про відходи» та Податкового кодексу; оцінити очікувані економічні й екологічні ефекти від упровадження запропонованих змін.

Ключовим напрямом удосконалення галузевого регулювання є розроблення національного стандарту на вторинний ПВХ (RePVC), який має встановити чіткі вимоги до якості, екологічної безпечності та методів контролю вторинної сировини. Запропонована структура такого стандарту охоплює загальні положення, вимоги до складу матеріалу, норми щодо вмісту полімерних і неорганічних домішок, контроль залишкової вологості, летких речовин та токсичних компонентів, а також вимоги до механічних характеристик і гранулометричного складу. Важливим елементом стандарту є правила маркування, транспортування, зберігання, оцінки відповідності та простежуваності партій матеріалу.

У межах дослідження запропоновано, щоб вторинний ПВХ для промислового використання містив не менше 96 % основного полімеру, а сумарні полімерні домішки не перевищували 3 %. Окремо акцентовано на необхідності контролю вмісту свинцю, кадмію та інших небезпечних залишків, а також на застосуванні інструментальних методів контролю - ІЧ-спектроскопії, DSC, газоаналізу, гравіметрії, ICP-MS та механічних випробувань. Такий підхід дозволяє забезпечити відтворювану якість RePVC та зробити його використання технологічно передбачуваним для виробників профільних систем [2]. Структура Проєкту Національного стандарту на вторинний ПВХ представлена в таблиці 1.

Таблиця 1

Структура Проєкту Національного стандарту на вторинний ПВХ

Елемент	Характеристика
Загальні положення:	вимоги до якості та безпечності вторинного ПВХ
Основні вимоги:	домішки ≤ 3 %, повторне використання ≥ 70 %, контроль токсичних залишків.
Вимоги до процесу:	вуглецевий слід $\leq 2,5$ кг CO ₂ /кг, енергоспоживання $\leq 1,5$ кВт·год/кг.
Контроль якості:	сертифікація та щорічний моніторинг.
Маркування:	«RePVC-есо».

Суттєву увагу в роботі приділено саме технологічним аспектам

рециклінгу ПВХ-профілів. Вторинний матеріал формується внаслідок послідовних етапів демонтажу відпрацьованих виробів, сортування, подрібнення, очищення від сторонніх домішок, повторної переробки у гранулят або порошок та лабораторного контролю. Якість рециклінгу залежить не лише від технічного оснащення підприємства, але й від наявності нормативної бази, яка регламентує допустимі параметри матеріалу, правила відбору проб та системи контролю якості. Саме відсутність таких вимог в Україні сьогодні стримує масштабне використання RePVC у віконній галузі.

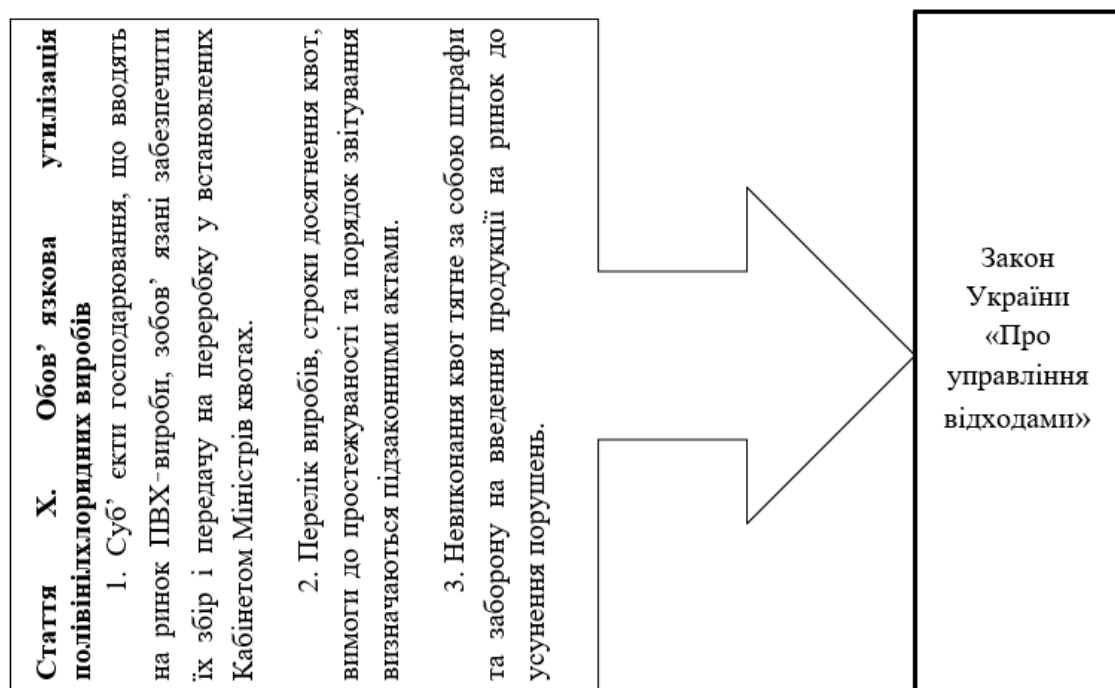


Рис. 1. Пропозиції щодо доповнення Закону України «Про управління відходами»

Важливим блоком дослідження є пропозиції щодо змін до законодавства. Запропоновано доповнити Закон України «Про управління відходами» положеннями про обов’язкову утилізацію полівінілхлоридних виробів, які представлені на рисунку 1.

Крім того, доцільним є вдосконалення механізму розширеної відповідальності виробника. У межах запропонованої моделі виробники й імпортери ПВХ-виробів повинні забезпечувати досягнення цільових показників збору і переробки, а також брати участь у фінансуванні колективних систем РВВ. Запровадження квоти не нижче 50 % повторного використання або переробки з поетапним підвищенням сприятиме формуванню стабільної системи поводження з відходами профільних конструкцій [3]. Водночас механізм «зелених сертифікатів переробки» може стати інструментом підтвердження виконання зобов’язань та стимулювання ринку вторинної сировини. Формулювання доповненого

елементу представлено на рисунку 2.

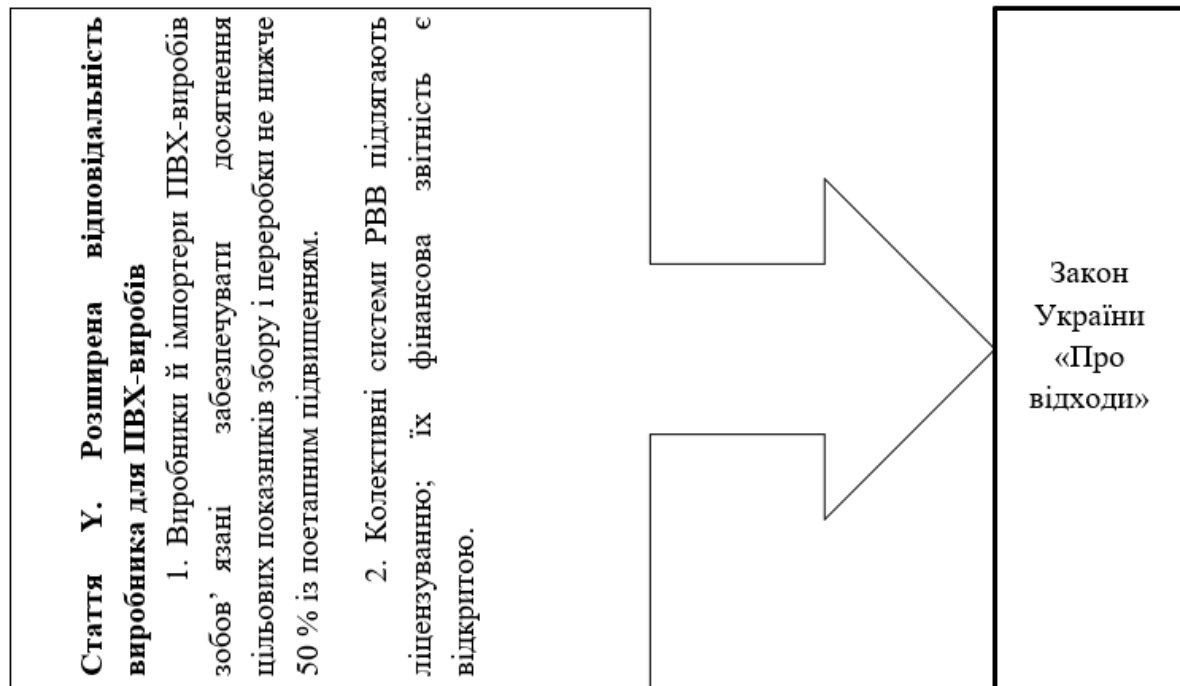


Рис. 2. Пропозиції щодо доповнення окремого елемента до Закону України «Про управління відходами»

Окремий напрям пов'язаний із податковими стимулами для підприємств, що використовують екологічно безпечні технології переробки ПВХ. Запропоновано запровадити прискорену амортизацію обладнання для переробки, податковий кредит на інвестиції у відновлювані джерела енергії для переробних підприємств, а також зниження податку на прибуток для частки прибутку, отриманого від реалізації продукції з RePVC-есо. Такі інструменти зменшують інвестиційні бар'єри на етапі запуску переробних ліній та підвищують ліквідність проєктів.

Для обґрунтування доцільності запропонованих регуляторних рішень у роботі використано балансову модель «потік відходів → вихід вторинної сировини → економічні вигоди → податкові ефекти». Базовий сценарій передбачає створення трьох регіональних переробних хабів потужністю по 15 000 т/рік кожен. Сукупна потужність такої мережі становитиме 45 000 т/рік, що може стати основою для масштабування системи переробки ПВХ в Україні [4].

За умови різниці в ціні між первинним та вторинним ПВХ на рівні 800 євро за тону річна економія на сировині може становити близько 36 млн євро. Водночас екологічний ефект за методом заміщення оцінено на рівні 90 000 т CO₂ на рік. Це підтверджує, що перехід до масштабного використання RePVC має суттєвий кліматичний потенціал і може розглядатися як інструмент декарбонізації будівельної галузі.

Додатково оцінено фіскальні ефекти від запропонованих податкових

стимулів. Зокрема, прискорена амортизація обладнання може забезпечити економію податку на прибуток у розмірі 135 тис. євро на рік, податковий кредит на інвестиції у ВДЕ - ще 200 тис. євро одноразово, а зниження ставки податку на прибуток для продукції з RePVC-есо - близько 100 тис. євро на рік. Сукупно це формує сприятливе інвестиційне середовище для створення сучасної переробної інфраструктури [5].

Наукова новизна дослідження полягає у формуванні комплексного підходу до вдосконалення нормативно-правового забезпечення переробки ПВХ-профілів, який поєднує стандартизацію вторинної сировини, удосконалення законодавчих механізмів, запровадження розширеної відповідальності виробника та використання податкових стимулів. Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості їх застосування під час підготовки національних стандартів, державних програм підтримки переробних підприємств і механізмів РВВ у сфері поводження з ПВХ-виробами.

У результаті проведеного дослідження встановлено, що розвиток екологічно безпечних технологій переробки ПВХ-профілів в Україні потребує системного оновлення нормативно-правової бази. Запровадження національного стандарту на RePVC дозволить забезпечити стабільну якість вторинної сировини, прозорість її походження та контроль екологічних параметрів. Внесення змін до законів України «Про управління відходами» і «Про відходи», а також використання податкових стимулів створюють передумови для розбудови сучасної інфраструктури переробки та формування повноцінної системи циркулярного використання ПВХ у віконній галузі.

Отже, реалізація запропонованого комплексу заходів сприятиме збільшенню обсягів використання вторинного ПВХ, скороченню викидів CO₂, зменшенню витрат на захоронення відходів і підвищенню конкурентоспроможності українських підприємств. Отримані результати можуть слугувати основою для подальших досліджень, пов'язаних із оцінкою життєвого циклу ПВХ-виробів, моделюванням інвестиційної ефективності переробних хабів та гармонізацією національних технічних вимог із нормами ЄС [6].

ЛІТЕРАТУРА

1. Крилова Г.В. Екобезпечна утилізація побутових пластикових відходів в технологіях із завершальним біорозкладом. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 101 «Екологія». – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2022. <https://lpnu.ua/sites/default/files/2023/radaphd/22210/disertaciya-krilova-gv.pdf>
2. Лупінос А. Аналіз тенденцій розвитку підприємницької

діяльності у сфері утилізації полімерних відходів в Україні / А. Лупінос, Н. Нуржій // Менеджмент і підприємництво: тенденції розвитку. – 2018. – Випуск 2, № 04. – С. 55-63. – DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.26661/2522-1566-2018-2/04-06>.

3. Маркіна Л.М. Визначення небезпеки пластикових відходів для дослідження можливості їх утилізації термічними методами / Л.М. Маркіна, С.Ю. Ушкац, Н.Ю. Жолобенко // Проблеми охорони праці в Україні. – Комунальне агентство «Національний науково-дослідний інститут промислової безпеки та охорони праці». – 2021. – Том 37 № 2. – С. 25-37. – DOI: 10.36804/nndipbor.37-2.2021.25–37.

4. Матвеева Н.М., Мальований Г.О. Особливості розвитку підприємств з переробки відходів та вторинної сировини. Економіка та суспільство, 2024. №60 <file:///C:/Users/%D0%9D%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D1%8F/Downloads/3586%D0%A2%D0%B5%D0%BA%D1%81%D1%82%20%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%82%D1%96-3502-1-10-20240321.pdf>

5. Михайлова Є. О. Аналіз методів перероблення пластикових відходів / Є. О. Михайлова, Д. М. Дейнека, Г. М. Панчева // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер.: Нові рішення в сучасних технологіях : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2021. – № 1 (7). – С. 80-89.

6. Нагурський О.А., Крилова Г.В., Васійчук В.О., Качан С.І. Утилізація полімерних побутових відходів в технологіях із завершальним біорозкладом // Проблеми сталого розвитку : матеріали міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 10-й річниці створення інституту (Львів-Зозулі, 22–23 жовтня 2021 р.). – 2021. – С. 194–195.

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТИПОВИХ ЛЮДСЬКИХ ПОМЕШКАНЬ У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Микола Аміров

*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»,
amirov.m.h@ntu.one*

Для надзвичайних ситуацій (далі НС) не передбачено норм енергоспоживання населенням. Тому в таких умовах при визначенні потужності альтернативних джерел енергії спираються переважно на практичний досвід оперативного використання мобільних бензинових електрогенераторів потужністю у декілька кВт без урахування екологічних аспектів їх роботи. Проте слід мати на увазі, що викиди екологічно небезпечних речовин в атмосферу з вихлопними газами їхніх бензинових двигунів в умовах обмеженого повітрообміну при тривалій роботі на одному

місці поблизу людського помешкання суттєво знижує рівень екологічної безпеки прилеглих територій, являючи пряму загрозу здоров'ю людей. Небезпека збільшується в холодні пори року під час роботи генераторів в режимі підвищеного навантаження, коли їх потужність значно перевищує номінальну. Отже, при масштабному застосуванні таких мобільних джерел потрібна мінімізація їх потужності та її ефективне використання саме в номінальному режимі, що забезпечить збереження енергоресурсу (рідкого палива), якого завжди бракує під час НС, та дозволить підвищити рівень екологічної безпеки за рахунок зменшення викидів в атмосферу, зокрема шляхом певної очистки вихлопних газів бензинових двигунів відносно малої потужності.

Мета роботи полягала в розробленні екологічно безпечної технології енергозабезпечення типових людських помешкань в умовах НС на основі раціонального вибору альтернативних джерел енергії, яка дозволить мінімізувати споживання викопного палива та обсяги викидів екологічно небезпечних речовин в атмосферу при підтриманні достатнього рівня екологічної безпеки.

Для досягнення мети досліджено існуючі соціальні норми та обсяги споживання енергії типовими людськими помешканнями з визначенням потрібної в умовах НС потужності альтернативних джерел енергії [1-4]. Виконано розрахунок потужності електричних побутових приладів для людського помешкання з 4-х осіб за ощадною соціальною нормою споживання електроенергії, що визначена мною в обсязі 0,259 кВт (без урахування теплозабезпечення помешкання, що здійснюється централізовано), а для типової двокімнатної квартири, що для НС мінімізована мною до рівня 0,792 кВт

Крім того, визначено потужності, що потрібні для компенсації теплових втрат в опалювальному періоді, зокрема у типових приватних будинках та у тимчасових укриттях (типу польовий бліндаж). Укрупнений аналіз втрат тепла проводився з використанням рівняння теплопровідності з параметрами площі, температурного градієнту та теплового опору певної огорожувальної конструкції або усієї будівлі в цілому у вигляді:

$$W = \frac{S(T_B - T_3)}{R}, \text{ Вт},$$

де S – повна площа, через яку тепло надходить назовні, м^2 ; $(T_B - T_3)$ – температурний градієнт, як різниця температур всередині і ззовні огорожувальної конструкції; $R = d / \lambda$ – тепловий опір, $\text{м}^2\text{К/Вт}$, тут: λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/мК , а d – товщина конструкції, м .

(зауважимо, що за величиною R визначають питому трансмісію тепла: $U = 1 / R$, $\text{Вт/м}^2\text{К}$, що дозволяє оперативно уточнити потужність втрат тепла в умовах НС).

Основні результати зведені у таблиці 1, де наведено потужності джерел енергії, що потрібні для забезпечення обсягів її споживання у типових

людських помешканнях для обігріву приміщення, нагрівання води для побутових потреб і живлення обраної групи електричних побутових приладів в умовах НС.

Таблиця 1

Потужності джерел енергії, що потрібні для забезпечення обсягів споживання енергії у типових людських помешканнях в НС

Типові людські помешкання	Потужність (в кВт) джерела енергії, що потрібна для:			
	компенсації втрат тепла помешканням	нагрівання води	живлення побутових ел. приладів	забезпечення помешкання енергією
1	2	3	4	5
Соціальна норма	0,326	0,205	0,259	0,79
Двокімнатна квартира в багатоповерхівці	0,333	0,21	0,251	0,792
Типовий приватний будинок	3,42	1,28	0,251	4,951
Тимчасове укриття	4,521	0,21	0,251	4,982

Аналіз отриманих результатів показав що потужність джерела енергії у зазначених помешканнях в умовах НС майже на 70% обумовлене потребою забезпечення обігріву приміщень й нагрівання води для побутових потреб. Решта (30%) потужності потрібна для живлення чисто електричних побутових приладів. За таких умов під час НС пропонується орієнтувати теплопостачання і електропостачання на різні видів альтернативних мобільних джерел енергозабезпечення. В результаті, актуалізується потреба в мобільних джерелах тепла, зокрема, у теплових насосах (повітря-повітря, повітря-вода). З огляду на певну величину споживання ними електроенергії з коефіцієнтом теплового перетворення ($COP \approx 3,0...4,0$), мобільний бензогенератор і два теплових насоси пропонується поєднати в єдину систему альтернативного енергозабезпечення людських помешкань під час НС. Це дозволить приблизно в три рази зменшити потужність бензогенератора до 1..1,5 кВт, отже мінімізувати витрати викопного органічного палива (бензину) та зменшити обсяги викидів парникових газів та токсичних продуктів згоряння бензинового двигуна генератора. Причому, додаткове зниження викидів пропонується на основі застосування фільтрів вихлопних газів, які запропоновано створити на основі жаростійких волокон, змочених нейтралізаторами вихлопних газів.

Висновки. Потужність бензогенератора до 1,5 кВт забезпечить збереження паливного ресурсу (до 0,4–0,6 л/год) та суттєво знизить екологічне навантаження на територію розташування тимчасового

людського помешкання за рахунок пропорційного зменшення обсягу викидів CO₂, оксидів азоту і чадного газу в атмосферу, а також зниження шумового забруднення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Державні санітарні норми опалення : ДСН 3.36.039-99. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99#Text> (дата звернення: 18.01.2026).
2. Типове добове споживання електроенергії побутовими приладами / Міністерство енергетики України. URL: <https://www.mev.gov.ua> (дата звернення: 18.01.2026).
3. Аміров М. Г. Теплозбереження в людських помешканнях під час надзвичайних ситуацій // Наукова весна — 2025 : матеріали XV Міжнар. наук.-техн. конф. аспірантів та молодих вчених (Дніпро, 26–28 берез. 2025 р.) / НТУ «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «ДП», 2025. С. 116–117. URL: https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna-2025/Scientific_Spring_2025.pdf (дата звернення: 18.01.2026).
4. Колесник В. Є., Рудченко А. Г., Аміров М. Г. Запровадження екобезпечних мобільних джерел в приватних будинках під час надзвичайних ситуацій // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. 2025. № 83. С. 338–348. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/83.338> (дата звернення: 30.04.2026).
5. Аміров М. Г., Колесник В. Є. Енергоекологічні аспекти автономного енергозабезпечення тимчасових укриттів в умовах надзвичайних ситуацій // Наукова весна — 2026 : матеріали XVI Міжнар. наук.-техн. конф. аспірантів та молодих вчених (Дніпро, 04–06 берез. 2026 р.). Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2026. С. 178–179.

АРХІТЕКТУРА ЗДОРОВ'Я: ПРОЄКТУВАННЯ ЗЕЛЕНИХ ПАРКІВ ЯК ПРОСТОРІВ ДЛЯ АКТИВНОГО ВІДПОЧИНКУ

Бугай Вероніка

*Київський національний університет будівництва і архітектури,
buhai_vo-2025@knuba.edu.ua, ver.bugai@gmail.com*

ВСТУП

Традиційно «зелене будівництво» (Green Building) (рис. 1,2) сприймається крізь призму енергоефективності та економії ресурсів. Проте сучасна архітектурна парадигма розширює це поняття, визначаючи будівлі та міські простори як середовище, що безпосередньо формує здоров'я нації. В умовах стрімкої урбанізації, де понад 70% жителів міст ведуть малорухливий спосіб життя, архітектура стає інструментом превентивної медицини.



Рис. 1

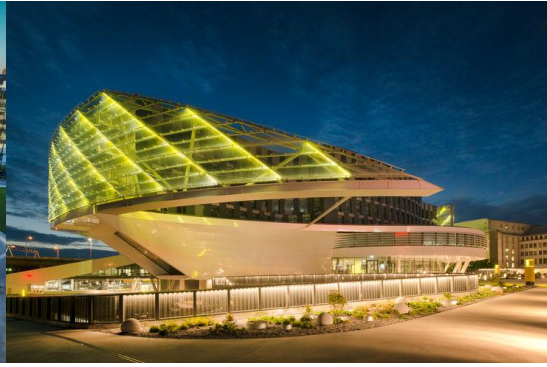


Рис. 2

Створення активних зелених зон — це не просто благоустрій території, а стратегічне проєктування «активного дизайну» (Active Design), який стимулює фізичну культуру без примусу, через комфорт та естетичну привабливість середовища.

РОЗДІЛ 1: Ландшафтні інструменти стимулювання активності

Архітектор ландшафту виступає як сценарист фізичної активності. Головним інструментом тут є геопластика та мережа комунікацій:

Проектування траєкторій: Для різних видів спорту потрібна різна геометрія.

Біг: вимагає замкнених циклічних маршрутів із м'яким покриттям (тартан, мульча), що амортизує удари.

Скандинавська ходьба: потребує природних стежок із перепадом висот, що залучає до роботи 90% м'язів тіла.

Велоспорт: потребує чіткого розмежування потоків для безпеки та високої швидкості.

Зонування за інтенсивністю: Важливим архітектурним рішенням є поділ парку на «активне ядро» та «тихі лакуни».

Зони для йоги, пілатесу та стретчингу проєктуються у віддалених частинах парку з максимальним затіненням та використанням тактильних покриттів (дерев'яні деки), що дозволяє займатися босоніж або на килимках у тиші.

Навпаки, майданчики для командних ігор (баскетбол, теніс) розміщуються ближче до входних груп для зручного доступу великих груп людей. (рис. 3)

РОЗДІЛ 2: Екологічні аспекти спортивної інфраструктури

Принцип «не нашкодь» є ключовим. Спортивна інфраструктура має інтегруватися в ландшафт, а не домінувати над ним.

Сталі матеріали: Замість традиційного бетону та надлишку металу використовуються відновлювані матеріали: термодерешина для спортивних помостів, стабілізований ґрунт та перероблена гума для бігових доріжок. Це знижує «тепловий острів» міста та забезпечує екологічну чистоту місця занять.



Рис. 3

Еко-воркаут: Сучасний тренд — тренажери з натуральних матеріалів (дерево, камінь), які задіюють природний опір. Такі майданчики мають високий рівень психологічного комфорту.

Енергонезалежність: Впровадження інноваційних тренажерів, що генерують енергію (наприклад, для освітлення парку під час вечірніх тренувань), створює додаткову мотивацію та підкреслює еко-спрямованість об'єкта.

РОЗДІЛ 3: Психофізичний вплив «зеленого» середовища

Фізична активність на відкритому повітрі (Outdoor fitness) за показниками ефективності значно перевершує заняття в приміщенні:

Насичення киснем: Велика кількість зелених насаджень підвищує концентрацію аероіонів та кисню, що прискорює обмін речовин та витривалість серцево-судинної системи під час кардіонавантажень.

Зниження рівня кортизолу: Згідно з теорією відновлення уваги (ART), споглядання природних фракталів знижує рівень гормону стресу. Це критично важливо для відновлення організму після фізичного навантаження.

Фітонциди: Хвойні та листяні дерева виділяють речовини, що мають антисептичну дію, перетворюючи парк на природний інгаляторій, що особливо важливо для дихальних практик.

РОЗДІЛ 4: Цифровізація та інтерактивність: «розумні» парки

Сучасна «зелена архітектура» інтегрує технології для залучення молоді до спорту.

Інтерактивні навігаційні системи: Використання QR-кодів на маршрутах, які пропонують комплекси вправ для конкретної локації або дозволяють змагатися з іншими відвідувачами парку через мобільні додатки.

Smart-освітлення: Розумні системи світла, що адаптуються до присутності людини, роблять парки безпечними для бігу у вечірній час, розширюючи часові межі для занять фізичною культурою.

Еко-датчики: Встановлення моніторів якості повітря та вологості дозволяє відвідувачам обирати найкращий час для тренувань, роблячи спорт усвідомленим та безпечним.

ВИСНОВОК

Зелена архітектура перетворює парк на багатофункціональний «тренажерний зал без стін». Грамотне ландшафтне проєктування, що базується на принципах сталого розвитку, не просто надає місце для занять спортом, а формує нову культуру руху. Парк стає об'єктом, який «змушує» місто рухатися, роблячи фізичну активність природною та невід'ємною частиною архітектурного ландшафту.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДБН Б.2.2-12:2019. Планування та забудова територій. — К.: Мінрегіон України, 2019.
2. Ян Гейл. Міста для людей / Пер. з англ. — К.: Основи, 2018. — 304 с.
3. Active Design Guidelines: Promoting Physical Activity and Health in Design. — New York City: Center for Active Design, 2010.
4. Кочарян К. С. Еколого-біологічні основи створення та утримання зелених насаджень у містах. — К.: Наукова думка, 2015.
5. Smart Cities and Health: Emerging Trends in Urban Design. — Journal of Urban Health, 2022.

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СВІТЛОВОГО РЕЖИМУ У СКВЕРІ І. СТАРОВА (М. ДНІПРО)

Іван Булавка

*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,
Ivanbulavka77email@gmail.com*

Сучасні міста розвиваються неймовірно швидко, що докорінно змінює їхній мікроклімат. Велика кількість асфальту, висотна забудова та скорочення зелених зон створюють нові екологічні виклики [1]. Одним із ключових факторів тут є світловий режим - просторовий розподіл сонячної енергії, який напряму керує тепловим балансом, вологістю та комфортом мешканців. У таких великих індустріальних центрах, як місто Дніпро, інтенсивна літня інсоляція на тлі щільної забудови регулярно призводить до формування небезпечних зон перегріву та посилення ефекту «міського острова тепла» [2].

Світовий досвід доводить, що зелені насадження залишаються найефективнішим інструментом для пом'якшення цих явищ, адже крони

дерев не лише механічно відсікають сонце, а й докорінно змінюють радіаційний баланс території.

Сьогодні для просторової оцінки цих процесів дедалі частіше використовують геоінформаційні системи (ГІС), а також методи фітоіндикації, де рослини виступають живими біосенсорами освітленості [6–8, 12]. У свою чергу інтеграція ГІС-аналітики з фотометрією дозволяє швидко виявляти такі дисбаланси та формувати теплові карти для цільового озеленення чи проріджування. Проте комплексних досліджень, що поєднують ці інструменти в українських реаліях, досі бракує.

Тому метою нашої роботи став детальний аналіз специфіки формування світлового режиму в урбоекосистемах Дніпра на прикладі скверу І. Старова з метою пошуку шляхів оптимізації міського простору.

Дослідження проводилось у сквері І. Старова (м. Дніпро), який являється типовим об'єктом рекреаційного фонду з мозаїчною структурою насаджень. В межах парку було закладено точки спостереження за регулярною сіткою (рис.1), що охоплювали ділянки з різним рівнем відкритості та затінення [2].



Рис 1. Розташування облікових точок у сквері Івана Старова (м. Дніпро)

На кожній локації синхронно вимірювалися: інтенсивність освітлення (люксметром), температура та відносна вологість приземного повітря (термогігрометр), а також температура й вологість ґрунту (Аналізатор ґрунту) [5]. Важливими структурними показниками виступали зімкненість крон дерев та їх кількість на обліковій площі.

Аналіз отриманих даних дозволив встановити чіткі залежності між просторовою структурою міського зеленого насадження та мікрокліматом його території.

Діапазон змін мікрокліматичних параметрів вказує на те, що зелені зони є складним конгломератом мікроекосистем. Рівень освітленості варіює від 0,82 Лк у глухій тіні до 75,12 на відкритому брукованому майданчику. Така амплітуда надходження енергії розігріває поверхню ґрунту до 37,9 °С,

через що його вологість падає до 1,4%, вказуючи на суттєве пересихання (табл. 1).

Таблиця 1

**Основні характеристики мікрокліматичних параметрів у сквері
І.Старова**

Екологічний показник	Середнє значення показника	Мінімум	Максимум	Краще порахувати середнє квадратичне відхилення	Середнє значення (Медіана)
Температура ґрунту, °С	33-34	28,9	37,9	9,0	33,5
Вологість ґрунту, %	7-8	1,4	17,3	15,9	7,5
Освітлення, Лк	20-25	0,82	75,12	74,3	22,5
Температура повітря, °С	35-36	29,6	39,2	9,6	35,6
Вологість повітря, %	28-32	21,1	50,5	29,4	30,0
Зімкненість крон (0-1)	0,6-0,7	0	1,0	1,0	0,65
Кількість дерев	2-3	0	6	6	2,5

Тим бар'єром, що регулює надходження сонячної енергії, виступає зімкненість крон дерев (табл. 2).

Таблиця 2

Динаміка освітлення залежно від рівня зімкненості крон

Ступінь зімкненості крон (частки одиниці)	Структурна характеристика простору	Діапазон освітлення (Лк)	Усереднене освітлення
0–0,1	Відкриті простори (асфальтовані площі, відкриті газони)	65–75	> 70
0,2–0,4	Слабке затінення (поодинокі дерева, алеї з великим кроком)	35–60	45–50
0,5–0,7	Помірне затінення (класична паркова зона, пухкі групи)	10–35	20–25
0,8–1,0	Сильне затінення (щільний масив, переплетення крон)	0,8–10	3–6

Фільтрація променів через листяний намет підпорядковується експоненційному закону ослаблення. Перехід до помірної тіні (0,5–0,7) зменшує світловий потік більш ніж удвічі, а ділянки зі щільним переплетінням крон отримують менше 10% інсоляції. З практичної точки

зору це означає: щоб зняти літнє теплове навантаження, місту не потрібні суцільні хащі. Оптимального захисту можна досягти вже за зімкненості 0,5–0,6. Такий рівень залишає достатньо «світлових вікон» для підтримки газонів та комфорту пішоходів. Розуміння того, як саме світло конвертується у тепло та вологість, є ключем до раціонального урбопланування (табл. 3) [3].

Таблиця 3

Залежність мікрокліматичних параметрів від градації режимів освітленості

Градiєнт освітлення (Лк)	Температура поверхні ґрунту (°C)	Температура приземного повітря (°C)	Відносна вологість повітря (%)
Сильна тінь (< 5)	30–33	33–36	30–38
Помірна тінь (5–20)	31–34	34–37	27–33
Напіввідкриті ділянки (20–50)	32–36	35–38	25–30
Відкрита інсоляція (> 60)	33–38	36–39	21–28

На відкритих ділянках сонце значно розігріває поверхню ґрунту, підігріваючи при цьому приземне повітря до 39,2 °C і критично знижуючи його вологість до 21–25%. В умовах сильного затінення терморегуляція забезпечується синергетичною дією двох біофізичних факторів: селективним екрануванням короткохвильової сонячної радіації кронами дерев та інтенсивним евапотранспіраційним охолодженням. Як наслідок, температура повітря знижується до 33 °C, що сприяє зменшенню фізіологічного теплового стресу та наближає умови до прийнятних меж за індексами біометеорологічного комфорту (наприклад, PET або UTCI). Отримані закономірності дозволяють здійснити екологічну типізацію території досліджуваного парку за світловим режимом (табл. 4).

Таблиця 4

Екологічна типізація міських просторів за комплексним світловим режимом

Тип простору	Структурні ознаки	Параметри світлового режиму	Мікрокліматичні умови
1	2	3	4
I. Відкритий	Відсутність дерев, низька зімкненість	60–75 (висока інсоляція)	Максимальні температури, низька вологість, ризик теплового стресу
II. Напівзатінений	1–3 дерева, середня зімкненість (0,3–0,6)	20–45 (комфортне освітлення)	Помірні температури, максимальний комфорт для рекреації

III. Затінений	3–6 зімкненість >0,8	дерев, <10 (дефіцит інсоляції)	Знижені температури (оазис охолодження), підвищена вологість

Здорова урбоєкосистема потребує розумної мозаїчності. Відкриті площі життєво необхідні навесні для прогрівання і знезараження територій, проте влітку вони перетворюються на локальні мікрокліматичні теплові аномалії. Надмірне згущення дерев, навпаки, може блокувати провітрювання вулиць.

Просторово-часова динаміка сонячної інсоляції є визначальним фактором мікрокліматичних трансформацій у місті. Відкриті ділянки провокують радикальне перегрівання та посилюють ефект міського острова тепла [4]. Єдиною ефективною протидією є архітектура деревного намету, причому найоптимальнішим середовищем виступає напівзатінений екотонний ландшафт. Він зрізає екстремальні температури, але зберігає достатньо світла для комфорту людей та розвитку трав'яного покриву [3]. Тому стратегія управління містом має бути гнучкою: комбінувати висадку дерев із широкими кронами на відкритих площах та ювелірно формувати світлові коридори у масивах щільної забудови. Подальші дослідження варто сфокусувати на вивченні наслідків світлового забруднення (ALAN), розробці цифрових двійників міст для 3D-моделювання мікроклімату та синергії методів фітоіндикації з супутниковим зондуванням (Sentinel-2) для проактивного захисту міського простору [9].

ЛІТЕРАТУРА

1. Адаменко О. М., Коденко Я. В., Консевич Л. М. Основи екології: навчальний посібник для вищих навчальних закладів. Київ, 2015. 314 с.
2. Бессонова В. П., Іванченко О. Є., Скляренко А. В. Видове багатство деревних насаджень та їх життєвий стан в Обухівському парку Дніпропетровської області. Scientific Bulletin of UNFU. 2024. Т. 34, № 2. С. 17–25. URL: <https://doi.org/10.36930/40340202>.
3. Дудин Р. Б., Курницька М. П., Левусь Т. М. Паркознавство: навч. посібник. Львів: ПП «Новий Світ 2000», 2023. 191 с.
4. Сухарев С. Основи екології та охорони довкілля: навчальний посібник. Ужгородський національний університет. Київ, 2016. 391 с.
5. Шевченко С. М., Круліковський С. В. Вуличні насадження в системі озеленення населених місць України. Подільські читання: збірник наукових праць за матеріалами міжнародної науково-практичної конференції (м. Кам'янець-Подільський, 9–11 жовтня 2018 р.). Кам'янець-Подільський, 2018. С. 442–447.
6. Кунах О. М., Жуков О. В. Спосіб індикації світлового режиму паркового насадження: пат. 160189 Україна: МПК А01G23/00 G02F1/00. № заявки и 2025 0435; заявл. 03.02.2025; опубл. 13.08.2025.

7. Tutova, H., Lisovets, O., Kunakh, O., & Zhukov, O. (2025). Procrustean analysis of the set of spectral indices reveals the transformations in plant community hemeroby and functional structure induced by anthropogenic disasters. *Biosystems Diversity*. 2025. Vol. 33(2). P. e2528. URL: <https://doi.org/10.15421/012528>.

8. Lisovets, O., Kunakh, O., Tutova, H., & Zhukov, O. (2025). Phytoindication is an Effective Method for Accurately Determining the Lighting Intensity in Urban Parks. *Ekológia (Bratislava)*. 2025. Vol. 44(2). P. 129–137. URL: <https://doi.org/10.2478/eko-2025-0015>.

9. Pettorelli N. et al. Framing the concept of satellite remote sensing essential biodiversity variables: challenges and future directions. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*. 2016. Vol. 2(3). P. 122–131.

10. Amani-Beni M., Zhang B., Xie G.-D., Odgaard A. J. Impacts of the Microclimate of a Large Urban Park on Its Surrounding Built Environment in the Summertime. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, No. 22. P. 4703. URL: <https://doi.org/10.3390/rs13224703>.

11. Ziter C. D., Pedersen E. J., Kucharik C. J., Turner M. G. Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2019. Vol. 116, No. 15. P. 7575–7580. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1817561116>.

12. Shirinyan E., Stefanov K., Petrova-Antonova D. 3D Solar Analysis of the Street Network and Impact Estimation of the Shade of Trees at the District Scale. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2025. Vol. XLVIII-G-2025. P. 1339–1346.

13. Jägerbrand A. K., Spoelstra K. Effects of anthropogenic light on species and ecosystems. *Science*. 2023. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adg3173#:~:text=DOI%3A%2010.1126/science.adg3173>.

РУДЕРАЛЬНІ БІОТОПИ У КОНТЕКСТІ ЗЕЛЕНОГО ВІДНОВЛЕННЯ МІСЬКИХ ТЕРИТОРІЙ: РИЗИКИ ПОШИРЕННЯ ІНВАЗІЙНИХ РОСЛИН ТА ПІДХОДИ ДО МОНІТОРИНГУ

Чернов Леонід

*Київський національний університет будівництва і архітектури,
chernov_lo-2025@knuba.edu.ua*

Зелене відновлення міських територій передбачає не лише реконструкцію забудови й розширення площ озеленення, а й екологічно обґрунтоване управління порушеними ділянками. Особливого значення набувають рудеральні біотопи, які формуються на пустирях, узбіччях доріг, залізничних насипах, будівельних майданчиках, промислових зонах і

територіях складування ґрунту. Такі місцезростання часто сприймаються як другорядні, однак саме вони можуть ставати первинними осередками фітоінвазій і джерелами поширення небезпечних чужорідних видів у міському середовищі.

Екологічна специфіка рудеральних оселищ полягає у поєднанні відкритого субстрату, фрагментарного рослинного покриву, регулярного механічного порушення, зниженої конкуренції з боку стабільних угруповань і надходження діаспор із транспортними потоками, будівельними матеріалами або ґрунтом. За таких умов адвентивні рослини отримують перевагу на ранніх етапах колонізації, а частина з них здатна формувати стійкі популяції та переходити до інвазійної фази. Отже, порушені міські ділянки слід розглядати не тільки як об'єкти благоустрою, а й як потенційні зони екологічного ризику.

Дослідження рудеральної рослинності України засвідчують істотну участь чужорідної флори у складі таких угруповань. Зокрема, у рудеральній рослинності України виявлено 325 чужорідних видів, що належать до 58 родин і 198 родів; серед них зафіксовано 23 високоінвазійні види [1]. Окремі таксони, зокрема *Ambrosia artemisiifolia*, *Anisantha tectorum*, *Grindelia squarrosa*, *Heracleum mantegazzianum*, *Heracleum pubescens* та *Xanthium orientale* subsp. *giparium*, визначаються як види-трансформери [1]. Це підтверджує, що порушені угруповання виконують не лише роль середовища випадкового занесення, а й функцію активних осередків подальшого розселення інвазійних рослин.

У контексті зеленого відновлення особливої уваги потребують види, здатні швидко закріплюватися на порушених ділянках і поширюватися за межі первинних локалітетів. До них належать амброзія полинолиста, нетреба прибережна, окремі види золотушника, борщівник Мантегацці та борщівник Сосновського. Останній є показовим прикладом інвазійної рослини, небезпечної для біорізноманіття і здоров'я людини, що підкреслює практичне значення просторового моніторингу [2].

Рудеральні ділянки рідко існують ізольовано. Вони просторово пов'язані з транспортними шляхами, урбанізованими зонами, агроландшафтами, промисловими територіями, берегами водойм і заплавами. Через таку мережу антропогенно змінених осередків чужорідні види можуть поширюватися на значні відстані: спершу закріплюватися у найбільш порушених місцях, а згодом проникати у напівприродні біотопи, лісосмуги, перелоги, міські зелені зони та прибережні екосистеми. У дослідженнях синантропізації рослинного покриву України окремо наголошується на актуальності аналізу фітоінвазій, урбанофлори та змін рослинності на порушених територіях [3].

Перспективним підходом є системний моніторинг таких місцезростань із використанням польових обстежень, геоінформаційних систем, відкритих біорізноманітних баз даних і громадянських спостережень. Він має

охоплювати фіксацію локалітетів інвазійних видів, оцінювання площі та щільності популяцій, визначення типу антропогенного порушення, аналіз близькості до транспортних шляхів, водотоків, будівельних майданчиків і зелених зон. Поєднання цих даних у ГІС-середовищі дозволяє формувати карти ризику та визначати пріоритетні ділянки для контролю.

Отже, рудеральні біотопи у контексті зеленого відновлення міських територій слід розглядати як індикатори антропогенного порушення та потенційні осередки поширення інвазійних рослин. Їхнє дослідження важливе для фіксації сучасного стану інвазійної флори, прогнозування поширення небезпечних видів, визначення зон ризику та розроблення практичних підходів до моніторингу. Урахування цього чинника в екологічному супроводі зеленого будівництва може сприяти формуванню більш стійких, безпечних і керованих міських екосистем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Dubyna D. V., Iemelianova S. M., Dziuba T. P., Tymoshenko P. A., Protopopova V. V., Shevera M. V. Alien plant invasion in the ruderal vegetation of Ukraine. *Environmental & Socio-economic Studies*. 2021. Vol. 9, No. 4. P. 57-70. DOI: 10.2478/environ-2021-0025.
2. Khomiak I. V., Onyshchuk I. P., Vakerych M. M., Hasynech Y. S. Adaptation strategies of *Heracleum sosnowskyi* in Ukrainian Polissia. *Biosystems Diversity*. 2024. Vol. 32, No. 1. P. 99-106. DOI: 10.15421/012409.
3. Шевера М. В. Актуальні напрями досліджень синантропізації рослинного покриву України. *Вісник Національної академії наук України*. 2025. № 11. С. 78-93.

ФОРМУВАННЯ БІОКОМПЗИТИВ ДЛЯ ТЕПЛОІЗОЛЮВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Юрій Цанко¹, Олексій Цанко¹, Оксана Бердник¹, Владислав Галица¹

¹Київський національний університет будівництва і архітектури
juriyts@ukr.net, aleks_workingmail@ukr.net, kseniarezniak87@gmail.com, halitsa.work@gmail.com

Розробка високоефективних біокомпозитів, виготовлених з природних ресурсів як деревина, зростає у всьому світі, оскільки є один з екологічно чистим матеріалом та має низку позитивних властивостей. Проте вони піддаються впливу вогню, що обмежує сферу їх застосування та вимагає вогнезахисту.

Для комплексного захисту деревини від загоряння запропоновано невелику кількість препаратів на основі водорозчинних антипіренів. Проте це потребує оцінки процесу вогнестійкості біокомпозитів, оскільки підвищення вогнестійких властивостей біокомпозитів за допомогою

антипіренів може знизити їх механічну міцність. А тому формування вогнестійких біокомпозитів пов'язане з високим ризиком виникнення дефектів поверхні, які нівелюють отриманий результат і потребують проведення досліджень з визначення сумісності в'язучого і деревини та стійкості покриття до умов експлуатації [1]. Оскільки в умовах температурно-вологісних коливань окремі покриття розчиняються у воді та деградують з поверхні деревини.

Таким чином, проблема, що вирішувалась, полягає у необхідності забезпечення стійкості до дії високотемпературного полум'я. Це важливо для технологією нанесення і виробництва екологічно-чистих біокомпозитів, отриманих з природних та відновлюваних джерел для будівництва.

Зразки біокомпозитів для досліджень (рис. 1).



Рис. 1. Модельні зразки біокомпозиту: *a* – на основі стружки деревини – неорганічне в'язуче, *б* – на основі стружки деревини – органічне в'язуче

Процес займання та поширення полум'я біокомпозитом (рис. 2, 3 і табл. 1).

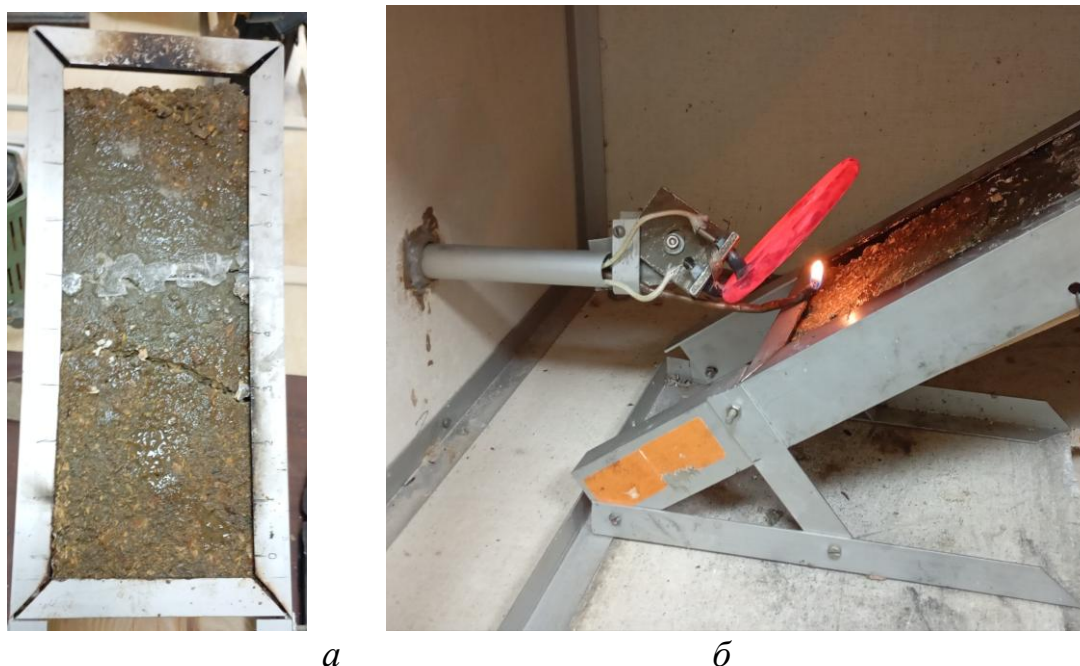


Рис. 2. Результати випробувань процесу займання та поширення полум'я біокомпозитом на неорганічній основі: *a* – зразок для випробувань, *б* – горіння зразка



Рис. 3. Результати випробувань процесу займання та поширення полум'я біокомпозитом на органічній основі: *а* – зразок для випробувань, *б* – термічна дія на зразок, *в* – спучення зразка

Дослідження показали (рис. 2, 3), що біокомпозити відносяться до важкогорючих матеріалів, оскільки, під час температурного впливу не було зафіксовано тління, а температура не перевищила 100 °С.

Таблиця 1

Час проходження фронтом полум'я контрольних точок

Зразок біокомпозиту на основі деревної стружки і	Температура димових газів, °С		Час займання, с	Час проходження фронтом полум'я ділянок зразка, с										Час досягнення максимальної температур и димових газів, с	Довжина горіння зразка, мм	Індекс горючості
	T ₁	T _{max}		1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Неорганічного в'язучого	57	83	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	600	0	0	
Органічного в'язучого	69	96	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	600	0	0	

При дії радіаційної панелі на зразки біокомпозитів сформованих на неорганічному в'язучому температура газоподібних продуктів горіння підвищилась до 83 °С, займання зразка не відбулося. Під час термічної дії на

зразок біокомпозиту, сформованого на органічному в'язучому, не відбулося його загорання, максимальна температура димових газів становила близько 96 °С, а індекс горючості склав 0 (табл. 1). Це пояснюється тим, що при застосування неорганічного в'язучого на поверхні деревини утворюється негорюча структура, яка запобігає горінню. Натомість для органічного в'язучого характерне утворення під дією термічного впливу теплоізолювального шару пінококсу, що гальмує проходження температури.

ЛІТЕРАТУРА

1. Tsapko, Y., Tsapko, A., Lomaha, V., Illiuchenko, P., Berdnyk, O., Likhnyovskyi, R., Bielikova, K., Dyuzhilova, N. (2025). Establishing patterns in the formation of biocomposites for thermal insulation of building structures. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (10 (136)), 56–64. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.337401>.

МЕХАНІЗМ ВОГНЕЗАХИСТУ ДЕРЕВИНИ РЕАКЦІЙНИМ ПОКРИТТЯМ

Юрій Цапко¹, Олексій Цапко¹, Оксана Бердник¹, Ольга Бондаренко¹

¹Київський національний університет будівництва і архітектури
juriyts@ukr.net, aleks_workingmail@ukr.net, kseniarezniak87@gmail.com,
bondolya3@gmail.com

Сучасні методи вогнезахисту будівельних конструкцій базуються на використанні покриттів, що спучуються, які являють собою складні системи органічних і неорганічних компонентів, а тому зниження горючості деревини вирішується завдяки використанню вогнезахисних покриттів, що наносяться на поверхні конструкцій та матеріалів, з яких вона виготовляється [1]. Тому, об'єктом досліджень були вогнезахисні властивості реакційного покриття на основі сумішей органо-неорганічних речовин під час взаємодії з полум'ям.

Для встановлення механізму вогнезахисту реакційного покриття використовували зразки деревини, які обробляли покриттям, що здатне під дією високої температури створити на поверхні пінококсовий захисний шар. А саме, суміш з поліфосфату амонію 20–34 %, пентаерітриту 12–26 %, меламіну 8–16 %, діоксиду титану 2,6–4 %, хлорпарафіну 2,4–3,7 %, які розчинялися у акриловій смолі.

ІЧ-спектри досліджуваних зразків реакційного покриття (рис. 1).

Таким чином, зразки реакційного покриття являють накопичення дрібнодисперсних рівновеличних речовин, оточених полімерним в'язучим.

Для встановлення індивідуальних особливостей реакційного покриття, проводили термогравіметричний аналіз (рис. 2).

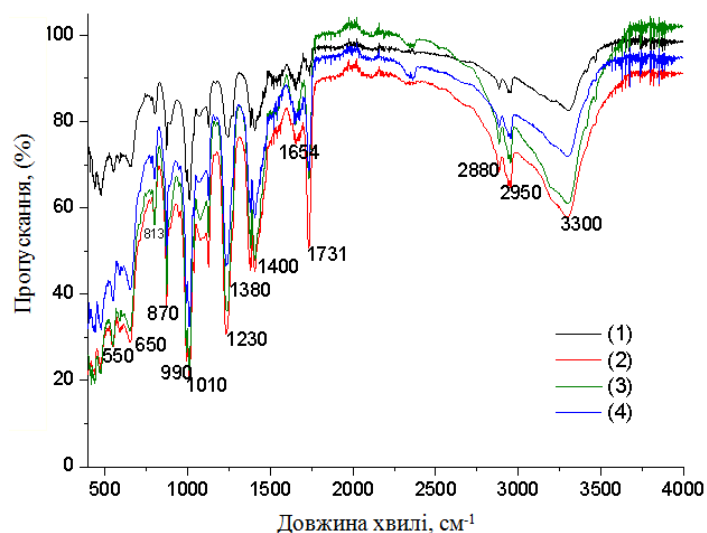


Рис. 1. Спектри поглинання зразків реакційного покриття з різними співвідношеннями компонентів

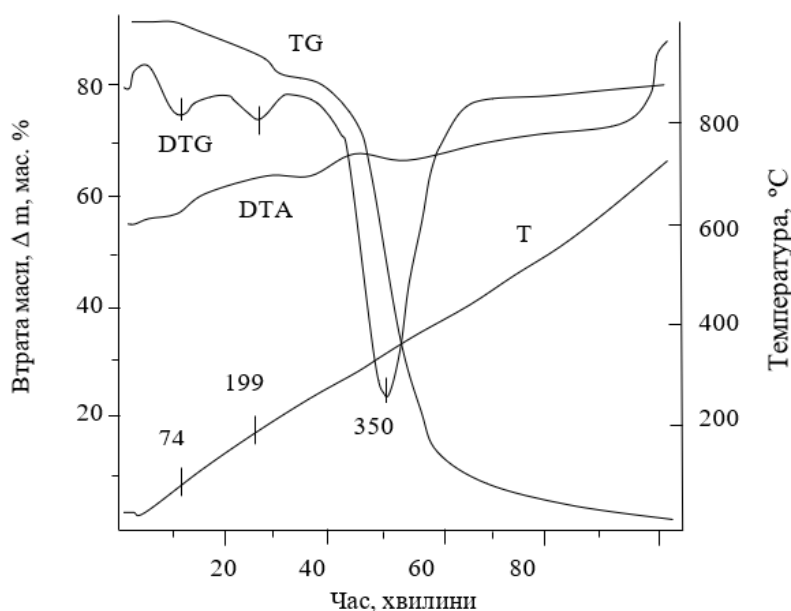


Рис. 2. Криві термогравіметричного аналізу для зразка № 1 – реакційного покриття: Т – крива температури; DT – крива втрати маси в залежності від росту температури; DTA – крива теплових ефектів; DTG – диференційна крива

У всіх зразках реакційного покриття за температур до 100 °С, відбуваються ендотермічні процеси, які супроводжуються втратою маси та зумовлені випаровуванням адсорбованої води без деструкції матеріалу зразків та інших легколетючих речовин. Ендотермічні ефекти в діапазоні температур 180–200 °С, пов'язані з плавленням поліфосфату амонію, перебудовою і дегідратацією пентаерітриту. У діапазоні температур 200–300 °С починає розкладатися пентаерітрит з утворенням альдегідів та

зароджується осередок пінококсу. При взаємодії меламіну з альдегідами утворюються метилол, похідні різного ступеня заміщення, а потім полімерно-олігомерні структури аміносмоли. Інтенсивне розкладання на аміак і поліфосфорну кислоту настає за температури приблизно 300–370 °С. Як видно з порівняння кривих ДТА, ендотермічні піки (плавлення кристалічних структур), що характеризують поліфосфати. Початок інтенсивних втрат маси збігається з температурою 320-330 °С, на який накладається сублімаційний пік меламіну, що починається за температури 330 °С. І, який завершується за температури понад 420 °С (за більш високих температур – після того, як величина відносної втрати маси вже досягла 60–70%).

З досліджень, наведених на рис.1, встановлено, що зразки реакційного покриття являють собою накопичення дрібнодисперсних рівновеличних речовин, оточених полімерним в'язким. Які під термічною дією розпочинають розкладатися, зокрема, поліфосфат амонію розкладається і виділяє фосфорну кислоту, що викликає дегідратацію пентаерітриту з утворенням сажі, а розклад меламіну супроводжується виділенням негорючих газів, які змушують сажу пінитися, тим самим утворюючи пінококс.

Встановлено механізм вогнезахисту деревини, який пов'язаний з розкладом антипіренів під дією температури з виділенням негорючих газів та утворенням важкогорючого коксового залишку. Так, при збільшенні вмісту поліфосфату амонію та пентаерітриту у реакційному покритті на 5%, кількість горючих газів знизилась у понад 11%, а кількість азоту підвищилась понад 10%. При збільшенні їх вмісту і на 14%, кількість горючих газів знизилась понад 2 рази, а кількість азоту підвищилась понад 1,45 рази. Це вплинуло також на утворення шару пінококсу, який зафіксовано при найменшому вмісті поліфосфату амонію на рівні 12 мм та підвищені для більших значень до 15,5 мм, а кратність піни підвищилась в 1,25 рази.

Практичне значення полягає в тому, що отримані результати враховано при розроблянні реакційного покриття.

Таким чином, є підстави стверджувати про можливість спрямованого регулювання процесу захисту деревини із застосування покриттів, здатних утворювати на поверхні захисний шар.

ЛІТЕРАТУРА

1. Tsapko, Y., Tkachenko, T., Tsapko, A., Likhnyovskyi, R., Sukhanevych, M., Bereznyska, Y., Prisyazhnuk, V., Klymas, R., Rotova, A. (2024). Defining patterns in the fire protection of wood with reactive coating. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (10 (132)), 55–63. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.317334>.

ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ ВОГНЕСТІЙКИХ БІОКОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ГІБРИДНОГО В'ЯЖУЧОГО

Юрій Цанко¹, Олексій Цанко¹, Оксана Бердник¹, Владислав Галица¹

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури
juriyts@ukr.net, aleks_workingmail@ukr.net, kseniareznik87@gmail.com,
halitsa.work@gmail.com*

Для розширення сфери застосування виробів із гіпсу було запропоновано включати до їх складу волокнисті матеріали, оскільки завдяки своїй твердості, довговічності та міцності можуть використовуватися для створення гіпсових композитів [1, 2]. Проте, проблема, яка досліджувалась, полягає у забезпеченні стійкості біокомпозитів на основі гіпсового в'язучого до зміни умов експлуатації. Це важливо, оскільки виробництво біокомпозитів з відновлюваних джерел для будівництва є актуальним.

Зразки біокомпозиту з деревної тирси і суміші гіпсу та інтумесцентного покриття на основі ПВА-дисперсії готувались методом формування у пластиковій формі розміром 130×84×12 мм. Для формування плит слугувала тирса деревини попередньо виготовлена з лісопильного виробництва висушена до вологості 10%. У якості в'язучого використовували інтумесцентне покриття на основі ПВА-дисперсії, яке розводили водою та додавали гіпсове в'язуче (рис. 1).



Рис. 1. Модельні зразки біокомпозиту з деревної тирси і суміші гіпсу та інтумесцентного покриття на основі ПВА-дисперсії

Процес займання та поширення полум'я біокомпозитом (рис. 2).

Дослідження показали, що біокомпозити відносяться до важкогорючих матеріалів, оскільки, під час температурного впливу не було зафіксовано горіння та тління, максимальна температура димових газів склала близько 84 °С.

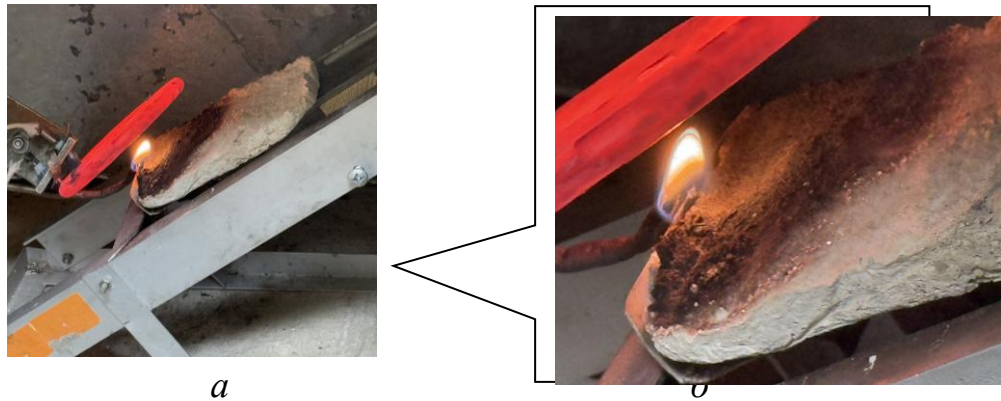


Рис. 2. Результати випробувань процесу займання та поширення полум'я біокомпозитом на гібридному в'язучому: *а* – термічна дія на зразок;
б – обвуглювання зразка

Результати досліджень з визначення приросту максимальної температури газоподібних продуктів горіння (Δt , °C) деревинного матеріалу, проведених у лабораторних умовах (рис. 3).

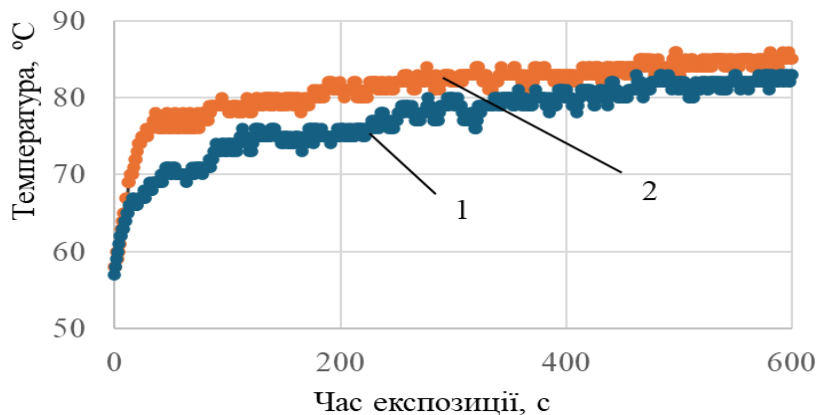


Рис. 3. Динаміка наростання температури димових газів при випробуваннях біокомпозиту: 1 – на гіпсовому в'язучому; 2 – на в'язучому з суміші гіпсу та інтумесцентного покриття на основі ПВА-дисперсії

При застосування гіпсового в'язучого на поверхні біокомпозиту утворилася негорюча структура, яка запобігла займанню зразка. Для біокомпозиту на в'язучому з суміші гіпсу та інтумесцентного покриття на основі ПВА-дисперсії (гібридне в'язуче) характерне утворення обвуглювання поверхні зразка, що запобігає його займанню. Окрім того, за результатами визначення процесу змочування біокомпозитів тестовими рідинами встановлено, що отримані тверді тіла відносяться до гідрофільних матеріалів, що мають високу змочуваність водою. Аналіз результатів експериментів з водопоглинання біокомпозитів показує, що максимальний

приріс маси біокомпозиту на гіпсовому в'язучому при дії вологи склав майже 27% і основний приріст вологи наступив у перші 5 діб експозиції. Приріст маси зразків біокомпозиту на гібридному в'язучому становив менше 10% за рахунок утворення оболонки на поверхні тирси.

Значення міцності біокомпозитів до стиску засвідчило, що зразок, сформований на гіпсовому в'язучому, є значно крихким. Проте, для біокомпозиту, сформованого на гібридному в'язучому межа міцності складає 1,88 МПа, яка забезпечується клейовими властивостями інтумесцентного покриття.

Таким чином, є підстави стверджувати про можливість ефективного створення експлуатаційно стійких біокомпозитів для будівництва.

ЛІТЕРАТУРА

1. Tsapko, Yu., Bondarenko, O., Tsapko, A. Effect of a flame-retardant coating on the burning parameters of wood samples. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 2. №2/10 (98) 2019. pp. 49-54. - ISSN 1729-3774. doi: 10.15587/1729-4061.2019.163591.

2. Tsapko, Y., Tsapko, A., Berdnyk, O., Likhnyovskyi, R., V. Halitsa, M. Sukhaneych, R. Klymas, V. Prisyazhnuk, P. Illiuchenko (2025). Establishing patterns in the formation of properties of fire-resistant biocomposites based on a hybrid binder. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (10 (138)), 39–47. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.348144>.

ОКРЕМІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ ВОГНЕСТІЙКИХ БІОКОМПОЗИТІВ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА

Юрій Цанко¹, Олексій Цанко¹, Оксана Бердник¹, Владислав Галица¹

¹Київський національний університет будівництва і архітектури
juriyts@ukr.net, aleks_workingmail@ukr.net, kseniarezniak87@gmail.com,
halitsa.work@gmail.com

Деревина є одним з найбільш поширених конструкційних матеріалів у сучасному будівництві. Проте, у процесі її обробки та під час будівництва споруд утворюється значна кількість відходів, таких як обрізки, стружка, тирса тощо. А властивість їх горіння потребує надійних заходів задля підвищення вогнестійкості. Тому проблема, на яку направлено дослідження, полягало у встановленні ефективності утворення теплоізоляційного спучуючого шару пінококсу при термічній дії на покриття, що ефективно гальмує вплив високої температури.

У результаті досліджень встановлено, що при оброблянні деревини вогнезахисними засобами виникають хімічні зв'язки, які характеризують симетричні і асиметричні валентні коливання С–Н в метильних та метиленових групах лігніну та целюлози. Під час визначення адгезійної

міцності полімерної оболонки на деревині, що оброблена спучуючим покриттям, становить 0,25 МПа, характер руйнування відбувся по полімерній оболонці з площею відриву близько 25%. Для стружкової плити, що оброблена спучуючим покриттям, значення адгезійної міцності становить близько 0,45 МПа, при цьому руйнування відбулося по полімерній оболонці з площею відриву близько 10%.

Досліджень з експериментального визначення групи горючості вогнестійких біокомпозитів (рис. 1-4).



Рис. 1. Процес горіння зразків біокомпозитів під час вогневого впливу



Рис. 2. Зразки біокомпозитів з деревини після термічної дії: 1 – МДФ, 2 – ДСП, 3 – деревина, 4 – фанера

При дії полум'я пальника на біокомпозит на основі брезентової тканини почалося інтенсивне спучення покриття, що призвело до утворення теплоізоляційного шару пінококсу величиною понад 20 мм, займання та поширення полум'я не відбулося

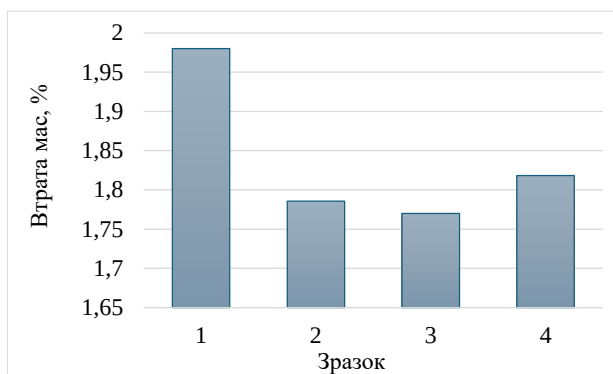


Рис. 3. Результати втрати маси зразків Δm , % біокомпозитів: 1 – фанера, 2 – ДСП, 3 – МДФ, 4 – деревина

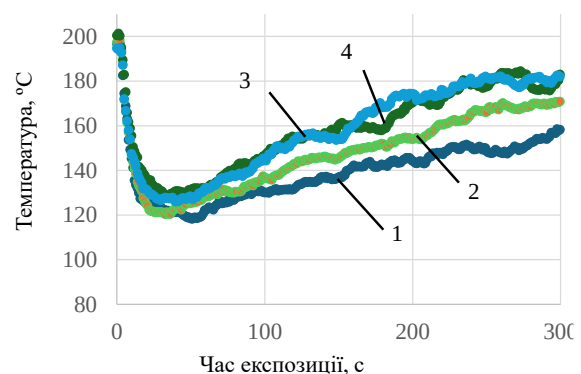


Рис. 4. Динаміка наростання температури димових газів при випробуваннях біокомпозитів: 1 – деревина, 2 – ДСП, 3 – МДФ, 4 – фанера

Дослідження показали, що при початковій температурі газоподібних продуктів горіння $T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$, при дії полум'я пальника на зразки вогнезахисних біокомпозитів, температура газоподібних продуктів горіння становила $T \leq 185\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ще більшу вогнестійкість показали результати втрати маси після термічної дії (рис. 3), що склало менше 2%.

Таким чином, за результатами досліджень встановлено, що при дії полум'я пальника температура газоподібних продуктів горіння не перевищила $185\text{ }^{\circ}\text{C}$, результати втрати маси склали менше 2%. Під час термічної дії покриття утворило шар пінококсу понад 20 мм. При дії полум'я пальника на біокомпозит почалося інтенсивне спучення покриття, що призвело до утворення теплоізоляційного шару пінококсу, займання та поширення полум'я не відбулося.

Проте, на відміну від результатів досліджень опублікованих в [1, 2], отримані дані щодо гальмування передачі температури до біоматеріалу та впливу спучуючого покриття на процес термостійкості з утворенням теплоізоляційного шару пінококсу, дозволяють стверджувати наступне:

- основним регулятором теплоізоляції є не стільки зміна напрямлення розкладу деревини у бік утворення негорючих газів і важкогорючого коксового залишку під впливом дії високої температури;

- суттєвий вплив на захист біокомпозитів під час застосування інтумесцентного покриття здійснюється при гальмуванні окислення у газовій і конденсованій фазах з утворенням на поверхні матеріалу теплозахисного шару коксу.

Отже встановлено, що механізм вогнезахисту інтумесцентним покриттям обумовлюється розкладом під дією температури з поглинанням тепла та виділенням негорючих газів; гальмування окислення в газовій і конденсованій фазі та утворенням на поверхні матеріалу теплозахисного шару коксу. Практична цінність дослідження полягає у тому, що отримані результати з визначення важкогорючих властивостей біокомпозитів, було враховано під час розроблення вогнестійких конструкцій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Tsapko, Y., Tsapko, A., Zhartovskyi, S., Likhnyovskyi, R., Kravchenko, M., Lialina, N., Berezovskyi, Y., Kaveryn, K., Sarapin, Y. [Текст]. Establishing fire protection patterns in wood using impregnation compositions from inorganic salts. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (10 (131)), 62–70. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313423>

2. Tsapko, Y., Tsapko, A., Likhnyovskyi, R., Sukhanevych, M., Zapolskiy, L., Illiuchenko, P., Bedratyuk, O. [Текст]. Establishing patterns in reducing fire-dangerous properties of sip panels fire-protected with reactive coating. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (10 (127)), 47–54. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298266>.

ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕРМОАКТИВНИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ (TABS)

Юрій Волох¹, Михайло Кириченко¹

*¹Київський національний університет будівництва та архітектури
volokh_yl-2024@knuba.edu.ua, kyrychenko.ma@knuba.edu.ua*

У контексті глобального переходу до будівель з близьким до нульового рівнем енергоспоживання (NZEB) та посилення вимог Директиви ЄС з енергоефективності будівель (EPBD Recast 2024), традиційні конвективні інженерні системи (VAV, VRF) наближаються до граничних показників своєї термодинамічної ефективності. На забезпечення мікроклімату в комерційній нерухомості припадає близько 40% загального енергоспоживання. Використання високопотенційних енергоносіїв для досягнення порівняно низьких температур у приміщенні (+20...+24°C) призводить до незворотного масивного зростання ентропії та зниження ККД. Альтернативним вектором є термоактивні будівельні системи (TABS), які трансформують монолітні залізобетонні конструкції у великомасштабні поверхні теплообміну випромінюванням.

Фундаментальним недоліком традиційних систем кондиціонування є використання повітря як первинного теплоносія. Через низьку густину ($\approx 1,2 \text{ кг/м}^3$), цей процес супроводжується значними втратами механічної енергії на роботу вентиляторів. Концепція TABS базується на масиві важкого залізобетону. Завдяки високій щільності (від 2400 кг/м^3), бетон здатний абсорбувати та довгостроково акумулювати теплову енергію (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняльна характеристика термофізичних властивостей акумулюючих середовищ

Тип середовища / теплоносія	Густина, (кг/м ³)	Об'ємна теплоємність (кДж/м ³ ·К)	Теплопровідність, (Вт/м·К)
Повітря (конвективні системи)	$\approx 1,2$	$\approx 1,2$	$\approx 0,026$
Залізобетон (перекриття TABS)	$\approx 2\,400$	$\approx 2\,000 - 2\,400$	$\approx 1,5 - 2,0$

Відповідно до регламентів міжнародних стандартів (ISO 7730, ASHRAE 55), детермінантою теплового комфорту є комплексна температура відчуття (Operative Temperature). Людина у стані спокою віддає понад 50-60% явного тепла шляхом довгохвильового інфрачервоного випромінювання. Оскільки швидкість повітря в приміщеннях з TABS не перевищує 0,2 м/с, вплив

температури оточуючих конструкцій стає рівноцінним впливу на людину температури повітря.

$$t_{op} \approx \frac{t_a + t_{mrt}}{2} \quad (1)$$

У літній період системи TABS дозволяють досягти нормативного теплового комфорту ($PMV \approx 0$) при зниженні температури поверхні перекриття $+20...+21^{\circ}\text{C}$ та одночасному підвищенні температури повітря до $+26...+27^{\circ}\text{C}$. Взимку навпаки температура повітря може бути знижена аналогічно. Цей температурний зсув на 2–4 К суттєво оптимізує термодинамічний цикл машин.

Ексергетичний аналіз (LowEx) доводить, що звуження температурного градієнта генерації забезпечує експоненційне зростання ефективності. У режимі опалення подача теплоносія $+28...+32^{\circ}\text{C}$ зумовлює зростання сезонного експлуатаційного коефіцієнта (COP) теплових насосів з 2,5–3,0 до 4,4–5,2. У режимі охолодження подача води $+16...+19^{\circ}\text{C}$ підвищує ефективність холодильних машин на 50–52% і дозволяє імплементувати технологію вільного охолодження (Free Cooling). Оскільки бетонні перекриття (TABS) повністю беруть на себе охолодження та нагрівання приміщення, центральна вентиляція використовується виключно для подачі свіжого повітря за санітарними нормами. Завдяки цьому об'єм повітря зменшується вдвічі, що, згідно із законами аеродинаміки, знижує споживання електроенергії вентиляторами аж у 8 разів.

Реалізація зазначеного термодинамічного потенціалу та безпечна експлуатація систем поверхневого теплообміну критично залежать від алгоритмів управління. Робота в режимі охолодження вимагає прецизійного контролю температури теплоносія для постійного моніторингу точки роси (уникнення конденсації) та швидкої адаптації до динамічних теплонапливів. Як доводять сучасні дослідження, імплементация інтелектуальних систем автоматизації є ключовим фактором, що не лише гарантує стабільне підтримання теплового комфорту у приміщенні, але й визначає фактичну енергоефективність усієї системи поверхневого охолодження.

Окремої уваги заслуговує кліматична стійкість будівель. Постійна часу будівлі з TABS становить десятки годин. В умовах екстремальних хвиль спеки та аварійних відключень енергопостачання (блекаутів), об'єкти з активними бетонними перекриттями демонструють безпрецедентну термічну стійкість, що відображено у результатах динамічного моделювання (рис. 1).

На відміну від конвективних систем, де порушення санітарних норм настає через 1,5–2 години після зупинки обладнання, будівля з TABS зберігає здатність пасивно поглинати тепло та підтримує допустиму температуру до $+27^{\circ}\text{C}$ протягом 6,5–8 годин.

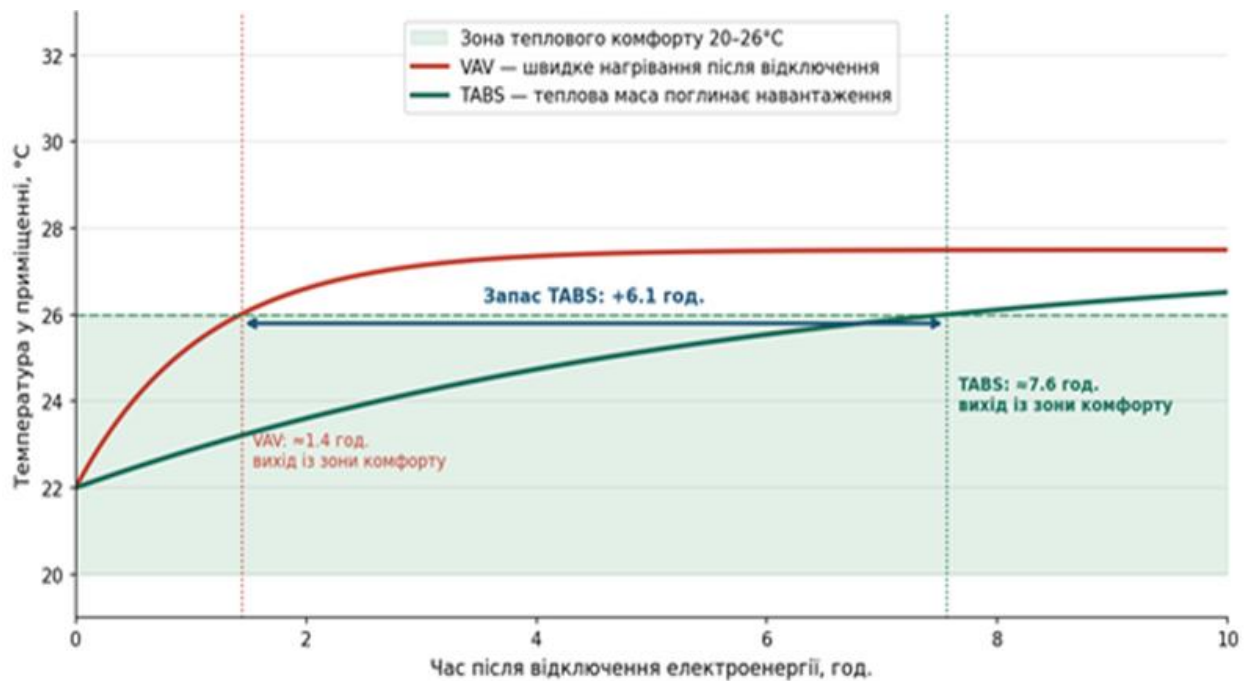


Рис 1. Стійкість будівлі до блекаутів: динаміка нагрівання приміщення (TABS порівняно з VAV)

Підсумковий енергетичний аналіз порівняння параметрів річного енергоспоживання (OPEX) та експлуатаційних переваг систем поверхневих систем порівняно з конвективними (VAV/VRF) наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Підсумкове порівняння річних енерговитрат та загальної ефективності (TABS vs. Конвективні системи)

№	Стаття енерговитрат / Параметр	Традиційні конвективні системи (VAV/VRF)	Термоактивні конструкції (TABS)	Загальна ефективність / Економія (%)
1	Генерація холоду (Літній період)	Подача води +7...+12°C. Високе навантаження на чилери	Подача води +16...+19°C. Активне використання Free Cooling	Зростання COP чилера на 50–52%
2	Генерація тепла (Зимовий період)	Подача теплоносія +50...+70°C. COP теплового насоса: 2,5–3,0	Подача теплоносія +28...+32°C. COP теплового насоса: 4,4–5,2	Зростання COP ТН до 70%
3	Транспортування повітря (Вентилятори)	Високий повітрообмін для зняття 100% явного тепла	Робота DOAS: об'єм повітря зменшено вдвічі (тільки санітарна норма)	Зниження витрат електроенергії на вентилятори до 87,5% (у 8 разів)
4	Пікові навантаження та стійкість	Пряма залежність: зупинка = перегрів за 1,5–2 год	Згладжування піків (Peak Shaving), стійкість до блекауту	Зниження встановленої потужності

№	Стаття енерговитрат / Параметр	Традиційні конвективні системи (VAV/VRF)	Термоактивні конструкції (TABS)	Загальна ефективність / Економія (%)
			6,5–8 год	генерації на 30–40%
5	Сукупне річне енергоспоживання (HVAC)	Базовий індикатор (100% витрат)	Комплексне використання технології LowEx	Скорочення загального OPEX на 40–55%

Таким чином, впровадження систем TABS є фундаментальним зсувом у парадигмі інженерного проектування енергоефективних будівель. Нівелювання конвективної передачі тепла усуває локальні протяги та радіаційну асиметрію, а синергія ексергетичної оптимізації та високої теплової інерції робить TABS об'єктивною складовою сталого енергонезалежного будівництва. Сучасна автоматизація та предиктивне керування є невід'ємними компонентами для розкриття повного потенціалу таких систем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Babiak J., Olesen B. W., Petras D. Low temperature heating and high temperature cooling. REHVA Guidebook No. 7. Brussels: REHVA, 2009. 84 p.
2. ISO 7730:2005. Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using the PMV and PPD indices. Geneva: International Organization for Standardization, 2005.
3. Sourbron M., Helsen L. Evaluation of energy efficiency and comfort of thermally activated building systems (TABS). Energy and Buildings. 2011. Vol. 43, Issue 8. P. 1779-1785.
4. Волох, Ю., Кириченко, М. (2025). Вплив системи автоматизації на ефективність поверхневого охолодження при створенні теплового комфорту. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, 54, 30–38.
5. Погосов, О., Скочко, В., Солонніков, В., Кириченко, М. та Чепурна, Н. (2024). Огляд та концепція пасивного індивідуального житлового будівництва для помірно-континентального клімату. Архітектурні дослідження, 10(2), 14-24.
6. Дорошенко, А., & Кириченко, М. (2024). Дослідження лінійних неоднорідних включень зони примикання до несучої плити для будівель з металокаркасу. Матеріали конференцій МНЛ, (26 квітня 2024 р., м. Одеса), 288–291.
7. Шаповал, О., Чепурна, Н., & Кириченко, М. (2021). Аналіз ефективності роботи повітряного теплового насоса залежно від коливань температури зовнішнього повітря. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, 37, 24–30.
8. Podenezhko, Y., Kirichenko, M., Cherpurna, N., & Cherpurnyi V.

(2019). Дослідження опалювальних приладів на основі фазового переходу першого роду. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, (31), 63–70..

9. Дорошенко , А., & Пасічник , П. (2025). Особливості застосування низькотемпературних променевих внутріньобудинкових систем опалення в розрізі їх експлуатації. Матеріали конференцій МЦНД, (02.05.2025; Івано-Франківськ, Україна), 398–402.

10. Погосов , О., Пасічник , П., & Кулінко , Є. (2023). Вплив деяких проектних рішень на клас енергетичної ефективності будівлі. Collection of Scientific Papers «SCIENTIA», (December 22, 2023; Coventry, UK), 214–217.

11. Погосов, О., Кулінко, Є., Козячина, Б., Кольчик, М. (2025). Аналіз та шляхи розвитку українського законодавства у сфері вимог до енергоефективності будівель. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, 55, 33–46.

ОСОБЛИВОСТІ БУДІВНИЦТВА ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ СИСТЕМ З ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ З ВІДХОДІВ У МЕЖАХ ТЕХНОЛОГІЇ "WASTE-TO-ENERGY" В СУЧАСНИХ УМОВАХ ОТГ

Дмитро Прусов¹, Денис Яловий², Генріх Кравченко²

*¹Інститут інноваційної освіти Київського національного університету
будівництва і архітектури, dmytro.prusov@iino.in.ua;*

*²Українська асоціація альтернативної електро та водневої енергетики,
info@uaaeh.org*

Актуальність та стратегічне значення для територіальних громад. У сучасних умовах трансформації енергетичного сектору України та глобального курсу на декарбонізацію, будівництво децентралізованих систем класу "Waste-to-Energy" (WtE) перестає бути суто технологічним питанням і переходить у площину стратегічної безпеки територіальних громад [1, 2]. Перехід від централізованої моделі до локальних енергетичних вузлів, що працюють на ресурсах громади, є єдиним дієвим механізмом забезпечення стійкості в умовах воєнних та економічних викликів.

Стратегічне значення децентралізації полягає у створенні так званих "енергетичних островів". Замість повної залежності від великих ТЕЦ та магістральних мереж, об'єднані територіальні громади (ОТГ) отримують автономне джерело генерації, здатне підтримувати роботу критичної інфраструктури — лікарень, водоканалів та соціальних об'єктів у режимі 24/7. На відміну від сонячної чи вітрової енергетики, термічна утилізація відходів забезпечує стабільне базове навантаження, що є критичним для стабілізації локальних мереж.

Для об'єднаних територіальних громад впровадження WtE-систем вирішує комплекс критичних потреб: Дефіцит земельних ресурсів та критичний стан існуючих сміттєзвалищ вимагають радикальних рішень.

Технологія WtE дозволяє скоротити обсяг відходів, що потребують захоронення, на 90%, фактично зупиняючи розростання полігонів та мінімізуючи викиди метану (агресивного парникового газу). Громада трансформується з "території зі звалищем" на екологічно безпечну зону. Сьогодні більшість громад витрачають значні кошти на логістику відходів до віддалених полігонів та на закупівлю природного газу для опалення. Будівництво локальної станції WtE докорінно змінює цю парадигму. З огляду на логістичну оптимізацію, коротке плече перевезення сміття всередині ОТГ суттєво економить бюджетні кошти. Вирішується проблема імпортозаміщення, оскільки кожна тонна відходів, перетворена на енергію, заміщує еквівалент до 300 м³ дорогого природного газу, забезпечуючи громаду власним дешевим теплом. Крім цього, наявність гарантованого джерела теплової енергії та стабільної електрики робить громаду привабливим майданчиком для промислових інвесторів, агропереробних комплексів та тепличних господарств, що генерує нові робочі місця та податки. Впровадження таких проєктів є індикатором готовності ОТГ до євроінтеграції [3]. Це відкриває доступ до міжнародних "зелених" грантів та фондів відновлення, які фінансують виключно проєкти з високим рівнем екологічної відповідальності та енергоефективності.

Будівництво децентралізованих систем WtE в сучасних умовах — це шлях до перетворення проблеми відходів на стратегічний актив громади. Результатом для ОТГ стає не лише чисте довкілля, а й енергетична незалежність, економічна стійкість та новий рівень якості життя мешканців, оскільки децентралізована система WtE — це перетворення пасивної статті витрат на активний ресурс, що є переходом від лінійної моделі споживання до циркулярної економіки, де відходи є не тягарем, а паливом для розвитку.

Енергетична безпека та екологічні стандарти в будівництві децентралізованих WtE-систем.

В умовах сучасних загроз цілісності енергосистеми, децентралізовані об'єкти "waste-to-energy" виступають фундаментом локальної енергетичної безпеки. На відміну від великих генеруючих потужностей, які є вразливими цілями, мережа малих WtE-станцій створює розподілену систему, яку неможливо вивести з ладу одним ударом. Об'єкти WtE забезпечують стабільне виробництво енергії незалежно від погодних умов чи наявності імпортованого газу, що дозволяє підтримувати живучість регіональних енерговузлів. Використання відходів як палива нівелює ризики, пов'язані з розривом ланцюжків постачання традиційних енергоносіїв.

Сучасні умови будівництва вимагають безкомпромісного дотримання найвищих екологічних стандартів (зокрема Директив ЄС про промислові викиди). Стратегічне значення WtE полягає в радикальному зменшенні екологічного тиску на регіон. Запобігання потраплянню органіки на полігони дозволяє уникнути неконтрольованого утворення метану та фільтрату, що отруює підземні води. Будівництво децентралізованих систем

передбачає використання інтегрованих систем сухої та мокрої газоочистки, що гарантує рівень викидів значно нижчий, ніж у традиційних вугільних ТЕС. Це дозволяє безпечно розташовувати такі об'єкти в безпосередній близькості до споживачів (міст).

За рахунок заміщення викопного палива відходами, громада отримує "зелену" складову у своєму енергобалансі. Сучасні технології дозволяють використовувати інертний залишок (шлак), що утворюється після спалювання, як матеріал для будівництва, забезпечуючи концепцію "нульових відходів". Реалізація децентралізованих WtE-проектів дозволяє громадам та державі в цілому виконувати міжнародні зобов'язання щодо скорочення викидів CO₂.

Особливістю будівництва в сучасних умовах є цифровізація екологічного контролю. Впровадження автоматизованих систем моніторингу викидів (CEMS) забезпечує прозорість роботи станції для громадськості. Це знімає соціальну напругу та гарантує, що енергетична безпека не досягається ціною екологічного благополуччя.

Отже, енергетична безпека та екологічні стандарти в децентралізованих WtE-системах є нерозривними. Стратегічний результат полягає у створенні системи, де безпека енергопостачання досягається через високу екологічну відповідальність, перетворюючи потенційну загрозу (відходи) на гарантований та чистий енергетичний ресурс.

Особливості технологій проектування, будівництва та експлуатації децентралізованих WtE-систем у сучасних умовах

Сучасне проектування децентралізованих об'єктів базується на принципі модульності. На відміну від гігантських заводів минулого, сучасні системи проектуються як масштабовані одиниці, що дозволяє громадам нарощувати потужності поступово. На етапі проектування критично важливим є врахування змінної морфології сміття. Пріоритет надається колосниковим решіткам з високою термічною стійкістю або системам низькотемпературного піролізу для невеликих обсягів. Використання BIM-технологій при проектуванні дозволяє створити віртуальну модель об'єкта, що мінімізує помилки при монтажі та дозволяє заздалегідь прорахувати логістику палива та вихід енергії.

В умовах нестабільності логістичних ланцюгів, будівництво децентралізованих систем фокусується на префабрикації. Для малих територіальних громад використовуються установки блочно-контейнерного типу, які потребують мінімальних загальнобудівельних робіт і можуть бути введені в експлуатацію протягом 6–10 місяців. Проектування передбачає підвищений захист енергоблоків та використання матеріалів, стійких до агресивних середовищ (корозія від димових газів), що подовжує термін експлуатації до 25–30 років без капітального ремонту.

Особливістю експлуатації в сучасних умовах є перехід від ручного контролю до повністю автоматизованих систем керування технологічними

процесами. Впровадження нейронних мереж для оптимізації процесу горіння в режимі реального часу. Система автоматично регулює подачу повітря та температуру залежно від теплотворної здатності палива, що подається. Децентралізовані об'єкти проєктуються з можливістю віддаленого контролю. Це критично для громад, які можуть не мати вузькопрофільних спеціалістів на місцях – сервісна підтримка та діагностика можуть здійснюватися централізовано через хмарні платформи. Експлуатаційна модель обов'язково передбачає одночасне виробництво електрики та тепла. Використання скидної теплоти для місцевих потреб (опалення, сушіння агропродукції) піднімає загальний ККД системи до 85–90%.

У сучасних умовах особлива увага приділяється автономності систем безпеки. Кожен об'єкт оснащується незалежними джерелами живлення для систем газоочистки та аварійного зупинення, що гарантує екологічну безпеку об'єкта навіть у разі повного блекауту зовнішніх мереж. Отже, сучасний підхід до будівництва WtE-об'єктів – це симбіоз компактності, інтелектуального управління та гнучкості. Технологія перестає бути громіздкою індустріальною спорудою, перетворюючись на високотехнологічний ІТ-керований "енергетичний гаджет" громади, який легко інтегрується в міське середовище та не потребує величезного штату обслуговування.

Технології проєктування, будівництва та експлуатації WtE-систем: український контекст та перспектива.

В Україні морфологія відходів суттєво відрізняється від країн ЄС через менший рівень попереднього сортування та високу вологість органіки. Проєктування має базуватися на технологіях, що витримують коливання теплотворної здатності. Це дозволяє спалювати залишки без дорогої попередньої підготовки. У сучасних умовах проєкти мають передбачати децентралізоване розміщення вузлів керування та можливість роботи в режимі самозапуску об'єкта без зовнішньої напруги. Перехід до модульного проєктування, де потужність станції може нарощуватися паралельно з ростом громади або промислового кластеру.

Основний виклик України в сучасних умовах – необхідність швидких рішень для заміщення зруйнованих потужностей. Стратегічним пріоритетом є залучення українських машинобудівних підприємств для виготовлення металоконструкцій, котлів-утилізаторів та систем фільтрації. Це знижує вартість проєкту та спрощує подальше обслуговування. Використання блочно-модульних конструкцій дозволяє скоротити термін будівництва з типових 3–4 років до 18–24 місяців, що критично для об'єктів критичної інфраструктури, які терміново потребують безперебійного постачання електро- та теплоенергії вже сьогодні. Створення мережі типових малих WtE-об'єктів (до 5 МВт), що дозволить стандартизувати будівництво та знизити витрати на проєктування. Отже для українських ОТГ WtE-об'єктами

мають бути невеликі, захищені, цифровізовані вузли, які максимально використовують місцевий ресурс і працюють у тісній зв'язці з локальною економікою, та стануть ефективною мережею енергетичних центрів громад.

ЛІТЕРАТУРА

1. Закон України від 20.06.2022 №2320-ІХ. "Про управління відходами"
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20>
2. Державна стратегія регіонального розвитку на 2021-2027 роки (зі змінами від 2024 р. щодо енергетичної децентралізації).
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/695-2020-п>
3. Посібник з розробки місцевого плану управління відходами територіальної громади (Видання U-LEAD, 2025).
<https://decentralization.ua/news/19338>

ВПЛИВ ОКСИГЕНІЗАЦІЇ ДУТТЬОВОГО ПОВІТРЯ НА СКЛАД ПРОДУКТІВ ЗГОРАННЯ ВУГІЛЛЯ В ПРОМИСЛОВИХ ПАРОГЕНЕРАТОРАХ

Павло Гламаздін¹, Євген Вакуленко¹

*¹Київський національний університет будівництва та архітектури,
sib.kiev@gmail.com, eugenvak@ukr.net*

Теплова енергетика залишається одним із ключових секторів виробництва електричної та теплової енергії в Україні. За даними Міністерства енергетики України, частка вугільних теплових електростанцій у загальному балансі електрогенерації традиційно перевищує 29 % [1]. Незважаючи на поступовий розвиток відновлювальних джерел енергії, вугільні ТЕС та ТЕЦ ще тривалий час залишатимуться базовими об'єктами енергетичної інфраструктури країни.

Спалювання вугілля супроводжується викидами цілої низки забруднюючих речовин: оксидів сірки, оксидів азоту, твердих частинок, важких металів та парникових газів. Серед них оксиди сірки посідають особливе місце з огляду на їх багатокомпонентний негативний вплив: токсичну дію на здоров'я людини, кислотні дощі, корозійне руйнування конструкцій та прискорення деградації ґрунтів і водних екосистем [2].

Перехід до технологій збагаченого киснем дуття (oxy-fuel combustion або часткове збагачення) відкриває можливості для підвищення ефективності спалювання палива та скорочення об'єму димових газів. Водночас зростання концентрації кисню у дуттьовому повітрі зумовлює якісні зміни у хімічному складі продуктів горіння - зокрема, збільшення частки триоксиду сірки SO₃ який замінює SO₂, що ускладнює як технічну експлуатацію котельного обладнання, так і дотримання екологічних нормативів. Сірка є одним із найпоширеніших гетероеlementів вугілля. При

спалюванні вугільного палива сірка зазнає термохімічних перетворень, внаслідок яких утворюється цілий спектр сполук. Основними газоподібними продуктами окиснення сірки є:

- діоксид сірки (SO_2) - основна сірчаста сполука, що утворюється при згорянні органічної та піритної форм сірки, є токсичним газом із різким запахом, подразнює дихальні шляхи. ГДК у повітрі населених пунктів становить $0,05 \text{ мг/м}^3$ (добова) [3];

- триоксид сірки (SO_3) - утворюється у незначній кількості при каталітичному окисненні SO_2 за участю п'ятиокису ванадію, що містяться у летких золах, а також при підвищених температурах та концентраціях кисню; SO_3 значно токсичніший за SO_2 , є гігроскопічним і швидко взаємодіє з вологою повітря, утворюючи аерозолі сірчаної кислоти H_2SO_4 (ГДК $0,003 \text{ мг/м}^3$);

- сірководень (H_2S) - може утворюватися у відновній атмосфері при неповному згорянні і є вкрай токсичним газом (ГДК $0,008 \text{ мг/м}^3$), проте при нормальних умовах спалювання в атмосфері надлишку дуттьового повітря його частка мінімальна;

- сульфатні аерозолі - продукти взаємодії SO_3 з вологою та іншими речовинами [сульфат амонію $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, сульфат кальцію CaSO_4 та ін.], що формують зважені частинки субмікронного діапазону.

З екологічного та санітарно-гігієнічного погляду найбільш небезпечним є SO_3 та продукт його гідратації - сірчана кислота H_2SO_4 . Крапельний аерозоль H_2SO_4 має виражену фіброгенну та канцерогенну дію, уражає альвеолярну тканину легень. За класифікацією IARC (Міжнародне агентство з дослідження раку), аерозолі неорганічних кислот, що містять сірчану кислоту, належать до групи 1 (доведені канцерогени) [4].

Діоксид сірки SO_2 при взаємодії з атмосферною вологою та окисниками (озоном, перекисом водню) перетворюється на H_2SO_4 , яка є головним компонентом «кислотних дощів». Кислотні опади із $\text{pH} < 5,6$ спричиняють підкислення ґрунтів, мобілізацію важких металів (Al, Mn, Cd), деградацію лісових масивів та закислення водойм [5]. За різними оцінками, збиток від кислотних дощів для сільського та лісового господарства Центральної і Східної Європи щорічно становить мільярди євро [5].

Крім того, SO_2 та SO_3 вступають у реакції з оксидами азоту, формуючи фотохімічний смог - вторинне забруднення атмосфери, надзвичайно шкідливе для здоров'я населення міських агломерацій [3].

Вугільні родовища України зосереджені переважно у Донецькому та Львівсько-Волинському вугільних басейнах, а також представлені буровугільними родовищами Дніпровського басейну. Кожна марка вугілля характеризується специфічним вмістом і формами сірки.

Загальна сірка у вугіллі включає три форми: органічну (S_o), піритну (S_p) та сульфатну (S_c). Органічна сірка хімічно зв'язана з вуглецевою матрицею вугілля і є найважчою для видалення при підготовці палива. Піритна сірка

присутня у вигляді кристалів пірит-марказиту (FeS_2) та частково видаляється гравітаційним збагаченням. Сульфатна сірка (переважно CaSO_4) присутня в незначних кількостях і практичного екологічного значення не має [6].

Антрацит (марка АШ) відзначається найнижчим вмістом загальної сірки серед твердого вугілля - $0,5 \div 1,5$ %. Це пов'язано з високим ступенем метаморфізму та вимиванням частини сірчистих сполук у процесі геологічного перетворення вугілля [6]. Антрацит Донецького басейну є найбільш поширеним видом палива для вітчизняних ТЕС.

Таблиця 1

Вміст та форми сірки у вугіллі різних марок родовищ України [6, 7]

Марка вугілля	Загальна S, %	Органічна S, %	Піритна S, %	Сульфатна S, %
Антрацит (АШ)	$0,5 \div 1,5$	$0,3 \div 0,9$	$0,1 \div 0,5$	$0,01 \div 0,05$
Газове (Г)	$1,5 \div 3,5$	$0,8 \div 2,0$	$0,5 \div 1,2$	$0,05 \div 0,15$
Буре (Б)	$2,0 \div 5,0$	$1,0 \div 3,0$	$0,5 \div 1,5$	$0,1 \div 0,3$

Газове вугілля (марка Г) характеризується значно вищим вмістом сірки - від 1,5 до 3,5 %. Підвищений вміст органічної сірки обумовлений меншим ступенем метаморфізму та збереженням первинних сірковмісних органічних структур [7].

Буре вугілля (марка Б) має найвищий вміст сірки - до 5 % та вище (особливо для деяких родовищ Придніпровського басейну). Висока вологість бурого вугілля та наявність значної кількості сульфатів у золі додатково ускладнюють проблему контролю викидів SO_2 при його спалюванні [7].

Для зниження викидів оксидів сірки в енергетиці застосовується комплекс технологій, що умовно можна поділити на три групи [8]:

1. Попередня підготовка палива. Включає гравітаційне та флотаційне збагачення вугілля з частковим видаленням піритної сірки, термічне оброблення (десульфуризація у псевдозрідженому шарі), а також мікробіологічне вилуговування сірки. Ці методи ефективні переважно для піритної форми сірки і не забезпечують повного видалення органічної сірки [9].

2. Технологічні методи (первинні заходи). Передбачають оптимізацію процесу горіння: рециркуляцію димових газів, спалювання у циркулюючому псевдозрідженому шарі (ЦПШ) з вапняковими сорбентами. Метод ЦПШ забезпечує до 90–95 % зв'язування SO_2 безпосередньо у топці при температурах 850–900 °C [9].

3. Хвостова обробка димових газів (ДГ). Найбільш поширеними є: мокра вапнякова десульфуризація (Wet FGD) - уловлення SO_2 вапняковою

суспензією з утворенням гіпсу (ефективність до 98 %); мокро-суха абсорбція та суха адсорбція; метод активованого вугілля. Ці системи є стандартними для великих енергоблоків потужністю понад 100 МВт [10].

Останнім часом досить активно проводяться дослідження з окиснення дуттьового повітря дуттьового повітря, коли в його складі вміст кисню штучно збільшується до 40% замість звичайних 21% в залежності від складу палива. В зв'язку з перспективністю цього методу з точки зору термотехнологій [11,12,13] виникає необхідність розглянути поведінку сірки в таких умовах.

Оскільки в умовах окиснення дуттьового повітря підвищується температура, а також топкове середовище стає реактивним, то вочевидь перехід в продуктах згорання від діоксиду сірки SO_2 до триоксиду SO_3 прискорюється.

У топковому просторі при температурах вище 900 °C конверсія SO_2 у SO_3 незначна, однак при зниженні температур у конвективних поверхнях нагріву (400–700 °C) реакція каталітичного окиснення:



активізується за участю оксидів ванадію та заліза, що входять до складу летких зол. Підвищена концентрація O_2 у димових газах прискорює цю реакцію, і частка конверсії $\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_3$ зростає з типових 1–3 % (при звичайному повітрі) до 5÷8 % і більше при вмісті O_2 понад 25 % [14].

Триоксид сірки у присутності водяної пари утворює сірчаноокислотний туман, що конденсується на холодних поверхнях при температурі нижче точки роси (кислотна точка роси). Температура кислотної точки роси суттєво вища, ніж водяної пари, і при типових концентраціях SO_3 5÷30 мг/м³ становить 120–160 °C [14]. Конденсація H_2SO_4 спричиняє низькотемпературну сірчаноокислотну корозію хвостових поверхонь нагріву (повітропідігрівачів, економайзерів), що різко скорочує термін їх служби - з 15–20 до 3–7 років. [14]

На відміну від SO_2 , що відносно повільно синтезуються в атмосфері, SO_3 миттєво утворює сульфатний аерозоль H_2SO_4 у момент контакту з атмосферною вологою. Ці субмікронні частинки ($d < 1$ мкм) надзвичайно стійкі у повітрі, мають тривалий час седиментації і здатні проникати глибоко у дихальні шляхи. Крім того, аерозолі H_2SO_4 є ядрами конденсації для формування вторинного органічного аерозолу, що погіршує видимість (ефект димки) та посилює токсичну дію фотохімічного смогу [4, 15].

Традиційна стратегія захисту хвостових поверхонь нагріву від сірчаноокислотної корозії полягає у підтриманні температури димових газів на виході вище кислотної точки роси. Це, однак, означає значні тепловтрати з відхідними газами і фізичний викид SO_2 та SO_3 в атмосферу. Принципово іншим підходом може стати навмисний перехід котла у конденсаційний режим, при якому температура димових газів у кінці конвективної частини знижується нижче точки роси водяного пару і тим більше - нижче кислотної

точки роси.

У цьому режимі в хвостовому конденсаторі відбувається одночасна конденсація водяного пару та кислот сірки: сірчаної кислоти H_2SO_4 , а також сірчистої кислоти H_2SO_3 (утворюється при розчиненні SO_2 у конденсаті). Конденсація відбувається на спеціалізованих теплообмінних поверхнях, що вимагає застосування корозійностійких матеріалів.

Основна проблема конденсаційного режиму - агресивний вплив кислого конденсату (рН 1÷3) на матеріал труб. Традиційна вуглецева сталь кородує зі швидкістю 2÷5 мм/рік у таких умовах, що робить її експлуатаційно непридатною [10]. Рішенням є застосування:

- корозійностійких нержавіючих сталей марок AISI 316L, Incoloy 825 (з підвищеним вмістом Ni, Mo, Cr) - забезпечують термін служби понад 20 років у сірчано-кислотному конденсаті при концентраціях до 70 % H_2SO_4 ;
- фторопластових (PTFE) або полімерних труб із термостійких пластиків (PPS, PVDF) - витримують температури до 150–180 °C та є хімічно інертними до будь-яких кислот; мають суттєво нижчу вартість у порівнянні зі спеціальними сплавами і легші в монтажі.

Перехід до конденсаційного режиму при використанні збагаченого киснем дуття дає комплекс переваг.

Полегшення очищення димових газів. Конденсація SO_3 та H_2SO_3 безпосередньо у хвостовому конденсаторі дозволяє вилучити значну частку кислот сірки з газового потоку до того, як він потрапляє у систему мокрої десульфуризації. Це знижує навантаження на скрубери та FGD-установки, підвищує їх ефективність і зменшує витрати реагентів (вапняку, вапна).

Нейтралізація кислот та отримання хімічно очищеної води. Кислий конденсат (розчин $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_3$ з домішками важких металів та хлору) підлягає нейтралізації лужними розчинами (NaOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Na_2CO_3). При правильно організованому процесі нейтралізації та фільтрації одержана вода задовольняє вимогам до підживлювальної води для систем теплопостачання або технічної води підприємства. Таким чином, сірчані кислоти, що є відходом, перетворюються на корисний продукт - хімічно очищену воду.

Додаткова утилізація теплоти. Конденсація водяної пари вивільняє значну кількість прихованої теплоти пароутворення ($r = 2257$ кДж/кг). Ця теплота може бути передана мережній воді, що повертається з системи теплопостачання. В результаті коефіцієнт використання палива котла за нижчою теплоотою згоряння може досягати 97-98%, що характерно для конденсаційних котлів які працюють на природному газі [10].

Утворення сульфату кальцію. При нейтралізації конденсату вапняком $\text{Ca}(\text{OH})_2$ утворюється гіпс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - цінний будівельний матеріал, що є товарним продуктом мокрої FGD-десульфуризації на провідних ТЕС Європи. Відповідно, промислова реалізація конденсаційного режиму може формувати додатковий дохід.

Аналіз технологічних і екологічних аспектів спалювання вугільного палива дозволяє сформулювати такі узагальнення. Спалювання вугілля є одним із основних джерел викидів сірчистих сполук в атмосферу. Найбільш небезпечними забруднювачами є SO_2 , SO_3 та аерозолі сірчаної кислоти H_2SO_4 , що спричиняють токсичний вплив на людину, кислотні дощі та деградацію екосистем. Різні марки вугілля характеризуються різним вмістом сірки: антрацит (АШ) містить 0,5–1,5 %, газове вугілля (Г) - 1,5–3,5 %, буре вугілля (Б) - до 5 % і вище.

Технологія вдування збагаченого киснем повітря має значний потенціал для підвищення ефективності теплових електростанцій: підвищується температура у топці, збільшується ступінь вигорання палива, скорочується механічний недопал та зменшується питомий об'єм димових газів. Це забезпечує зростання ККД котельного агрегату на 1,5–3,0 % (абс.). Разом із тим, підвищення концентрації O_2 у повітрі горіння призводить до зростання частки конверсії SO_2 у SO_3 до 5–8 %. Це підвищує кислотну точку роси, посилює ризик сірчано-кислотної корозії обладнання та збільшує емісію токсичного сульфатного аерозолу в атмосферу.

Розв'язання зазначеного протиріччя досягається шляхом перевodu котла у конденсаційний режим роботи: навмисної конденсації кислот сірки у хвостовому конденсаторі з корозійностійких матеріалів (нержавіюча сталь, фторопластові або термостійкі полімерні труби). Це дозволяє: (а) знизити навантаження на FGD-установки та скоротити витрати реагентів; (б) нейтралізувати кислоти лугом і отримати хімічно очищену воду, придатну для підживлення мереж теплопостачання або технічних потреб; (в) додатково утилізувати приховану теплоту конденсації водяної пари, підвищуючи загальний тепловий ККД.

Комплексне застосування збагаченого киснем дуття у поєднанні з конденсаційним режимом є перспективним напрямом модернізації вугільних ТЕС України, що одночасно підвищує енергетичну ефективність, знижує собівартість очищення димових газів та зменшує екологічне навантаження на навколишнє середовище.

ЛІТЕРАТУРА

1. International Energy Agency. Ukraine Energy Profile / Energy Security. Paris : IEA, 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/ukraine-energy-profile/energy-security> (дата звернення: 01.03.2025).
2. Варламов Г. Б., Любчик Г. М., Маляренко В. А. Теплоенергетичні установки та екологічні аспекти виробництва енергії : підручник. Київ : Видавництво «Політехніка», 2003. 232 с. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/11315104.pdf>.
3. Seinfeld J. H., Pandis S. N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. 3rd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2016. 1152 p. ISBN 978-1-118-94740-1.

4. IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans. Volume 54: Occupational Exposures to Mists and Vapours from Strong Inorganic Acids. Lyon : IARC Press, 1992. URL: <https://monographs.iarc.who.int> (дата звернення: 05.03.2025).
5. Likens G.E., Bormann F.H. Acid rain: a serious regional environmental problem. *Science*. 1974. Vol. 184, No. 4142. P. 1176–1179.
6. Саранчук В. І., Ільяшов М. О., Ошовський В. В., Білецький В. С. Основи хімії і фізики горючих копалин : підручник. Донецьк : Східний видавничий дім, 2008. 600 с. ISBN 978-966-317-024-4.
7. Sachsenhofer R. F., Privalov V. A., Panova E. A. Basin evolution and coal geology of the Donets Basin (Ukraine): An overview. *International Journal of Coal Geology*. 2012. Vol. 89. P. 26–40. DOI: 10.1016/j.coal.2011.07.010.
8. Вольчин І. А., Гапонич Л. С., Згоран І. П. Вибір технології десульфуризації димових газів для українських вугільних теплових електростанцій. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2018. Т. 24, № 4. С. 154–168.
9. Малярєнко В. А. Енергетичні установки. Загальний курс : навчальний посібник. 2-ге вид. Харків : Видавництво САГА, 2008. 320 с. ISBN 978-966-2918-54-0.
10. Sarbassov Y., Duan L., Manovic V., Anthony E. J. Sulfur trioxide formation/emissions in coal-fired air- and oxy-fuel combustion processes: a review. *Greenhouse Gases: Science and Technology*. 2018. Vol. 8, No. 3. P. 402–428. DOI: 10.1002/ghg.1767. URL: <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/items/2e30353f-6b9f-4893-9bf6-8c5e5d6fd50a>
11. Гламаздин П.М., Дяченко А.А. Збагачення киснем дуттьового повітря для підвищення енергоефективності енергетичних парогенераторів: Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 2021. – 8с.
12. Вакуленко Є. С. Підвищення ефективності спалювання непроектного палива шляхом збагачення киснем дуттьового повітря. *Енергія. Ресурси. Екологія*. 2024. Т. 1, № 2. С. 39–41.
13. Гламаздин П. М., Вакуленко Є. С. Проблема використання непроектного вугільного палива в парових енергетичних парогенераторах. *Енергія. Ресурси. Екологія*. 2025. Т. 1, № 4.
14. Fleig D., Andersson K., Normann F., Johnsson F. SO₃ formation under oxyfuel combustion conditions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011. Vol. 50, No. 14. P. 8505–8514. DOI: 10.1021/ie2005274.
15. Fleig D., Andersson K., Johnsson F. Influence of operating conditions on SO₃ formation during air and oxy-fuel combustion. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2012. Vol. 51, No. 28. P. 9483–9491. DOI: 10.1021/ie301303c.

ВИКОРИСТАННЯ ІІІ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ МІСЬКИХ МЕРЕЖ В УМОВАХ ВІЙСЬКОВОГО ЧАСУ

Володимир Запальський

*ВСП Миколаївський будівельний фаховий коледж КНУБА,
mbkzapalskyi@gmail.com*

В умовах воєнного часу функціонування міської енергетичної інфраструктури (МЕІ) стикається з безпрецедентними викликами, пов'язаними з пошкодженням об'єктів енергосистеми, нестабільністю генерації та різкими коливаннями параметрів електроенергії. У таких умовах особливої актуальності набуває впровадження інтелектуальних технологій управління МЕІ, здатних адаптуватися до обстановки, що динамічна змінюється.

Використання методів штучного інтелекту (ІІІ) відкриває нові можливості для забезпечення енергозбереження та стійкості енергетичних систем (ЕС). Сучасні алгоритми машинного навчання та аналізу даних дозволяють здійснювати прогнозування споживання електроенергії, виявляти втрати та неефективні ділянки мережі, а також оптимізувати розподіл навантаження у режимі реального часу.

Додатковою перевагою застосування ІІІ є здатність до самонавчання та адаптації на основі даних, що дозволяє враховувати наслідки руйнувань, зміни конфігурації мережі та нестабільність зовнішніх факторів. Інтеграція інтелектуальних систем (ІС) з елементами «розумних мереж» та технологіями (ІоТ) сприяє створенню гнучкої та стійкої енергетичної інфраструктури, здатної ефективно функціонувати навіть за умов підвищених ризиків [1, 2, 3].

Незважаючи на значний потенціал, впровадження штучного інтелекту в управління МЕІ у воєнний час пов'язане з низкою проблем, включаючи обмеженість даних, загрози кібербезпеці та необхідність швидкої адаптації існуючої інфраструктури. Це потребує комплексного підходу, що поєднує технічні, економічні та організаційні рішення.

Метою статті є оглядовий аналіз можливостей використання ІІІ для забезпечення енергозбереження МЕІ в умовах воєнного часу (ВЧ), а також визначення ключових напрямів підвищення ефективності та стійкості ЕС. Для досягнення поставленої мети передбачається розглянути сучасні методи та алгоритми ІІІ, проаналізувати та оцінити перспективи їх впровадження в умовах підвищеної невизначеності, обмеженості ресурсів та постійних впливів від бойових дій.

Проведений аналіз експлуатації електроенергетичних мереж Миколаївщини під час експлуатації у ВЧ дозволив сформулювати зведену таблицю щодо запровадження ІС управління енергетикою. Результати

наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Напрямки впровадження ІС управління ЕС Миколаївщини

№	Напрямок впровадження	Опис інтелектуального рішення	Очікуваний ефект	Обмеження/ризик	Актуальність у ВЧ
1	Прогнозування навантаження	Використання алгоритмів машинного навчання	Зменшення перевантажень, балансування мережі	Нестабільні дані через бойові дії	Висока
2	САУ мережею	ІС керування у реальному часі	Підвищення надійності та гнучкості	Вразливість до кібератак	Критична
3	Виявлення аварій та руйнувань	ІІІ-алгоритми для аналізу визначення місць аварій	Скорочення часу реагування	Пошкодження датчиків	Критична
4	Оптимізація розподілу ресурсів	Інтелектуальний перерозподіл енергії між споживачами	Пріоритетність критичної інфраструктури	Політичні/соціальні ризики	Висока
5	Управління попитом споживання	Регулювання споживання енергії	Зниження пікових навантажень	Обмежена готовність споживачів	Середня
6	Інтеграція розподіленої генерації	Управління ЕС, генераторами, мікромережами	Підвищення автономності регіону	Складність координації	Критична
7	Моніторинг стану мережі	Використання IoT-датчиків і SCADA-систем	Прозорість та контроль	Втрата даних через руйнування	Висока
8	Кібербезпека енергосистем	ІІІ-системи для виявлення кібератак	Захист критичної інфраструктури	Висока складність реалізації	Критична
9	Підтримка прийняття рішень	Аналітичні платформи на базі ІІІ	Підвищення ефективності управління	Залежність від якості даних	Висока
10	Відновлення після аварій	ІІІ для планування ремонтів і логістики	Прискорення відновлення мереж	Обмежені ресурси	Критична

Для аналізу методів ІІІ щодо управління МЕІ у сучасному контексті її живучості та енергоефективності прийнято класифікувати за типом необхідних задач для вирішення, а саме, прогнозування, оптимізація та ефективне управління.

Прогнозування попиту споживання та генерації електроенергії є основа енергоефективності. Одним з напрямків є застосування рекурентних

нейромереж LSTM (Long Short - Term Memory), що ідеально підходить для обчислення часових рядів. Цей метод дозволяє враховувати історію споживання, сезонність та погодні аномалії.

У разі використання алгоритмів градієнтного бустінгу (XGBoost/LightGBM), це дозволяє ефективно вирішувати задачі при наявності багатьох зовнішніх факторів (температура, вологість, час функціонування об'єкту). Тоді, методи Forecasting в умовах бойових дій дозволяють прогнозувати «виживання» мережі при втраті конкретного вузлу ЕС та виконувати розрахунки необхідного резерву потужності для критичної інфраструктури. Крім того, на відміну від звичайних мереж, є можливість прогнозування навантаження. Математична модель цього методу описується системою рівнянь [4, 5]. По - перше, ключовий механізм у архітектурі рекурентних нейронних мереж типу LSTM Forget Gate (f_t) дозволяє вирішувати яку частину інформації з минулого стану системи (комірки) C_{t-1} необхідно не використовувати:

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (1)$$

По - друге, етап роботи нейромережі LSTM Input Gate (i_t та $\bar{C}_t$), який відповідає за додавання нової корисної інформації до пам'яті. Значення вирішують які нові дані додати у комірку:

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i), \bar{C}_t = th(W_C \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_C) \quad (2)$$

Тоді, оновлений стан комірки C_t , визначається з виразу:

$$C_t = f_t C_{t-1} + i_t \bar{C}_t \quad (3)$$

Фінальний етап робочого циклу Output Gate (o_t та h_t) формує текучий вихід, що забезпечує етап прогнозування дій:

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o), h_t = o_t th(C_t) \quad (4)$$

При використанні алгоритмів оптимізації розподілу споживання потужності вирішується задача щодо передачі енергії від джерела до споживача з мінімальними втратами у ЛЕП та трансформаторах.

В цьому випадку застосовують генетичні алгоритми та ройовий інтелект. Це рішення дозволяє виконувати пошук оптимальної конфігурації для вмикання та/або розмикання комутаційної апаратури мережі ЕС у МЕІ. Архітектура реалізованого агента ІІІ виконує задачу навчання з підкріпленням у управлінні ЕС, отримуючи позитивну оцінку за зниження втрат та негативну – за перевантаження лінії. Тобто, у разі фізичного пошкодження ділянки лінії, для заживлення знеструмлених районів виконується миттєвий перерахунок топології мережі функцією Reconfiguration.

Математичною базою цього методу є Марковський процес прийняття рішення [6, 7]. Модель описується впорядкованим набором елементів (S, A, P, R, γ), де S – простір стану (напруга, струм, рівень заряду батареї); A – простір дій (вмикання/відключення ЛЕП, зміна параметрів та умов генерації); $P(s'|s, a)$ – вірогідність переходу у новий стан s' при здійсненні дій a ; $R(s, a)$ – функція позитивного рішення (наприклад, мінімізація втрат

або максимізація часу роботи навантаження); $\gamma \in [0, 1]$ – коефіцієнт дисконтування майбутніх позитивних рішень.

Мета агента знайти оптимальний інтервал $\pi(a|s)$, максимізуючи кумулятивну нагороду, що очікується:

$$G_t = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k R_{t+k+1} \quad (5)$$

Одним з напрямів оцінки стану ЕМ є виявлення аномалій та процесів самовідновлення. Система керування на базі ШІ повинна відрізнити звичайний флікер напруги від початку аварії або кібератаки. Тоді, використовують метод інтелектуального аналізу даних на базі алгоритмів Isolation forest та автокодування Autoencoders, які допомагають миттєво знаходити відхилення від робочих параметрів ЕМІ, злом або пошкодження ізоляції лінії. Крім того, для аналізу даних з сенсорів у вигляді фотофіксації стану ЕМ або для обробки зображень візуального аналізу ЛЕП, застосовують згорткові нейронні мережі [8].

Описані вище алгоритми реалізують автоматичне виділення ділянок електричного ланцюга – «островів», тим самим ізолюючи пошкодженого району ЕМ, з метою не розростання аварії з подальшим блекаутом. Під час військового стану система управляється як сукупність автономних агентів (районів, підстанцій), які взаємодіють між собою.

У випадках, коли дуже низький рівень генерації електричної енергії, тоді ШІ не здатен керувати запитами, а здійснює регулювання споживанням. В цьому випадку до системи приєднуються алгоритми управління мікромережами та попитом.

Одним з методів є метод багатоагентних систем, де кожен побутовий або юридичний споживач, є «розумний агент». Тобто, внутрішній аналіз попиту виставляє пріоритетність розподілу в умовах дефіциту енергії. У випадках, коли необхідно приймати рішення в умовах не визначеності, наприклад коли один з датчиків працює з перебоями через обстріли, застосовують нечітку логіку (Fuzzy logic) [9].

Проведений аналіз математичного апарату показує, що досягнення високої енергоефективності та живучості МЕІ неможливе у межах єдиного алгоритму. Потрібна побудова гібридної ІС, де кожен метод відповідає за конкретний рівень управління.

Таким чином, синергія розглянутих математичних моделей дозволяє трансформувати жорстку ієрархічну МЕІ в адаптивну систему, що самовідновлюється. Це не лише знижує технічні втрати електроенергії у мирний час, а й забезпечує максимально можливий рівень робастного оцінювання стану, стійкість до кібератак, її енергоефективність в умовах воєнного часу та дефіциту ресурсу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кіншаков В. Ю., Рухлов А. В. Впровадження Smart Grid в Україні // Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки. Одеса:

Видавничий дім «Гельветика». 2024. No 2. 136 с., стор. 71 - 76

2. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: за заг. ред. акад. НАН України О. В. Кириленко / Інститут електродинаміки НАН України. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.

3. Інтелектуальні електроенергетичні системи: елементи та режими: Під заг. ред. акад. НАН України А.В. Кириленко / Інститут електродинаміки НАН України. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2014. – 408 с

4. Henaoui, F., Edgell, R., Sharma, A. et al. AI in power systems: a systematic review of key matters of concern. *Energy Inform* 8, 76 (2025).

5. FACT: Autoencoder and Attention Conv-LSTM-Based Collaborative Framework for Cloud Cover Prediction / M. Patel, S. Tanwar, N. K. Jadav et al. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 131488–131504. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3439888

6. A Comprehensive Review of Deep Learning: Architectures, Recent Advances, and Applications / I. D. Mienye, T. G. Swart. *Information*. 2024. Vol. 15, no. 12. Art. 755. DOI: <https://doi.org/10.3390/info15120755>.

7. Smith J., Wang L. A Multi-Agent LSTM-Based Approach for Scalable Anomaly Detection in Smart Grids // *IEEE Transactions on Smart Grid*. – 2023. – Vol. 14, No. 2. – P. 1234–1245.

8. Deep learning based optimal power flow for smart grids / Y. Zhang, X. Lin, J. Liu et al. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2020. Vol. 35, no. 3. P. 1835–1846.

9. Resilience of Power Systems: Concepts, Metrics, and Analysis Methods / H. Farzin, R. Fotuhi-Firuzabad, M. Moeini-Aghaie // *IEEE Systems Journal*. 2017. Vol. 11, no. 4. P. 2197–2208. DOI: 10.1109/JSYST.2016.2558204

ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ФАКТОРІВ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ПЛАСТИКУ У МЕРЕЖАХ ВОДОПОСТАЧАННЯ МІСТА МИКОЛАЄВА У ВОЄННИЙ ЧАС.

Оксана Казакова¹, Микола Запальський¹

¹Миколаївський ліцей №38 імені В.Д.Чайки, leoland1708@gmail.com

Глобальна стратегія декарбонізації, закріплена Європейським зеленим курсом, вимагає перегляду підходів до функціонування критичної інфраструктури, зокрема систем централізованого водопостачання. Одним із ключових аспектів цієї трансформації є мінімізація вуглецевого сліду протягом усього життєвого циклу конструкційних матеріалів. Використання пластикових трубопроводів (ПЕ, ПВХ) традиційно вважалося екологічною альтернативою металевим мережам через нижчі енерговитрати на транспортування та стійкість до корозії. Проте сьогодні постає новий виклик: декарбонізація самого пластику, що включає зменшення емісії CO₂ при його виробництві та запобігання деградації

полімерів, яка призводить до забруднення водних ресурсів мікропластиком.

Для Миколаївського регіону проблема набула критичного значення внаслідок повномасштабного вторгнення РФ. Руйнування водоводу «Дніпро-Миколаїв» у 2022 році змусило місто перейти на використання технічної води з високим вмістом солей та агресивних хімічних сполук. Це спричинило прискорену хімічну деградацію існуючих пластикових мереж, підвищуючи ризик вимивання токсичних сполук у воду та збільшуючи витрати ресурсів на постійні аварійні ремонти. У таких умовах декарбонізація — це не лише екологічне завдання, а й питання виживання та надійності міської інфраструктури [1].

Станом на сьогодні інфраструктура водопостачання Миколаєва перебуває у критичному стані, за офіційними даними МКП «Миколаївводоканал», рівень зношеності мереж перевищує 70%, а інтенсивність аварій після 2022 року зросла у 5–20 разів залежно від ділянки. Використання у системі води з Бузького лиману призвело до того, що рівень хлоридів у мережі перевищує норму у десятки разів (до 2500–3000 мг/дм³). Такий хімічний склад створює умови для окислювальної деградації полімерів. Хлор та його сполуки виступають агресивними агентами, що руйнують стабілізатори у структурі поліетилену (ПЕ) та полівінілхлориду (ПВХ), спричиняючи мікротріщини [2].

Цей процес не лише скорочує термін експлуатації труб, змушуючи до передчасної та енерговитратної заміни (що збільшує вуглецевий слід), а й провокує активну дифузії мікропластику та мономерів у питну воду [3]. Таким чином, декарбонізація у Миколаївському регіоні стикається з унікальною дилемою, необхідністю швидкого відновлення мереж за умов агресивного впливу середовища, що нівелює стандартні екологічні переваги пластикових матеріалів.

Сучасний стан систем водопостачання м. Миколаєва характеризується критичним рівнем амортизації, що є результатом як тривалої експлуатації без належної модернізації, так і наслідком воєнних дій.

Загальна протяжність водопровідних мереж, що перебувають на балансі МКП «Миколаївводоканал», становить близько 1200 км. На початок 2024 року понад 75 – 80% цих мереж офіційно визнані такими, що вичерпали свій експлуатаційний ресурс.

Ключовим індикатором технічного занепаду є динаміка аварійності. До 2022 року середня кількість витоків становила 2–5 на добу. Після вимушеного запуску у систему солоної води з Бузького лиману (квітень 2022 р.) кількість масштабних поривів зросла до 15–20 на добу, що становить близько 500–600 аварій на місяць.

Втрати води у мережі (через приховані витoki та зношеність) на окремих ділянках сягають 40–50%, що прямо впливає на вуглецевий слід через надмірне споживання електроенергії насосними станціями для компенсації втраченого тиску.

Історично близько 60% магістральних трубопроводів Миколаєва виготовлені зі сталі та чавуну, решта — це залізобетонні та полімерні конструкції (ПЕ, ПВХ). Проте стратегія відновлення останніх років базується на майже 100-відсотковій заміні зношених ділянок на пластикові труби [4, 5].

Технічна проблема декарбонізації пластику в Миколаєві полягає у синергічному ефекті руйнування:

1. Гідравлічні удари. Через часті відключення електроенергії, перезапуски системи та обстріли, пластикові труби зазнають втомних напружень, що призводить до розтріскування швів.

2. Хімічна корозія. Висока мінералізація води (солоність) викликає вимивання пластифікаторів. Якщо у звичайних умовах термін служби ПЕ - труби становить 50 років, то в умовах Миколаєва прогнозований термін скорочується до 15–20 років, що автоматично подвоює «вуглецеву вартість» інфраструктури через необхідність її швидкої заміни. [6].

Обов'язково слід визначити окремо і енергетичний аспект, а саме, вуглецевий слід. Через внутрішню шорсткість старих металевих труб та відкладення солей, опір потоку зростає. Хоча пластик має менший коефіцієнт шорсткості, постійні «латки» та використання хомутів на пошкоджених ділянках пластикових мереж створюють локальні зони турбулентності. Це змушує підприємство експлуатувати енергоємне обладнання на межі потужності, що в умовах дефіциту енергосистеми України суттєво збільшує питомі викиди CO₂ на кожен кубометр поставленої води.

За результатами проведеного аналізу, слід зазначити, що деградація полімерних матеріалів у системах централізованого водопостачання м. Миколаєва є значущим внутрішнім джерелом вторинного мікропластику. Процес зношування пластикових труб (зокрема, з полівінілхлориду **PVC** та поліетилену високої щільності **HDPE**), а також запірної арматури та ущільнювальних прокладок, відбувається під дією перелічених факторів у даній статті.

Результати аналізу зведені у таблиці 1. Таблиця структурована за джерелами, факторами впливу та наслідками для якості питної води.

Таблиця 1

Аналіз деградації полімерних матеріалів у системі централізованого водопостачання м. Миколаєва.

Об'єкт дослідження	Матеріал	Основні фактори деградації	Прояви деградації поверхні	Тип вторинного мікропластику
Магістральні та розподільчі мережі	ПВХ (PVC), ПЕ високої щільності	Гідравлічні удари, різкі коливання тиску в	Механічна втома, формування сітки мікротріщин на	Фрагменти неправильної форми, дрібний мікропластик

Об'єкт дослідження	Матеріал	Основні фактори деградації системи	Прояви деструкції поверхні	Тип вторинного мікропластику
	(HDPE)		внутрішній стінці	
Внутрішньобудинкові мережі	Поліпропілен (PP), ПВХ (PVC)	Регулярне хлорування води (залишкові окиснювачі)	Окислювальна деструкція, підвищення крихкості полімеру, вимивання пластифікаторів	Мікролусочки, пилоподібні частки
Запірна арматура та фітинги	Композитні полімери, ущільнювачі	Механічне тертя, кавітаційні процеси	Ерозія поверхонь, абразивний знос рухомих частин	Фрагменти, гранули (мікросфери)
Ущільнювальні прокладки	Еластомери, гума, силікон	Біохімічний вплив (метаболізм біоплівки), зміна pH	Втрата еластичності, деструкція структури під дією мікроорганізмів	Волокна, еластомерні частинки

Однак, для проведення порівняльного аналізу в умовах Миколаєва необхідно враховувати не лише стандартні викиди при виробництві, а й коефіцієнт деградації матеріалу під впливом агресивної води (солоність, високий вміст хлоридів) [7].

В результаті, враховуючи коефіцієнт деградації, отримуємо іншу порівняльну характеристику ефективності типів пластику в умовах Миколаєва, таблиця 2.

Таблиця 2

Порівняльна ефективність типів пластику в умовах Миколаєва

Показник (на 1 км мережі)	ПЕ (Поліетилен низького тиску)	ПВХ-О (Орієнтований полівінілхлорид)	ПП (Поліпропілен)
Викиди CO ₂ при виробництві (т/км)	12.5 – 14	9 – 11	13 – 15.5
Стійкість до хлоридів та солей	Середня (схильність до розтріскування)	Висока	Середня
Прогнозний термін служби (солоня вода)	12–15 років	20–25 років	15–18 років
Енерговитрати на прокачування	Низькі (гладка поверхня)	Найнижчі (тонша стінка)	Низькі
Ризик емісії мікропластику	Високий (через стирання)	Середній	Високий

За результатами проведеного аналізу, слід зробити наступні висновки. Система водопостачання м. Миколаєва, враховуючи специфіку експлуатації під час військового стану (гідравлічні режими, режими дезінфекції, впливи від обстрілів та дії ударних хвиль), є активним внутрішнім джерелом вторинного мікропластику.

Тобто, сучасну систему водопостачання Миколаєва необхідно базувати на використанні більш стійких до окислення полімерних матеріалів та розробляти нові стратегічні шляхи очищення води, спрямованих на фільтрацію мікропластика, перш ніж вода потрапить у загальноміську розподільчу мережу.

Також необхідно враховувати, що існуючий синергетичний ефект механічного навантаження, хімічного впливу хлору та біологічної активності призводить до того, що мікрочастинки потрапляють у потік води безпосередньо перед точкою споживання, що робить їх уловлювання на центральних станціях неможливим.

ЛІТЕРАТУРА

1. Про стан навколишнього природного середовища в Миколаївській області: Регіональна доповідь. Миколаїв: Управління екології та природних ресурсів Миколаївської ОДА, 2022. 145 с.
2. За матеріалами Інтернет ресурсу. Повідомлення про плановану діяльність, яка підлягає оцінці впливу на довкілля МКП «Миколаївводоканал» за 2025 р. Режим доступу: www.vodokanal.mk.ua
3. Клименко, М. О. Екологія міських систем: підруч. для студентів ВНЗ / М. О. Клименко, Ю. В. Пилипенко, О. С. Мороз. – Херсон: Олді-плюс, 2012. – 294 с.
4. Програма реформування та розвитку житлово-комунального господарства міста Миколаєва на 2020–2024 роки (зі змінами від 2023-2024 рр.). — Миколаївська міська рада, 2024. Режим доступу: dgkh.mkrada.gov.ua
5. Mykolaiv City Strategy & Master Plan: Reconstruction and Development. — United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), 2023. — Режим доступу: unece.org.
6. Шадура В.О., Кравченко Н.В. Водопостачання та водовідведення: навчальний посібник. – Рівне: НУВГП, 2018, 343 с.
7. ДСТУ ISO 14040:2013 Екологічне управління. Оцінювання життєвого циклу. Принципи та структура (ISO 14040:2006, IDT) — Київ : Держспоживстандарт України, 2014. — 42 с.

ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЮ В ДВИГУНАХ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАШИН ЯК ШЛЯХ ДО ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ У ЗЕЛЕНОМУ БУДІВНИЦТВІ

Дмитро Міщук¹, Євген Міщук¹, Максим Балака¹

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
mischuk.do@knuba.edu.ua, mischuk.ieo@knuba.edu.ua,
balaka.mm@knuba.edu.ua*

Будівельна галузь є одним із найбільших споживачів енергії та джерел забруднення атмосфери. Основна частина будівельної техніки використовує дизельні двигуни, які характеризуються високими викидами вуглекислого газу, оксидів азоту та дрібнодисперсних частинок. У концепції зеленого будівництва одним із ключових напрямів є зниження вуглецевого сліду будівельних процесів.

Серед перспективних альтернатив дизельному паливу значну увагу привертає водень. На відміну від традиційних вуглеводневих палив, водень не містить вуглецю, тому при його згорянні не утворюється вуглекислий газ (CO₂).

Сьогодні найбільший дослідницький інтерес мають два напрями:

- використання водню у паливних елементах;
- використання водню у двигунах внутрішнього згорання (Hydrogen ICE).

Для будівельної техніки другий варіант є особливо перспективним, оскільки дозволяє адаптувати існуючі конструкції двигунів без повної заміни силової установки.

За останні роки у базах значно зросла кількість досліджень, присвячених водневим двигунам внутрішнього згорання. У роботах польських та європейських дослідників зазначається, що Hydrogen ICE може забезпечити швидку декарбонізацію важкої техніки без радикальної зміни виробничої інфраструктури.

У дослідженні [1, 2] показано, що сучасні водневі двигуни мають:

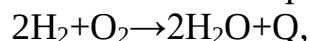
- високу швидкість згорання палива;
- широкий діапазон займання;
- можливість роботи на збіднених сумішах;
- низький рівень викидів CO₂.

Водночас головною проблемою залишається утворення оксидів азоту через високі температури згорання водню. Для зменшення NO_x використовують рециркуляцію вихлопних газів, збіднені паливні суміші, багатоточкове впорскування водню.

У роботі британських дослідників для будівельної техніки показано, що низькоемісійні водневі двигуни можуть значно зменшити екологічне навантаження у сегменті off-road machinery, до якого належать екскаватори,

навантажувачі та бульдозери.

Реакцію згоряння водню можна описати рівнянням:



де Q – теплова енергія.

Основною перевагою такого процесу є відсутність утворення вуглекислого газу. Продуктом реакції є водяна пара. Однак через високу температуру полум'я утворюються оксиди азоту, хоча їхня кількість значно менша порівняно з дизельними двигунами.

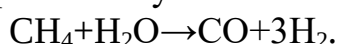
Важливою перевагою Hydrogen ICE є можливість модернізації існуючих двигунів. Це особливо актуально для будівельної техніки, де повна електрифікація є складною. На відміну від акумуляторних систем, водневі двигуни забезпечують швидке заправлення та більший запас енергії на одиницю маси палива.

Однією з головних проблем використання водню є низька загальна енергетична ефективність повного циклу його виробництва та використання. Водень не є первинним джерелом енергії. Для його отримання необхідно витратити енергію на електроліз води, компресію, транспортування, зберігання.

Найбільш екологічним є «зелений водень», який виробляється методом електролізу з використанням відновлюваних джерел енергії. Однак ефективність електролізу зазвичай становить близько 65–75%. Далі виникають додаткові втрати, а саме компресія водню – близько 10–15%, транспортування та зберігання – 5–10%. Сумарна ефективність циклу «електроенергія → водень → механічна енергія» з урахуванням ефективності двигунів внутрішнього згоряння може бути меншою за 30%. Це значно нижче ефективності акумуляторних електричних систем. Саме тому багато дослідників вважають водневі двигуни проміжною технологією.

Особливо важливим є питання походження енергії для виробництва водню. На сьогодні близько 90 % водню у світі виробляється з природного газу методом парової конверсії метану. У такому випадку фактично відбувається непряме використання викопного палива, а екологічний ефект суттєво зменшується.

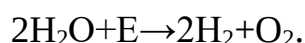
Реакція парової конверсії метану:



У процесі також утворюється CO_2 , що частково нівелює переваги водневих технологій.

Однією з популярних ідей є отримання водню безпосередньо на борту машини шляхом електролізу води. Теоретично це можливо, але з точки зору термодинаміки така система не може бути повністю автономною.

Для розкладання води необхідно затратити енергію:



Відповідно до закону збереження енергії, отримати більше енергії при спалюванні водню, ніж було витрачено на його виробництво, неможливо. Через втрати у генераторі, електролізері та двигуні система матиме від’ємний енергетичний баланс. Тому концепція «двигуна, який сам виробляє для себе водень» у замкненому циклі є фізично неможливою. Водень може лише частково вироблятися на борту як допоміжна добавка до основного палива. Такі системи ННО-генераторів іноді використовуються для покращення згоряння дизельного палива, зменшення витрати пального, зниження димності вихлопу. Проте більшість наукових досліджень показують, що ефект від таких систем є обмеженим і не дозволяє створити енергетично автономний двигун.

На основі аналізу сучасних досліджень можна зробити такі висновки:

- водневі двигуни внутрішнього згоряння є перспективною технологією для декарбонізації будівельної техніки;
- основною перевагою водню є практично повна відсутність викидів CO₂ під час роботи двигуна;
- використання водню, виробленого з природного газу, не забезпечує повної екологічності технології;
- створення двигуна, який повністю забезпечує себе воднем без зовнішніх джерел енергії, суперечить законам термодинаміки та є неможливим у замкненій системі;
- найбільш перспективним є використання «зеленого водню», отриманого за допомогою відновлюваних джерел енергії.

Таким чином, водневі двигуни можуть стати важливим етапом переходу будівельної галузі до низьковуглецевих технологій, однак їх ефективність напряму залежить від способу виробництва водню та розвитку відповідної енергетичної інфраструктури.

ЛІТЕРАТУРА

1. Wróbel K., Wróbel J., Tokarz W., Lach J., Podsadni K., Czerwiński A. Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles: A Review. *Energies*, 15(23), 2022. 8937 p. <https://doi.org/10.3390/en15238937>.
2. Оленіч Г.С., Міщук Д.О., Балака М.М. Зниження витрат пального автомобільним транспортом за рахунок застосування генератора водню. *Resource and Energy Saving Technologies and Materials. Contemporary Innovation Technique of the Engineering Personnel Training for the Mining and Transport Industry (CITEPTMTI 2022)*, 2022. С. 61-65.
3. Webster L.J., Ballard R., Beamish T., Burnhope T., Humbert J., Lewis A. C., Piaszyk J., Moller S.J. Evaluating low NO_x hydrogen engines designed for off-road and construction applications. *Environmental Science: Processes Impacts*, 27, 2025. 486-497 p. <https://doi.org/10.1039/d4em00448e>

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ ФОРМУВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ ІНТЕГРОВАНИХ ТЕПЛИЦЬ У СКЛАДІ БУДІВЕЛЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ВТОРИННИХ ТА ПОНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Сергій Морковник¹, Віктор Мілейковський¹

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
s.morkovnyk@gmail.com, mileikovskiy.vo@knuba.edu.ua*

Сучасний розвиток зеленого будівництва пов'язаний не лише зі зменшенням питомого енергоспоживання будівель, а й із раціональним використанням міських територій, скороченням логістичних витрат і підвищенням стійкості інфраструктури. Одним із перспективних напрямів є розміщення споруд захищеного ґрунту у складі будівель, передусім на дахах або у верхніх рівнях громадських, житлових, освітніх і торговельних об'єктів. У наукових джерелах такі рішення описують через поняття building-integrated agriculture (BIA), rooftop greenhouse (RTG), integrated rooftop greenhouse (iRTG) та building-integrated rooftop greenhouse (BiRTG) [1-4]. Спільною рисою цих систем є використання будівлі не лише як несучої платформи, а як джерела або приймача теплових, повітряних, водних і матеріальних потоків.

На відміну від автономної теплиці, інтегрована теплиця працює в умовах взаємного впливу з будівлею. Вона може зменшувати тепловтрати через покриття, використовувати теплоту витяжного повітря, частково залучати CO₂ внутрішнього повітря для фотосинтезу, отримувати сонячні теплові надходження та водночас впливати на потребу будівлі в опаленні, охолодженні й вентиляції. Тому така система має розглядатися як єдиний комплекс “будівля - теплиця”, в якому мікроклімат формується не тільки роботою інженерних систем теплиці, а й характеристиками будівлі, режимами її експлуатації, властивостями спільних огорожувальних конструкцій і доступністю вторинних ресурсів. Саме ця особливість визначає актуальність розроблення підходів до енергоефективного формування мікроклімату інтегрованих теплиць у складі будівель.

Аналіз опублікованих досліджень показує, що ефект інтеграції не є однозначним і істотно залежить від клімату, сезону, геометрії теплиці, оптичних і теплотехнічних властивостей огорожень, способу вирощування культур та алгоритмів керування [5-8]. У холодний період теплиця може виконувати функцію теплового буфера над верхнім поверхом будівлі. У цьому випадку зменшується різниця температур між приміщенням і зовнішнім середовищем через покриття, а отже знижуються тепловтрати будівлі через огорожувальні конструкції. Для інтегрованих дахових теплиць у середземноморському кліматі за результатами каліброваного моделювання показано суттєвий потенціал пасивного відновлення теплоти

завдяки взаємодії теплиці з будівлею [7]. Проте в теплий період прозоре огороження, корисне для освітлення рослин, може створювати перегрів і збільшувати витрати енергії на вентиляцію або охолодження.

Отже, оцінювання інтегрованих теплиць повинно виконуватися не за усередненим річним показником, а з урахуванням погодинної або принаймні сезонної динаміки. У різні періоди року один і той самий фізичний зв'язок може бути корисним, нейтральним або шкідливим. Наприклад, теплопередача через спільне перекриття в холодний період може зменшувати втрати будівлі, але за літнього перегріву підвищувати ризик надходження теплоти до верхніх приміщень. Так само витяжне повітря будівлі може бути джерелом теплоти й CO_2 , але за відсутності контролю якості повітря, фільтрації та обмежень перетікання стає потенційним джерелом санітарних і експлуатаційних ризиків. Тому ключовим завданням є не максимальне використання будь-якого доступного ресурсу, а кероване використання ресурсу в момент, коли він покращує мікроклімат і не погіршує безпеку системи.

Вторинні джерела енергії в системі “будівля - теплиця” доцільно поділяти за фізичною природою, температурним потенціалом, графіком доступності та обмеженнями використання. До першої групи належить теплопередача через спільні огорожувальні конструкції, зокрема покрівельне перекриття і вузли примикання. Це переважно пасивний ресурс, який не потребує додаткового переміщення теплоносія, але має обмежену керованість. До другої групи належить теплота витяжного повітря будівель. Її перевагою є температура, близька до внутрішньої, а також можливий вміст CO_2 , корисний для фотосинтезу. До третьої групи можна віднести надлишкову теплоту інженерного обладнання, холодильних машин, теплових насосів або локальних енергетичних систем. Такі ресурси мають вищу керованість, але потребують складнішої інженерної інфраструктури.

Використання витяжного повітря як вторинного ресурсу потребує особливої уваги. З енергетичної точки зору воно може зменшувати потребу теплиці в опаленні та підтримувати концентрацію CO_2 у зоні рослин. Однак вентиляційні потоки будівлі не можна оцінювати лише за температурою і витратою. Необхідно враховувати якість повітря, наявність пилу, летких органічних сполук, запахів, мікробіологічних забруднень, а також можливість перенесення вологи між об'ємами. Польові вимірювання якості повітря над даховою фермою показали, що концентрація $\text{PM}_{2.5}$ на рівні даху може бути нижчою, ніж біля вулиці, однак результат істотно залежить від метеорологічних умов, розташування джерел забруднення та конфігурації забудови [9]. Тому застосування витяжного повітря має супроводжуватися фільтрацією, датчиками, захистом від зворотних потоків і алгоритмами безпечного керування.

Поновлюваним джерелом енергії, що визначає поведінку інтегрованої

теплиці, є сонячна радіація. Вона має подвійну роль: забезпечує світловий режим для фотосинтезу і водночас формує теплові надходження до повітря, рослин, субстрату та огорожувальних конструкцій. Ця подвійність створює проєктний компроміс. Збільшення світлопропускання може підвищувати продуктивність культур у холодний або перехідний період, але в теплу пору року призводить до перегріву та підвищення вентиляційних втрат. Дослідження продуктивності інтегрованої теплиці в середземноморському кліматі та роботи щодо сталого дизайну rooftop food-energy-land nexus показують, що сонячні рішення треба оцінювати не лише за величиною теплових надходжень, а за сукупністю показників мікроклімату, енергоспоживання і врожайності [10, 11].

З інженерної точки зору сонячну радіацію доцільно розглядати як керований природний ресурс. У холодний період сонячні надходження можуть бути використані для пасивного обігріву і зменшення тепловтрат будівлі. У перехідні періоди вони можуть покривати значну частину теплового навантаження вдень, але потребують акумулювання або контрольованого відведення надлишкової теплоти. У теплий період необхідними стають екрани, затінення, природна чи механічна вентиляція, а також узгодження режимів із системами будівлі. Тому ефективність інтегрованої теплиці визначається не окремим конструктивним елементом, а взаємодією прозорого огороження, сонцезахисту, вентиляції, теплової інерції, культури рослин і системи автоматичного керування.

Методично найбільш інформативними інструментами аналізу є погодинне енергетичне моделювання будівель, ко-симуляція системи “будівля - теплиця”, CFD-моделювання локальних повітряних процесів, натурний моніторинг і прогнози підходи до керування [8, 12, 13]. Погодинне енергетичне моделювання дозволяє оцінювати сезонні баланси теплоти, вплив огорожень, режими опалення, охолодження і вентиляції. Ко-симуляція є доцільною тоді, коли будівля і теплиця мають двосторонній вплив, а дані про температуру, повітрообмін або теплові потоки передаються між моделями. CFD-моделювання корисне для уточнення локального розподілу швидкостей, температур, вологості та CO₂, однак воно є надто ресурсомістким для річного сценарного аналізу.

Результати моделювання повинні перевірятися за експериментальними даними, оскільки вони чутливі до припущень про інфільтрацію, оптичні властивості огорожень, транспірацію рослин, реальні положення вентиляційних отворів, графіки експлуатації будівлі та роботу автоматичних систем. Особливо важливо враховувати, що мікроклімат теплиці є багатокритеріальною задачею. Мінімум енергії на опалення не гарантує допустимих температур для рослин, так само як максимальна вентиляція не завжди є енергоефективною через втрати теплоти і ризик надмірного осушення. Тому критерії оцінювання мають охоплювати потребу в теплоті й холоді, пікові навантаження, стабільність температури

та відносної вологості, концентрацію CO₂, якість повітря, ризик конденсації, тривалість перебування параметрів у допустимих межах і можливий вплив на продуктивність рослин.

На основі виконаного огляду можна сформулювати підхід до енергоефективного формування мікроклімату інтегрованих теплиць у складі будівель. По-перше, необхідно визначати рівень інтеграції не за назвою системи RTG, iRTG або BiRTG, а за фактичними фізичними зв'язками: спільне огороження, керований повітрообмін, використання витяжного повітря, наявність рекуперації, сонцезахисту та автоматичного керування. По-друге, вторинні ресурси треба класифікувати за температурним потенціалом, доступністю в часі та санітарними обмеженнями. По-третє, сонячна радіація має розглядатися як ресурс, корисність якого змінюється залежно від сезону і режиму роботи. По-четверте, математична модель повинна описувати нестационарний тепло- і масообмін та бути придатною для експериментальної валідації.

Таким чином, інтегрована теплиця у складі будівлі може бути ефективним елементом зеленого будівництва лише за умови системного проєктування. Потенційні переваги полягають у зменшенні тепловтрат через покриття, використанні вторинної теплоти, підвищенні локальної продовольчої стійкості та скороченні логістичних впливів. Основні ризики пов'язані з перегрівом, надмірною вологістю, конденсацією, неконтрольованими повітряними потоками і вимогами до якості повітря. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення фізичної та математичної моделей системи “будівля - споруда захищеного ґрунту”, експериментальну перевірку температурно-вологісних режимів і формування інженерних рекомендацій щодо використання вторинних та поновлюваних джерел енергії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Astee L. Y., Kishnani N. T. Building Integrated Agriculture: Utilising Rooftops for Sustainable Food Crop Cultivation in Singapore. *Journal of Green Building*. 2010. Vol. 5, no. 2. P. 105-113. DOI: 10.3992/jgb.5.2.105.
2. Gould D., Caplow T. Building-Integrated Agriculture: A New Approach to Food Production. *Metropolitan Sustainability*. Elsevier, 2012. P. 147-170. DOI: 10.1533/9780857096463.2.147.
3. Appolloni E. et al. The Global Rise of Urban Rooftop Agriculture: A Review of Worldwide Cases. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 296. 126556. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126556.
4. Drottberger A. et al. Urban Farming with Rooftop Greenhouses: A Systematic Literature Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. Vol. 188. 113884. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113884.
5. Nadal A. et al. Building-Integrated Rooftop Greenhouses: An Energy and Environmental Assessment in the Mediterranean Context. *Applied Energy*. 2017.

Vol. 187. P. 338-351. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.11.051.

6. Muñoz-Liesa J. et al. Building-Integrated Greenhouses Raise Energy Co-Benefits through Active Ventilation Systems. Building and Environment. 2022. Vol. 208. 108585. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108585.

7. Muñoz-Liesa J. et al. Quantifying Energy Symbiosis of Building-Integrated Agriculture in a Mediterranean Rooftop Greenhouse. Renewable Energy. 2020. Vol. 156. P. 696-709. DOI: 10.1016/j.renene.2020.04.098.

8. Yeo U.-H. Dynamic Energy Analysis of Building-Integrated Rooftop Greenhouse for Urban Agriculture: dissertation. Seoul National University, 2021.

9. Tong Z. et al. A Case Study of Air Quality above an Urban Roof Top Vegetable Farm. Environmental Pollution. 2016. Vol. 208. P. 256-260. DOI: 10.1016/j.envpol.2015.07.006.

10. Montero J. I. et al. Productivity of a Building-Integrated Roof Top Greenhouse in a Mediterranean Climate. Agricultural Systems. 2017. Vol. 158. P. 14-20. DOI: 10.1016/j.agsy.2017.08.002.

11. Jing R., Hastings A., Guo M. Sustainable Design of Urban Rooftop Food-Energy-Land Nexus. iScience. 2020. Vol. 23, no. 11. 101743. DOI: 10.1016/j.isci.2020.101743.

12. Jans-Singh M. K., Ward R., Choudhary R. Co-Simulation of a Rooftop Greenhouse and a School Building in London, UK. Building Simulation 2019. Rome, 2019. P. 3266-3273. DOI: 10.26868/25222708.2019.210355.

13. Yeo U.-H. et al. Rooftop Greenhouse: Design and Validation of a BES Model for a Plastic-Covered Greenhouse. Agriculture. 2022. Vol. 12, no. 7. 903. DOI: 10.3390/agriculture12070903.

КЛІМАТИЧНА ПРОДУКЦІЯ ДЛЯ ОЦІНКИ РИЗИКІВ В ГАЛУЗІ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

Лариса Недострелова¹, Галина Боровська¹

*¹Одеський національний університет імені І.І. Мечникова,
nedostrelova@ukr.net, halyna.borovska@onu.edu.ua*

Для розв'язання практичних соціальних та економічних проблем, пов'язаних з навколишнім середовищем, максимально використовується метеорологічна та кліматологічна інформація. Оцінки впливу мінливості та змін клімату на діяльність людини наразі належать до основних факторів локального, національного та глобального економічного розвитку, соціальних програм і керування ресурсами. Кліматологічне обслуговування орієнтоване на різних користувачів державного, комерційного і промислового секторів [1-3].

Через задоволення зростаючого попиту практики в метеорологічній і кліматичній інформації набули розвитку окремі напрями кліматологічних досліджень, в основу яких покладено відомості про стан всіх ланок

кліматичної системи. Джерелом цієї інформації є різні системи метеорологічних спостережень, кожна з яких має свої задачі, сферу застосування і методику вимірювання метеорологічних величин [1-3].

Матеріали спостережень на метеорологічних станціях України зберігаються в регіональних підрозділах гідрометеорологічних організацій Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС), Українського гідрометеорологічного центру ДСНС та Центральній геофізичній обсерваторії імені Бориса Срезневського (ЦГО). Ця інформація активно використовуються науково-дослідними і виробничими організаціями різних галузей економіки при складанні фактичної оцінки, прогностичних ретроспективних розрахунках екологічного стану України.

Для отримання кліматичної інформації можна використати відкриті веб-платформи, що використовують глобальні бази довідкових метеорологічних даних ВМО, до яких Україна офіційно подає дані національних метеорологічних спостережень, зокрема:

✓ ClimateCharts.net – застосунок для створення метеорологічних діаграм від Технічного Університету Дрездену, що дозволяє створити кліматограми для температури та опадів у різних форматах за періоди багаторічних спостережень для 20 основних метеостанцій України. URL: <https://climatecharts.net/>;

✓ ERA5 Explorer – застосунок для відображення локальних кліматичних даних на порталі Climate Data Store від Європейського центру середньострокових погодних прогнозів (ECMWF). Застосунок дозволяє отримати кліматограми та статистичні показники для температури, кількості опадів, швидкості та напрямків вітру, кількості тропічних і морозних ночей для будь-якої точки світу за координатами або на карті. Цей сервіс використовує ре-аналізовані набори історичних кліматичних даних ERA5, які є узгодженою комбінацією модельних даних із результатами глобальних метеорологічних спостережень. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/apps/c3s/app-era5-explorer>

Поточні кліматичні характеристики та їхній розподіл по території України також можна отримувати за даними Регіонального кліматичного центру з моніторингу клімату (Regional Climate Centre on Climate Monitoring – RCC Node-CM), що створює кліматичні карти регіону Європа та Близький Схід). Карти доступні для вільного перегляду, мають просторову роздільну здатність від 0,05° до 1°, якої достатньо для отримання значень регіональних кліматичних характеристик у межах України. URL: <https://wmo.int/activities/csis/rcc/regional-climate-centre-europe>

Потужним та зручним інформаційним джерелом історичних кліматичних даних є портал Climate Explorer, спільно розроблений Королівським метеорологічним інститутом Нідерландів (KNMI) та ВМО. URL: <https://crt-climate-explorer.nemac.org/>

Кліматичні характеристики основних метеорологічних параметрів за

період 1991-2020 рр. (стандартні кліматичні норми) по території України можуть бути отримані за замовленням з Кліматичного кадастру України, складеного ЦГО та Українським науково-дослідним гідрометеорологічним інститутом.

Проблема зміни клімату є одною з найважливіших проблем сучасності. Зміни клімату суттєво впливають на економіку і екологію країн, соціальне та політичне життя людей. Потепління кліматичної системи на сьогодні не викликає сумнівів. За даними експертів, останні 30 років у Північній півкулі були, ймовірно, найтеплішими за 1400 років, при цьому, багато із зареєстрованих змін кліматичної системи є нетиповими або безпрецедентними за останні десятиріччя чи навіть тисячоліття. Зміна температури повітря свідчить про суттєву зміну термічного режиму і всієї кліматичної системи. Наслідки цих змін мають переважно негативний характер і будуть посилюватись у майбутньому [1-6].

В кінці минулого-початку поточного століть на додаток до класичних кліматичних показників (середніх річних, сезонних значень тощо) розроблено систему кількісних показників для моніторингу, аналізу і оцінки змін екстремальних кліматичних показників, на основі добових даних метеорологічних спостережень, які дістали назву екстремальні індекси. Запропонована система екстремальних індексів дозволяє надати більш детальний аналіз і оцінку змін клімату, розкрити внутрішню структуру цих змін [7].

Відомі кліматичні індекси, можна звести до таких чотирьох груп:

- ✓ абсолютні індекси – максимальні та мінімальні за місяць, сезон або рік значення кліматичного показника в межах року, сезону або місяця;
- ✓ середні індекси – середні місячні, сезонні або річні значення «екстремальних» кліматичних показників (зокрема, середнього добового максимуму або мінімуму температури). До цієї ж групи відносять і середні за період спостережень значення деяких класичних показників (наприклад, середня за багато років середня добова температура);
- ✓ порогові індекси – кількість днів або тривалість безперервного періоду, протягом яких значення кліматичного показника вище або нижче встановленого порогового рівня;
- ✓ комплексні індекси, які розраховуються з використанням двох або більше кліматичних показників, у тому числі з використанням індексів перших трьох груп. Наприклад, кількість сухих і одночасно теплих днів, кількість вологих і одночасно холодних днів тощо.

Існують комплексні індекси, які визначаються по достатньо складних алгоритмах. Наразі у світовій практиці використовується 27 екстремальних індексів.

Очікувані зміни клімату сприяють великим ризикам у забезпеченні стійкого розвитку економіки країни в майбутньому, що пов'язано зі збільшенням ризиків, які можна поділити на дві групи. Перша група

обумовлена загальними для всіх секторів економіки проблемами вразливості до змін клімату. Друга група пов'язана з специфікою того чи іншого сектора економіки. До найбільш вразливих секторів економіки відносяться агропромисловий і енергетичний комплекси України, системи водозабезпечення і будівництво. Тому, відповідно до сектору економіки, доцільно адаптувати кліматичну інформацію і надати її спеціалістам тієї чи іншої галузі для використання її у заходах, спрямованих на адаптацію галузі до сучасних змін клімату [8, 9].

Адаптована кліматична інформація для сектору будівництва і архітектури:

- ✓ температура повітря (середня місячна і середня річна, найхолоднішої доби і найхолодніших п'яти діб 98% і 92% забезпеченості, середня добова амплітуда, дати початку і закінчення опалювального періоду);

- ✓ вітер (повторюваність панівного вітру і його середня швидкість для кожного місяця, багаторічна середня місячна швидкість вітру по румбах та повторюваність штилів);

- ✓ сонячна радіація (середня місячна сума прямої та розсіяної радіації, яка надходить до горизонтальної поверхні і вертикальної поверхні різної орієнтації за ясного неба і за середніх умов хмарності, сума сумарної радіації за опалювальний період, яка надходить до горизонтальної поверхні та вертикальної поверхні різної орієнтації за середніх умов хмарності, енергетична освітленість поверхонь різної орієнтації сонячною радіацією за умови ясного неба і 10-бальної хмарності;

- ✓ вологість повітря (середня місячна відносна вологість, середня за місяць середня добова амплітуда);

- ✓ хмарність (середня місячна кількість загальна і нижнього ярусу, середня місячна кількість ясних і похмурих днів по загальній хмарності, середня висота нижньої межі хмарності для кожного місяця сезону, холодного (з листопада по березень) і теплого (з квітня по жовтень) періодів);

- ✓ опади (багаторічна середня місячна кількість і сума їх за рік), сніговий покрив (кількість днів);

- ✓ природна освітленість (середні значення по місяцях сумарної і розсіяної денної горизонтальної освітленості та тривалістю).

ЛІТЕРАТУРА

1. Оцінка впливу кліматичних змін на галузі економіки України (2011) / За редакцією Степаненка С.М., Польового А.М. Одеса: Екологія, 694 с. <http://eprints.library.odku.edu.ua/id/eprint/2252>

2. Кліматичні зміни та їх вплив на сфери економіки України: монографія (2015) / за ред. С.М. Степаненка, А.М. Польового. Одеса: ТЕС, 520 с. <http://eprints.library.odku.edu.ua/id/eprint/2269>

3. Кліматичні ризики функціонування галузей економіки України в

умовах зміни клімату: монографія / за ред. С. М. Степаненка, А. М. Польового. Одеський державний екологічний університет. Одеса: ТЕС, 2018. 548 с. <http://eprints.library.odku.edu.ua/id/eprint/4916/>

4. Balabukh V. O. et al. Extreme weather events in Ukraine: occurrence and changes. Extreme Weather / Edited by P. J. Sallis. London, UK: Intech Open, 2018. Pp. 85-106.

5. Crespi A., Terzi S., Cocuccioni S., Zebisch M., Berckmans J., Füßel H-M (2020) "Climate-related hazard indices for Europe". European Topic Centre on Climate Change impacts, Vulnerability and Adaptation (ETC/CCA) Technical Paper 2020/1.

DOI: 10.25424/cmcc/climate_related_hazard_indices_europe_2020

6. State of the Climate in Europe State of the Climate in Europe 2022. WMO-No. 1320. 2022. 40 p.

7. Climate Assessment & Dataset (ECA&D). Project team ECA&D: Royal Netherlands Meteorological Institute KNMI: December 9, 2021, Version: 11, 53 P.

8. Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації: аналітична доповідь / за ред. С. П. Іванюти. Київ : НІСД, 2020. 110 с. ISBN 966-554-344-2

9. Адаптація до зміни клімату: короткий путівник для громад Рівне 2023, 38 с. State of climate services. FIVE-YEAR PROGRESS REPORT (2019-2024). WMO-No. 1363. ISBN 978-92-63-11363-4

ГІС-МОНІТОРИНГ ТА ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ ЯК ІНСТРУМЕНТАЛЬНА ОСНОВА СТАЛОГО УПРАВЛІННЯ ЗЕМЕЛЬНИМИ РЕСУРСАМИ ПРОМИСЛОВОГО МІСТА

Микита Губа¹, Наталія Непошивайленко², Володимир Кремень³

¹Комунальний заклад «Науковий ліцей імені Анатолія Лигуна» Кам'янської міської ради, nickitapost@gmail.com

²Дніпровський державний технічний університет, npa2013@ukr.net

³Департамент екології та природних ресурсів Кам'янської міської ради, eko@kam.gov.ua

У сучасній парадигмі «зеленого будівництва» розвиток міського середовища розглядається не лише через енергоефективність окремих споруд, а як комплексна оптимізація функціонування урбосистеми. Ключовим ресурсом у цьому контексті є «зелений каркас» міста, який виконує роль природного регулятора мікроклімату, інженерного бар'єра для забруднювачів та інструмента збереження земельних ресурсів. Для великих промислових центрів, таких як м. Кам'янське, питання ресурсозбереження та передових методів моніторингу екосистемних послуг набувають критичного значення. В умовах глобальних кліматичних змін та необхідності системного екологічного відновлення промислових регіонів

України, розробка об'єктивних методів оцінки природного капіталу стає фундаментом для реалізації стратегій сталого розвитку та впровадження стандартів ESG на муніципальному рівні.

Традиційні методи інвентаризації насаджень є ресурсовитратними та не дають можливості оперативно оцінювати динаміку змін у великих масштабах. У проведеному дослідженні пропонується впровадження високотехнологічної системи моніторингу на основі поєднання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та геоінформаційного моделювання.

Розглянуто технології ДЗЗ як методологічну основу сучасного екологічного моніторингу та обґрунтовано переваги використання мультиспектральних супутникових знімків для аудиту стану фітоценозів за допомогою нормалізованого диференційного вегетаційного індексу NDVI. Розроблено алгоритм формування бази геопросторових даних, що описує процедуру обробки космознімків Sentinel, а також деталізує математичний апарат розрахунку вегетаційних індексів. Для забезпечення високої достовірності спектральних характеристик в умовах значного аерозольного забруднення м. Кам'янське, використано алгоритм синтезу композитів за максимальними значеннями (MVC). Даний підхід дозволяє ефективно нівелювати вплив промислового смогу та хмарності на результати розрахунку індексу NDVI.

Використання супутникових систем Sentinel-2 дозволяє отримувати мультиспектральні дані з високою часовою частотою (до 5 діб), що перетворює систему моніторингу на динамічний інструмент управління «зеленими активами» міста. Технологія спектрального аналізу з використанням індексу NDVI дозволяє класифікувати стан рослинності за рівнем фотосинтетичної активності, що є цифровим індикатором здоров'я екосистеми. ГІС-платформа ArcGIS Desktop 10.8 використовується як середовище для інтеграції різномірних даних, проведення просторової інтерполяції та побудови прогнозних моделей трансформації ландшафту. Встановлено, що стабільно високі значення NDVI ($>0,6$) характерні переважно для старовікових паркових масивів та центральних скверів міста. Саме ці території виступають основними енергоефективними вузлами, що забезпечують локальне зниження температури на $3\text{--}5^{\circ}\text{C}$ та формування стійких зон комфорту.

Застосування ГІС-моделювання у поєднанні з регулярним оновленням супутникових даних дозволяє сформувати динамічну автоматизовану систему зеленої каркасу міста. Це перетворює моніторинг із пасивного спостереження на інструмент предиктивного управління екосистемними послугами в межах стратегії Smart Green City, забезпечуючи точність ідентифікації об'єктів до 10 метрів.

Ефективність використання міських земель безпосередньо залежить від балансу між забудовою та природними компонентами. Результати проведеного дослідження демонструють, як дані ДЗЗ допомагають виявити

приховані резерви земельного фонду та оцінити якість експлуатації існуючих територій. Сформовані картографічні моделі з просторовою розрізненістю 10 метрів забезпечують достатню точність для переходу від загальноміського аналізу до об'єктного проектування. Це відкриває можливості для мікрокліматичного моделювання на рівні окремих житлових кварталів, дозволяючи обґрунтувати розташування вітрозахисних екранів та «зелених дахів» як елементів пасивної енергоефективності будівель.

Аналіз десятирічної динаміки (2015–2025 рр.) цифрових карт урбанізованої території м. Кам'янське за розрахованими індексами NDVI показав, що значна частина земель промислових зон та прилеглих територій піддається вторинній сукцесії або експансії інвазійних видів. Це свідчить про неефективне використання міських земельних ресурсів, які доцільно було б трансформувати у продуктивні «зелені зони» з високим коефіцієнтом екосистемних послуг. Крім того зафіксовано, що у роки з аномальними температурами (наприклад, 2019 р.) індекс вегетації знижувався до критичних позначок на 90% території міста, що вказує на необхідність впровадження технологій «розумного поливу» та вибору стійких порід дерев у межах проектів зеленого будівництва для збереження родючості ґрунтів та вологи. На основі побудованих картографічних моделей ідентифіковано зони «теплових островів», де розширення площ озеленення є пріоритетним для зниження витрат енергії на кондиціонування будівель та створення комфортного мікроклімату урбосистем не тільки у літній період року завдяки нарощуванню біомаси, а також впродовж року за рахунок створення вітрозахисних екранів у щільній багатоповерховій забудові.

На основі отриманих результатів дослідження, для цілей зеленого будівництва пропонуються наступні рішення:

1. Впровадження методики, використаної в роботі, дозволяє муніципалітетам та забудовникам економити до 40% бюджету на польові дослідження та аудит стану насаджень.

2. Стабільне функціонування високопродуктивної рослинності ($NDVI > 0,6$) здатне локально знижувати температуру повітря на 3–5°C у літній період. Створення «зелених коридорів» на основі виявлених ГІС-методами зон деградації є ефективним засобом боротьби з тепловим забрудненням.

3. Для умов промислового Придніпров'я продемонстровано можливість використання супутникових композитів максимальних значень для нівелювання промислового смогу при оцінці природних ресурсів. Це відкриває шлях до впровадження стандартів "Smart Green City" у найбільш екологічно навантажених регіонах.

Результати дослідження доводять, що ГІС та ДЗЗ є не просто методами візуалізації, а повноцінними інженерними системами, які забезпечують науково обґрунтоване управління природними ресурсами. Впровадження такої інженерної платформи є важливим для оптимізації муніципальних

витрат на іригацію та догляд за насадженнями, забезпечуючи максимальну віддачу від кожної одиниці інвестованих у «зелене будівництво» ресурсів. Використання цих технологій є обов'язковою умовою для проектування енергоефективних та стійких міських просторів у межах стратегії зеленого будівництва. Отримані результати підтверджують, що інтеграція методів ДЗЗ у муніципальне управління створює науково обґрунтовану платформу для ресурсозбереження, дозволяючи оптимізувати витрати на утримання зеленого каркаса при одночасному підвищенні загальної енергоефективності урбосистеми.

ЛІТЕРАТУРА

1. Губа М.О., Непошивайленко Н.О. Дослідження багаторічної динаміки масштабів озеленення урбанізованої частини м. Кам'янське з використанням ДЗЗ та ГІС-технологій. – Дніпро: Мала академія наук України», 2026. – 33 с.
2. Денисенко Н. І. Урбоекологічні аспекти формування зелених зон у великих промислових містах України // Екологічні науки. – 2019. – № 3 (26). – С. 45–52.
3. Дистанційне зондування Землі: аналіз космічних знімків у геоінформаційних системах: навч.-метод. посіб. / С. О. Довгий, С. М. Бабійчук, Т. Л. Кучма [та ін.]. – Київ: Національний центр «Мала академія наук України», 2020. – 268 с.

ВИКЛАДАННЯ АЛГОРИТМІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ПОПЕРЕЧНОГО РОЗКРОЮ ПИЛОМАТЕРІАЛІВ НА ЗАГОТОВКИ ДЛЯ СТОЛЯРНИХ І БУДІВЕЛЬНИХ ВИРОБІВ

Сергій Шевченко¹, Олена Скрипник¹, Анна Опашнюк¹

*¹Державний біотехнологічний університет,
serg.shevchen@btu.kharkiv.ua, elenases2015@btu.kharkiv.ua,
a.opashniuk@btu.kharkiv.ua*

Потреба в ощадливому використанні деревини призводить до поширення використання технології клеєних матеріалів, яка ґрунтується на зрощуванні бездефектних ділянок деревини, отримуваних шляхом вирізання дефектних ділянок з рейок, дощок і т.п. пиломатеріалів. Ця технологія використовується при виготовленні столярно-будівельних виробів і виробів для дерев'яного домобудування, таких як клеєні бруси та стінові панелі з перехресно-клеєної деревини [1].

Вирізання дефектних ділянок здійснюється із використанням лінії оптимізації (по суті - швидкодійного круглопилкового верстата із системою датчиків і комп'ютерним керуванням для визначення та реалізації раціональної схеми розрізання пиломатеріалів на заготовки), яка функціонує

відповідно до одного чи декількох наперед заданих алгоритмів. Отже, при викладанні будови та функціональних можливостей ліній оптимізації і технологій їх використання виникає потреба роз'яснення типових алгоритмів, використовуваних у такому обладнанні.

До типових алгоритмів, які реалізуються в лініях оптимізації багатьох виробників, відносяться [2]:

- алгоритм розкрою рейки (чи бездефектної ділянки рейки) на заготовки заданих довжин;

- алгоритм розкрою рейки (чи бездефектної ділянки рейки) на заготовки довжиною із заданого діапазону, які використовуються для наступного фрезерування зубчастих шипів і поздовжнього зрощування (при цьому нижня межа діапазону визначається виходячи з мінімальної допустимої довжини заготовки, а верхня межа - виходячи з технічних обмежень обладнання для фрезерування зубчастих шипів);

- комбінований алгоритм, який поєднує вище наведені алгоритми.

Отже, задачі, вирішувані в лініях оптимізації, є різновидом класичної оптимізаційної задачі одновимірного розкрою матеріалу, огляд математичних методів розв'язання якої (зокрема, методи лінійного програмування, евристичні методи тощо) наведено в дослідженні [3] .

Однак, як показує практика викладання дисципліни «Технологія клеєних матеріалів» студентам спеціальності «Деревообробні та меблеві технології», для початкового вивчення особливостей використання ліній оптимізації доцільно здійснювати моделювання алгоритмів їх роботи в електронній таблиці із використанням вбудованих засобів пошуку оптимальних рішень. При цьому колективну роботу доцільно здійснювати в хмарній таблиці.

Розглянемо методику моделювання роботи алгоритму оптимізації розкрою рейки на заготовки, номінальні довжини яких відповідають заданому переліку. Розпочинати доцільно з найпростішого випадку, коли на кількість заготовок кожного різновиду не накладається обмежень. Отже, вхідними даними є довжина рейки, ширина пропилу та можливі значення номінальної довжини заготовок. Варійованими параметрами є кількість заготовок кожної з номінальних довжин, а показником якості - залишок деревини після вирізання заготовок. Зазвичай, такі обмеження, як цілочисельність і не від'ємність варійованих параметрів, зручно задавати в налаштуваннях вбудованого засобу оптимізації. По завершенні обчислюють баланс деревини, який відображує перехід сировини в заготовки, кускові відходи та тирсу. Такий баланс доцільно розраховувати й у натуральному, і у вартісному вираженні.

Різновидом цього алгоритму є оптимізація розкрою рейки за показником сумарної вартості одержуваних заготовок з урахуванням вартості заготовок кожної із заданих довжин.

Наступним у міру зростання складності є моделювання роботи

алгоритму розкрою рейки на заготовки заданих довжин і довільних довжин (із заданого діапазону довжин). При цьому використовується додаткові варійовані параметри - номінальні довжини заготовок довільної довжини. Оптимізація здійснюється за показником сумарної вартості заготовок з урахуванням того, що вартість заготовок довільної довжини є пропорційною їх довжині з урахуванням втрат деревини на нарізання шипів (дорівнює довжини одного з'єднання для кожної заготовки).

Реальні промислові алгоритми роботи лінії оптимізації є значно складнішими, оскільки потрібно планувати розкрій багатьох рейок для виконання виробничої програми. Тож наступним за складністю є моделювання пошуку раціональної схеми розкрою декількох рейок заданої довжини для виконання виробничої програми та моделювання роботи у випадку, коли рейки різної довжини надходять в обробку одна за одною, а після розкрою кожної з них коригується залишок виробничої програми.

Зауважимо, що розглянуті вище алгоритми стосуються випадку, коли межі дефектних ділянок уже визначено (як це має місце в лініях оптимізації з використанням лазерного вказівника чи розмічанням дефектних ділянок флюоресцентною крейдою [2]).

Якщо ж для визначення меж дефектних ділянок використовуються засоби технічного зору чи неруйнівного контролю (наприклад, рентгенівського контролю або комп'ютерної томографії) [4], то постає ще одна задача - задача оптимального визначення меж ділянок, які потрібно видалити, з урахуванням можливого недовикористання придатної деревини або ж виникнення дефекту обробки при занадто близькому розташування місця розрізу до вади деревини (насамперед, сучків). Отже, більш складною задачею, яка може вирішуватися при виконанні дослідницьких робіт, є вибір місць розрізів рейки з урахуванням ймовірності сколювання деревини при наступному нарізанні зубчастих шипів внаслідок відхилення напрямку волокон деревини від поздовжньої вісі рейки [5, 6].

В якості додатково завдання до розглянутих робіт можна рекомендувати побудову умовного графічного зображення рейки зі вказівкою місць розрізів. Подібне моделювання може бути корисним і при вивченні комп'ютерних систем оптимізації поперечного розкрою профільованих матеріалів - наприклад, профілів для розсувних систем меблів, крайкових матеріалів або матеріалів для м'яких меблів (при цьому ширина розрізу не враховується).

Вочевидь, по мірі розширення використання вживаної деревини в процесі переходу до циркулярної біоекономіки зазначені алгоритми набуватимуть все ширшого використання та будуть удосконалені.

ЛІТЕРАТУРА

Fredrik Ljunggren, Maria Fredriksson, Nils Johansson, Angela Sasic Kalagasidis. Cross-laminated timber: a state-of-the-art review of moisture, fire,

acoustics, and energy-related aspects. *Wood Material Science & Engineering*. 2026. 21:2. P. 1224-1246. URL: <https://doi.org/10.1080/17480272.2025.2507145> (access date 02.05.2026).

T 2030 NC. <https://www.omgainc.com/products/2117-t-2030-nc.html> (access date 02.05.2026).

Ben Amor H., Valério de Carvalho J. Cutting Stock Problems. In: Desaulniers G., Desrosiers J., Solomon M. M. (eds). *Column Generation*. Springer, Boston, MA. 2005. URL: https://doi.org/10.1007/0-387-25486-2_5 (access date 02.05.2026).

Peter Niemz, David Mannes. Non-destructive testing of wood and wood-based materials. *Journal of Cultural Heritage*. 2012. Volume 13. Issue 3. Supplement. Pp. S26-S34. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.04.001> (access date 02.05.2026).

Shevchenko S. A. Research into the Influence of Swirling Wood Grain on Wood Splintering at Milling Finger Joint Elements. *Technical Service of Agriculture, Forestry and Transport*. 2025. №27. P. 2016-221. URL: <http://tsafts.btu.kharkiv.ua/tsafts/uk/article/view/217/215> (access date 02.05.2026).

Shevchenko Serhii. Raw and Analyzed Data for: Research into Influence of Swirling Wood Grain on Wood Splintering at Milling Finger Joint Elements : [data set]. Kharkiv, Ukraine, 2026. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.18914780> (access date 02.05.2026).

ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ ГІДРОЕКОЛОГІЧНИХ ЗБИТКІВ ВІД ВОЄННИХ ДІЙ ЯК ІНФОРМАЦІЙНА ОСНОВА ЗЕЛЕНОГО ПІСЛЯВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ ТЕРИТОРІЙ

Владислав Максименко¹, Віталій Безсонний²

¹ Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
maksymenko.vladyslav.o@gmail.com

² Харківський національний економічний університет імені Семена
Кузнеця, vitalii.bezsonnyi@hneu.net

Післявоєнне зелене відновлення територій не може розглядатися лише як сукупність будівельних, інженерних або містобудівних рішень. Його передумовою є достовірна екологічна діагностика територій, що зазнали впливу бойових дій, руйнування гідротехнічної інфраструктури, підтоплення, осушення, вторинного забруднення та зміни природного режиму водних об'єктів. Особливої актуальності це набуває для басейнів великих річок і водосховищ, де водні ресурси одночасно виконують екологічні, господарські, санітарні, рекреаційні та інфраструктурні функції. У такому контексті дистанційний моніторинг є важливим інформаційним інструментом для експертизи екологічних збитків від військових дій,

оцінювання ризиків для навколишнього середовища та обґрунтування пріоритетів зеленого відновлення [1, 2].

Метою роботи є обґрунтування можливостей використання відкритих супутникових даних Sentinel-2 для оперативної індикації гідроекологічних наслідків воєнних дій і формування інформаційної основи для екологічно безпечного післявоєнного відновлення територій. Дослідження спирається на результати аналізу просторово-часової трансформації Каховського водосховища після руйнування греблі Каховської ГЕС 6 червня 2023 року, а також на концепцію компенсаційного моніторингу поверхневих вод в умовах, коли традиційний наземний контроль є обмеженим або небезпечним.

Методологічну основу становить поєднання візуального дешифрування супутникових сцен, індексного аналізу та порівняльно-часової інтерпретації. Для дослідження використано малоохмарні сцени Sentinel-2 MSI рівня L2A, отримані через Copernicus Data Space Ecosystem [4]. Ключовими часовими зрізами були передаварійний стан 25 травня 2023 року, післяаварійний стан 25 червня 2023 року та осінній стан території 3 жовтня 2023 року. Для виділення відкритої водної поверхні використано NDWI, а для виявлення фотосинтетично активного рослинного покриття на осушених ділянках ложа водосховища - NDVI [5, 6]. Додатково враховано частотний розподіл значень пікселів, що дозволяє перевірити зміну домінуючих спектральних характеристик території.

Отримані результати свідчать, що після руйнування греблі Каховської ГЕС відбулася швидка гідрологічна і ландшафтна перебудова нижньодніпровської геосистеми. Суцільне водне дзеркало, характерне для передаварійного стану, упродовж перших тижнів трансформувалося у вузьке русло Дніпра, систему залишкових водойм, перезволожені ділянки та значні площі оголених донних відкладів. Додатні значення NDWI, які до аварії переважали в межах акваторії, після руйнування греблі зберігалися переважно у руслових і залишково-водних фрагментах. Це підтверджує втрату просторової цілісності водного об'єкта та формування нової мозаїчної структури поверхневого покриття [2, 3].

Аналіз NDVI за осінній період 2023 року засвідчив появу фотосинтетично активного рослинного покриття на частині осушеного ложа водосховища. Такі ділянки до руйнування греблі перебували під водою, тому їхнє вегетування можна інтерпретувати як ознаку ранньосукцесійної рослинної колонізації оголених донних субстратів. Водночас цей процес має неоднозначне екологічне значення: він може свідчити про початкове стихійне відновлення заплавлених, лучних і болотних біотопів, але також супроводжується ризиками вторинного забруднення, пилового перенесення донних відкладів, деградації залишкових водойм і пожежної небезпеки.

Для тематики зеленого будівництва отримані результати важливі не лише як приклад дистанційної фіксації наслідків екоциду, а й як інструмент

прийняття рішень щодо відновлення територій. Інженерні, водогосподарські та ландшафтні рішення у зонах, що зазнали гідроекологічної трансформації, мають спиратися на актуальну просторову інформацію про межі залишкових водойм, перезволожені ділянки, небезпечні донні відклади, осередки рослинної колонізації та потенційні зони вторинного забруднення. Без такої інформації зелене відновлення ризикує перетворитися на формальну реконструкцію без урахування реального екологічного стану території.

Супутниковий моніторинг доцільно розглядати як компенсаційний просторово-часовий контур, який не замінює лабораторний контроль якості води, але зменшує просторову і часову невизначеність у кризових умовах. Sentinel-2 дозволяє виявляти зміну водної поверхні, картографувати зони затоплення або висихання, фіксувати трансформацію берегової лінії, визначати ділянки для пріоритетного польового обстеження та підтримувати підготовку картографічних матеріалів для органів управління. Остаточні висновки щодо хімічного, токсикологічного або мікробіологічного стану водних об'єктів мають формуватися на основі лабораторних досліджень і польової валідації.

Перспективним напрямом розвитку є інтеграція даних Sentinel-2 із радарними знімками Sentinel-1, цифровими моделями рельєфу, гідрохімічними даними, результатами наземних спостережень і методами інтелектуального аналізу даних. У такій системі моделі машинного навчання можуть використовуватися для автоматизованої класифікації супутникових сцен після належного навчання і валідації, а контрольована звітність на основі Retrieval-Augmented Generation - для прозорого документування джерел, індикаторів і управлінських висновків. Таким чином, дистанційний моніторинг гідроекологічних збитків може стати одним із базових інструментів екологічно обґрунтованого зеленого відновлення України [7, 8].

ЛІТЕРАТУРА

1. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal of the European Communities. 2000. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CElex:32000L0060>.
2. United Nations Environment Programme. Rapid Environmental Assessment of Kakhovka Dam Breach, Ukraine, 2023. Nairobi: UNEP, 2023. URL: <https://www.unep.org/resources/report/rapid-environmental-assessment-kakhovka-dam-breach-ukraine-2023>.
3. Shumilova O., Sukhodolov A., Osadcha N. et al. Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. Science. 2025. Vol. 387, No. 6739. P. 1181-1186. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.adn8655>.
4. Drusch M., Del Bello U., Carlier S. et al. Sentinel-2: ESA's Optical High-

Resolution Mission for GMES operational services. Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 120. P. 25-36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>.

5. McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing. 1996. Vol. 17, No. 7. P. 1425-1432. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.

6. Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment. 1979. Vol. 8, No. 2. P. 127-150. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0).

7. Dosovitskiy A., Beyer L., Kolesnikov A. et al. An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale. ICLR 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2010.11929>.

8. Lewis P., Perez E., Piktus A. et al. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. Advances in Neural Information Processing Systems. 2020. Vol. 33. P. 9459-9474.

ВПЛИВ ЛУЖНИХ МЕТАЛІВ У БІОМАСІ НА ПРОЦЕСИ ЗАБРУДНЕННЯ КОНВЕКТИВНИХ ПОВЕРХОНЬ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРІВ

Микола Белюженко¹,

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
n.beliuzhenko@gmail.com*

Наразі основним джерелом виробництва біопалива і енергії з біомаси у світі є деревна біомаса – на частку дров, тріски, гранул та деревного вугілля припадає більше 85% загального обсягу споживання біомаси для енергетичних потреб. Перспективним напрямком розвитку біоенергетики і збільшення обсягів енергетичного використання біомаси вважається залучення с-г залишків до паливно-енергетичного балансу країн. Сьогодні з біомаси аграрного походження виробляється лише 3% загального обсягу біоенергії, але за оцінками фахівців, потенціал біомаси в світі цього виду складає від 356 до 1646 млн т н.е./рік, що може забезпечити 3-14% загального постачання первинної енергії у світі [1].

Основною проблемою використання аграрної біомаси в енергетиці є її специфічний хімічний склад, зокрема підвищений вміст хлору та лужних металів — калію (K) і натрію (Na). Під час термічного розкладу ці елементи активно переходять у газову фазу з утворенням летких сполук, таких як хлорид калію (KCl) та хлороводень (HCl) [2]. Висока концентрація KCl у димових газах інтенсифікує процеси утворення відкладень, тоді як значний вміст хлоридів у самих відкладеннях суттєво прискорює корозійні процеси на поверхнях теплообміну.

Котли, що працюють на біомасі, використовують різні види палива (деревина, солома, лушпиння соняшника тощо), які характеризуються різним хімічним складом, вмістом мінеральних компонентів та домішок. Основними складовими біомаси є вуглець, водень та кисень, однак у паливі також присутні неорганічні елементи: N, P, K, Ca, Mg, Na, Si, S та Cl. Крім того, можуть бути присутні слідові концентрації важких металів, зокрема кадмію та свинцю.

Паливо з біомаси, таке як солома, багате на лужні метали (K та Na), які переважно присутні у вигляді простих солей та органічних сполук, а також хлору. Ці сполуки швидко вивільняються в газову фазу під час горіння, утворюючи HCl та KCl.

Висока кількість KCl у газах згоряння часто пов'язана з посиленням утворенням відкладень. Це, у свою чергу, призводить до корозії конвективних поверхонь у котлах, що працюють на біомасі [2]. Сірка також бере участь у явищах, пов'язаних з корозією.

Під час спалювання біомаси відбувається складний комплекс фізико-хімічних процесів, що включає випаровування, піроліз, окиснення та реакції в газовій фазі. Лужні метали, насамперед калій, при температурах близько 700 °C переходять у газоподібний стан.

При інтенсивному забрудненні конвективних поверхонь нагріву біопаливного теплогенератора відбувається зростання аеродинамічного опору конвективних пакетів через часткове або повне перекриття міжтрубного простору відкладеннями. Це призводить до погіршення умов теплообміну та зниження коефіцієнта теплопередачі, що, у свою чергу, викликає перегрів конвективних поверхонь нагріву та підвищення температури відхідних газів.

Внаслідок зазначених процесів спостерігається зниження ефективності роботи котельного обладнання, що проявляється у перевитраті палива та зниженні ККД котла. Додатково обмежується теплова потужність установки, зростають викиди золи та оксидів азоту (NO_x), а також погіршуються показники надійності та ресурсу обладнання.

Експлуатаційні наслідки включають збільшення частоти ремонтних робіт, підвищення витрат на технічне обслуговування та необхідність періодичного ручного розшлакування поверхонь нагріву.

Досвід експлуатації показує, що значення коефіцієнтів теплової ефективності та забруднення, отримані на діючих котельних агрегатах, значно відрізняються від рекомендованих нормативних значень, та обмеження номінальної продуктивності теплогенератора внаслідок перевищення температур металу труб поверхонь нагріву допустимих значень [3]. У зв'язку з цим для підвищення надійності експлуатації теплогенераторів на біопаливі необхідно виявити та обґрунтувати фактори, що впливають на показники теплової ефективності при спалюванні різних видів біопалива.

Основною метою випробувань було проведення аналізу біопалива та золи, для визначення впливу сполук калій (K) і натрій (Na) в біопаливі на інтенсивність забруднення конвективних поверхонь.

Формування зольних відкладень на поверхнях нагріву теплогенераторів на біопаливі є багатоступеневим процесом. Спочатку відбувається конденсація летких сполук (переважно KCl), після чого на утворений тонкий шар осідають частинки золи та продуктів згоряння.

Калій сприяє утворенню легкоплавких сполук, які підвищують адгезію частинок до металевих поверхонь. Це призводить до інтенсифікації процесів шлакування та забруднення теплообмінних поверхонь.

Крім того, присутність хлоридів у відкладеннях є основним фактором розвитку високотемпературної корозії за хлоридним механізмом, що суттєво скорочує ресурс поверхонь нагріву.

На відміну від калію, кальцій у складі біомаси утворює переважно тугоплавкі сполуки (оксиди, сульфати), які не конденсуються в газовій фазі та виводяться разом із золою.

Для аналізу було обрано кілька видів біомаси: верба, кора, необроблена деревина, деревина знесення, солома та торф. Дані щодо хімічного складу біомаси були отримані з бази даних «ECN Phyllis Database».

Достовірні дані були взяті з бази даних хімічного складу біомаси "ENC Phyllis data base" (<https://phyllis.nl/Browse/Standard/ECN-Phyllis>).

Аналіз свідчить про активну участь калію у процесах переносу та осадження у вигляді низькоплавких сполук, зокрема хлоридів і оксиду калію. Утворення таких сполук сприяє підвищенню адгезії частинок до поверхонь нагріву та інтенсифікації процесів шлакування і забруднення теплообмінних поверхонь.

Під час спалювання біомаси різні хімічні елементи взаємодіють між собою, утворюючи сполуки з різними фізико-хімічними властивостями. Зокрема, кальцій (Ca) зазвичай реагує з киснем (O₂) або сіркою (S) у паливному шарі на решітці топки з утворенням високо температурних (важкоплавких) сполук. Завдяки високим евтектичним температурам такі зольні компоненти переважно залишаються у твердому стані та видаляються безпосередньо в топці або вловлюються в золоуловлюючих пристроях (наприклад, електрофільтрах).

На відміну від кальцію, калій (K) характеризується значно нижчими температурами плавлення та випаровування. У процесі горіння він переходить у газову фазу, причому інтенсивне випаровування починається вже при температурах близько 700 °C.

Калій вивільняється з паливного шару у вигляді газоподібних сполук. Після цього відбувається захоплення луку, під час якого калій реагує з компонентами газової фази. Залежно від вмісту сірки (S) та хлору (Cl) у паливі можливе утворення сульфатів або хлоридів калію. Оскільки більшість видів біомаси характеризується відносно низьким вмістом сірки

та підвищеним вмістом хлору, домінуючою сполукою є хлорид калію (KCl).

Хлорид калію має низьку температуру конденсації, тому в зоні високих температур він перебуває у газоподібному стані, а при контакті з більш холодними поверхнями нагріву (з температурою нижче $\approx 700^\circ\text{C}$) інтенсивно конденсується на металі. У результаті формується первинний тонкий шар відкладень, який у подальшому слугує основою для накопичення більш товстих зольних нашарувань.

Крім того, присутність KCl у відкладеннях сприяє розвитку високотемпературної корозії за рахунок хлоридного механізму, що додатково погіршує стан теплообмінних поверхонь та скорочує термін їх експлуатації.

Таким чином, вміст лужних металів, насамперед калію, є одним із визначальних факторів інтенсивності забруднення та високотемпературної корозії конвективних поверхонь нагріву теплогенераторів на біомасі. Врахування хімічного складу біопалива є необхідною умовою для підвищення теплової ефективності, надійності та ресурсу котельного обладнання.

Одним із напрямів зниження інтенсивності шлакування та відкладання зольних відкладень є оптимізація температурного режиму процесу горіння в камері згоряння та зменшення вмісту зольних частинок в продуктах згоряння на вході в конвективні поверхні теплогенератора [4]. Перспективною є комбінована шахтно-шарова технологічна схема організації процесу спалювання твердого палива, яка реалізована в конструкції механізованих теплогенераторів. Конструкція теплогенератора передбачає піроліз палива в шахті, горіння палива в шарі, спалювання пилових частинок в об'ємі первинної топкової камери та у вторинній камері із золоосадженням, що забезпечує очищення продуктів горіння. Зольні частинки осаджуються ще на вході в зону конвективних теплообмінних поверхонь, що суттєво знижує інтенсивність їх забруднення та, відповідно, сприяє підвищенню теплової ефективності теплообмінного процесу. За комбінованої схеми топкового процесу розрахункові середні величини приросту коефіцієнта корисної дії теплогенератора за номінального навантаження складають майже 8 % порівняно з однокамерною схемою спалювання та 4 % порівняно зі схемою з камерами згоряння і золоосадження [5]. Така схема забезпечує енергетичні і екологічні показники на рівні європейських вимог та дозволяє ефективно використовувати дешеві місцеві види палива.

ЛІТЕРАТУРА

1. Г.Г Гелетука. Науково-технічні засади виробництва енергії з біологічних видів палива. Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України, 2021.
2. Håkan Kassman. Strategies to Reduce Gaseous KCl and Chlorine in

Deposits during Combustion of Biomass in Fluidised Bed Boilers. Chalmers tekniska högskola, 2012.

3. Ялова А.М, Бондар Н.В. Вплив шлакування та забруднення поверхонь нагріву на надійність роботи твердопаливних ТЕС. Вісник криворізький національний університет. 2021. № 53. С.151-157.

4. Сенчук М., Рибка А., Юрко О. Зниження впливу забруднення поверхонь нагріву твердопаливних теплогенераторів невеликої потужності. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 33. – С. 15-21.

5. Сенчук М. Підвищення ефективності спалювання твердого палива в шарі. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 39. – С. 29-37.

ЗЕЛЕНЕ БУДІВНИЦТВО ТА УНІВЕРСАЛЬНИЙ ДИЗАЙН: СТРАТЕГІЇ СОЦІАЛЬНОЇ АДАПТАЦІЇ ОСІБ З ІНВАЛІДНІСТЮ В ПОВОЄННИЙ ПЕРІОД

Карина Данова¹, Вікторія Малишева¹, Людмила Колибельнікова¹

*¹Харківський національний університет міського господарства
імені О.М. Бекетова, karina.danova@kname.edu.ua*

Сучасні демографічні процеси в Україні, зумовлені повномасштабною військовою агресією РФ, стрімким зростанням рівня захворюваності та травматизації населення, призводять до тенденції різкого збільшення чисельності людей з інвалідністю. Така динаміка фіксувалася ще до війни, проте сьогодні вона набула загрозливих масштабів. Враховуючи ці виклики, постає нагальна потреба у фундаментальному переосмисленні принципів розвитку міст у рамках майбутньої повоєнної відбудови, адже Україна має унікальний шанс не просто відновити зруйновані міста, а побудувати принципово нову інфраструктуру, яка відповідатиме вимогам майбутнього.

Загалом сталий розвиток міста – це процес, заснований на засадах справедливості, рівності та доступності. Місто має плануватися та управлятися як відкрита система, що підтримується демократичними та інклюзивними інструментами [1]. Такий підхід повною мірою забезпечується концепцією «зеленого будівництва» (Green Building). На сьогодні зелені тенденції є пріоритетними, оскільки вони корелюють із Глобальними цілями сталого розвитку ООН, дозволяють забезпечити високу екологічність будівельних процесів та максимально нівелювати антропогенний вплив на довкілля. Одночасно із впровадженням зелених практик, будівельний сектор може забезпечити суттєве покращення соціального клімату та фізичного середовища міста через інклюзивні практики [1].

Особи з інвалідністю та люди похилого віку належать до вразливих

верств населення, до яких висуваються підвищені вимоги в контексті екологічності, ергономічності та безпеки соціального простору. Для цієї категорії мешканців архітектурне середовище слугує або основою для підтримання функціональних та психологічних показників, або чинником, що їх стрімко погіршує. На жаль, сучасний фокус забудовників часто обмежується лише формальним забезпеченням фізичної доступності (наявність пандусів), що суттєво обмежує розвиток справжньої інклюзивності. Наприклад, досвід Нової Зеландії показує, що конструкції будівель переважно враховують лише обмеження мобільності, залишаючи поза увагою потреби людей із порушеннями зору, слуху чи когнітивними розладами [2].

Підходи зеленого будівництва дозволяють розвивати інклюзивність значно глибше. З одного боку, впровадження принципів екологічного дизайну та зеленого будівництва GBD (Green Building Design) є каталізатором для заощадження ресурсів та створення здоровіших житлових просторів. Наприклад, у Китаї цей імпульс отримав розвиток саме завдяки впровадженню міжнародних стандартів, таких як LEED [3]. З іншого боку, зелене будівництво безпосередньо впливає на соціальну тканину громади. Дослідження, проведені у Чикаго, засвідчили, що мешканці будинків, розташованих поблизу зелених насаджень, мають вищий рівень соціальної довіри, почуваються ближчими до сусідів та частіше виявляють готовність до взаємодопомоги [4]. Люди, які живуть у «здорових» екологічних умовах, демонструють менший рівень ментального стресу, тривожності та депресії [5]. Громадський простір, наповнений зеленню, стимулює розвиток соціальних мереж у бібліотеках, парках та центрах, гарантуючи справедливий доступ до ресурсів та усуваючи перешкоди для активного способу життя [4].

Практична реалізація принципів інклюзивного зеленого будівництва у світі здійснюється через систему міжнародних стандартів сертифікації, які поєднують екологічні, соціальні та безпекові критерії оцінювання будівель. Системне вирішення питань забезпечення комфортного та безпечного життєвого простору для осіб з обмеженими можливостями в умовах наявних викликів в Україні може бути забезпечене через інтеграцію провідних міжнародних стандартів, зокрема LEED та WELL:

1. Стандарт LEED (Leadership in Energy and Environmental Design). Сертифікація LEED базується на кількох ключових принципах, що оцінюють сталий розвиток будівель. Критерії включають вибір екологічно чистих матеріалів, ефективне управління водними ресурсами та енергоспоживанням, а також якість внутрішнього середовища. Пріоритет надається зменшенню вуглецевого сліду та підвищенню енергоефективності. Для України важливо, щоб на рівні LEED будівля проектувалася як максимально енергонезалежна. В умовах частих блекаутів це гарантує безперебійну роботу ліфтів, систем підйому та примусової

вентиляції, що є критично важливим для забезпечення безпеки та безперервної життєдіяльності маломобільних груп населення.

2. Стандарт WELL Building Standard ґрунтується на науково обґрунтованих дослідженнях, які демонструють значний вплив будівель на здоров'я, рівень задоволення та продуктивність їхніх мешканців. Він встановлює стандарти для факторів, які впливають на здоров'я та безпеку людей: від якості повітря та чистоти води до освітлення, акустики та матеріалів, що не виділяють шкідливих хімічних речовин. Стандарт також враховує такі аспекти, як психічне здоров'я, здоровий спосіб життя та баланс між роботою та особистим життям. Для України на рівні WELL, наприклад, перспективним напрямом є наповнення внутрішнього середовища елементами вертикального озеленення.

Інтеграція міжнародних стандартів LEED та WELL у практику повоєнного відновлення України має розглядатися як один із ключових напрямів формування сучасної моделі сталого та інклюзивного міського розвитку. У сучасних умовах концепція зеленого будівництва повинна виходити за межі виключно екологічних та енергоефективних характеристик будівель і передбачати комплексне врахування потреб людини, зокрема осіб з інвалідністю, людей похилого віку та інших маломобільних груп населення. У цьому контексті архітектурне середовище необхідно розглядати не лише як елемент фізичної інфраструктури, а як важливий чинник підтримання здоров'я, психологічного благополуччя, соціальної інтеграції та безпеки населення.

Подальший розвиток зеленого будівництва в Україні потребує адаптації міжнародних підходів до національних умов та викликів повоєнного періоду. Насамперед йдеться про необхідність розроблення національних критеріїв інклюзивності та безпечності будівельного середовища, які мають базуватися на принципах універсального дизайну, біофільного проєктування та людиноцентричного підходу. Енергоефективність, автономність функціонування інженерних систем, безпечна евакуація та підтримання належних параметрів мікроклімату повинні стати обов'язковими складовими проєктування об'єктів соціального призначення.

Реалізація комплексного підходу до відбудови, заснованого на поєднанні принципів сталого розвитку, інклюзивності та безпеки, створить передумови для формування в Україні сучасного життєвого середовища, орієнтованого на забезпечення високої якості життя, соціальної рівності та довгострокової стійкості громад.

ЛІТЕРАТУРА

1. Selanon, P., & Chuangchai, W. (2023). The Importance of Urban Green Spaces in Enhancing Holistic Health and Sustainable Well-Being for People with Disabilities: A Narrative Review. *Buildings*, 13(8), 2100.
2. Flemmer, C.L., & McIntosh, A. (2025). Equitable Access to the Built

Environment for People with Disability. *Athens Journal of Technology & Engineering*.

3. Mei Dong, Agyemang Kwasi Sampene, Cai Li, Francis Kyere, Innovative pathways to green building development: Integrating technology, policy, and industry collaboration, *Cleaner and Responsible Consumption*, Volume 19, 2025, 100329.

4. Harris, E., Franz, A., & O'Hara, S. (2023). Promoting Social Equity and Building Resilience through Value-Inclusive Design. *Buildings*, 13(8), 2081.

5. Ekhaese EN and Ndimako OO (2023) Eco-friendly construction materials and health benefits in the design of an all-inclusive health resorts, Nigeria. *Front. Built Environ.* 9:1011759.

ЗЕЛЕНІ ПІДХОДИ В ТЕПЛИЧНОМУ ГОСПОДАРСТВІ ЯК СКЛАДОВА СТАЛОГО АГРОВИРОБНИЦТВА

Анастасія Ковальова¹, Вячеслав Вісяний¹

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури
Kovalova.an@knuba.edu.ua, v.vivsyanyi@knuba.edu.ua*

Сучасні зелені підходи, що впроваджуються в тепличному господарстві мають на меті підвищення ресурсоефективності та зменшення екологічного навантаження. Проаналізовано основні напрями екологізації тепличного виробництва, зокрема енергоефективні технології, системи точного контролю мікроклімату, інтегрований захист рослин та раціональне використання водних ресурсів. Показано, що комплексне застосування зазначених підходів формує основу сталого розвитку сучасного аграрного сектору.

Тепличне господарство є однією з найбільш інтенсивних форм сільськогосподарського виробництва, що характеризується високим рівнем споживання енергії, води та засобів захисту рослин. У зв'язку зі зростанням екологічних викликів та необхідністю переходу до сталих моделей розвитку актуалізується впровадження зелених технологій, які дозволяють мінімізувати негативний вплив на довкілля без втрати продуктивності.

Сучасний розвиток тепличного господарства характеризується активним переходом від традиційних способів ведення агровиробництва до інтегрованих технологічних систем, у яких поєднуються принципи енергоефективності, автоматизації та екологічної безпеки. Така трансформація зумовлена не лише необхідністю підвищення врожайності, а й посиленням вимог до раціонального використання природних ресурсів та зменшення техногенного навантаження на навколишнє середовище. У сучасних умовах тепличні комплекси розглядаються як складні інженерно-біологічні системи, функціонування яких потребує постійного контролю енергетичних, кліматичних і технологічних процесів [1].

Одним із найбільш актуальних напрямів модернізації тепличного виробництва є енергетична оптимізація. Відомо, що підтримання необхідного температурного режиму у холодний період року супроводжується значними витратами енергії, тому впровадження альтернативних джерел теплопостачання стає важливим елементом сталого розвитку галузі. У сучасних тепличних господарствах дедалі частіше застосовуються сонячні колектори, геотермальні установки, біоенергетичні комплекси та теплові насоси, які забезпечують часткове або повне покриття енергетичних потреб підприємства [2]. Використання таких технологій дозволяє не лише скоротити споживання викопного палива, але й зменшити викиди парникових газів, що особливо важливо в контексті міжнародних екологічних вимог та концепції декарбонізації аграрного сектору.

Поряд із використанням відновлюваних джерел енергії важливу роль відіграють системи рекуперації тепла. Їх застосування базується на повторному використанні теплової енергії, яка утворюється в процесі функціонування вентиляційних або технологічних систем. У результаті суттєво зменшуються тепловтрати, підвищується коефіцієнт енергоефективності споруди та стабілізується мікроклімат усередині теплиці [3]. Досвід сучасних європейських тепличних комплексів демонструє, що поєднання рекупераційних технологій із автоматизованими системами управління забезпечує значне скорочення експлуатаційних витрат.

Не менш вагомим складником зеленої складової тепличного господарства є цифровізація виробничих процесів. Використання інтелектуальних систем моніторингу дозволяє здійснювати безперервний контроль параметрів мікроклімату та оперативно реагувати на будь-які зміни середовища. Сучасні сенсорні технології забезпечують вимірювання температури повітря, вологості, освітленості, концентрації вуглекислого газу та рівня вологості субстрату в режимі реального часу [4]. Отримані дані аналізуються автоматизованими програмними комплексами, які регулюють роботу вентиляції, систем поливу, обігріву та штучного освітлення.

Впровадження автоматизованого керування мікрокліматом сприяє створенню оптимальних умов для росту й розвитку рослин. Завдяки точному підтриманню параметрів середовища підвищується інтенсивність фотосинтезу, покращується засвоєння поживних речовин і зменшується ризик розвитку грибкових захворювань. Крім того, автоматизація дозволяє суттєво скоротити нераціональне використання води та електроенергії, що позитивно впливає як на економічні показники виробництва, так і на його екологічну складову [5].

Особливої актуальності набуває інтеграція технологій штучного інтелекту та елементів точного землеробства в управління тепличними комплексами. Сучасні програмні системи здатні прогнозувати зміни мікроклімату, аналізувати фізіологічний стан рослин та автоматично

адаптувати режими вирощування залежно від потреб конкретної культури. Це забезпечує підвищення врожайності при одночасному зменшенні витрат ресурсів, що відповідає сучасним принципам сталого агровиробництва [6].

Не менш важливим є впровадження цифрових технологій керування мікрокліматом. Використання сенсорних систем та автоматизованих алгоритмів регулювання параметрів середовища забезпечує точний контроль температури, вологості та рівня вуглекислого газу. Це сприяє підвищенню ефективності фотосинтетичних процесів і, відповідно, продуктивності рослин.

Особливу увагу в межах зелених підходів приділено інтегрованому захисту рослин. Його суть полягає у зменшенні застосування хімічних засобів та переході до біологічних методів регулювання чисельності шкідників. Використання ентомофагів, феромонних пасток і агротехнічних прийомів дозволяє підтримувати екологічну рівновагу в тепличних агроценозах.

Рациональне використання водних ресурсів є ще одним ключовим елементом сталого тепличного виробництва. Системи крапельного зрошення та повторного використання води забезпечують значне скорочення її споживання. Це особливо важливо в умовах зростаючого дефіциту прісної води в аграрному секторі.

Отже, впровадження зелених підходів у тепличному господарстві є важливим напрямом модернізації сучасного аграрного виробництва та необхідною умовою забезпечення його екологічної безпеки. Використання енергоефективних технологій, автоматизованих систем контролю мікроклімату, ресурсозберігаючих методів поливу та біологічного захисту рослин сприяє підвищенню продуктивності тепличних комплексів при одночасному зменшенні негативного впливу на навколишнє середовище. Комплексне поєднання технологічних та екологічних рішень дозволяє оптимізувати використання водних, енергетичних і матеріальних ресурсів, а також знизити рівень техногенного навантаження на агроєкосистеми.

Проведений аналіз свідчить, що сучасне тепличне господарство поступово трансформується у високотехнологічну систему сталого типу, у межах якої пріоритетного значення набувають принципи раціонального природокористування, енергоощадності та екологічної відповідальності. Подальший розвиток галузі пов'язаний із розширенням практики впровадження інноваційних технологій, цифрових систем управління виробничими процесами та інтегрованих екологічних рішень, здатних забезпечити стабільне функціонування тепличного виробництва в умовах сучасних економічних і кліматичних викликів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hassanien R. H. E., Li M., Yin F. Advanced renewable-energy applications in agricultural greenhouses // *Renewable and Sustainable Energy*

Reviews. 2021. Vol. 54. P. 989–1001. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.3233/JIFS-200618> (дата звернення: 10.05.2026).

2. Li H., Guo Y., Zhao H., Wang Y., Chow D. H. Towards automated greenhouse: a state of the art review on greenhouse monitoring methods and technologies based on internet of things // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 191. Article 106558. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106558.

3. Maraveas C., Bartzanas T. Application of Internet of Things (IoT) for optimized greenhouse environments // *AgriEngineering*. 2021. Vol. 3, № 4. P. 954–970. DOI: 10.3390/agriengineering3040060.

4. Maraveas C., Bartzanas T. Application of Internet of Things (IoT) for optimized greenhouse environments // *AgriEngineering*. 2021. Vol. 3, № 4. P. 954–970. DOI: 10.3390/agriengineering3040060.

5. Mellit A., Benghane M., Herrak O., Messalaoui A. Design of a novel remote monitoring system for smart greenhouses using the Internet of Things and deep convolutional neural networks // *Energies*. 2021. Vol. 14, № 16. Article 5045. DOI: 10.3390/en14165045.

6. Karanisa T., Achour Y., Ouammi A., Sayadi S. Smart greenhouses as the path towards precision agriculture in the food-energy and water nexus: case study of Qatar // *Environment Systems and Decisions*. 2022. Vol. 42. P. 521–546. DOI: 10.1007/s10669-022-09862-2.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ДЖЕРЕЛ ВИКИДІВ ЦЕМЕНТНОГО ВИРОБНИЦТВА НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

Юлія Лапшина¹, Ірина Клімова¹, Олена Мірошниченко¹

¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
lapshyna_ys@knuba.edu.ua, klimova.iv@knuba.edu.ua, elenamiroshka@ukr.net

На сьогодні цементна промисловість є однією з ключових галузей, що відіграє важливу роль у багатьох сферах будівництва. Цемент широко застосовується для виготовлення бетонних та залізобетонних виробів і конструкцій, будівельних розчинів, зведення надводних і підводних об'єктів, а також при будівництві доріг, гідротехнічних споруд та інших інфраструктурних об'єктів.

Цементна промисловість має суттєвий вплив на навколишнє середовище та здоров'я людей. Робота підприємств супроводжується викидами значної кількості забруднювальних речовин, таких як оксиди азоту, вуглецю й сірки, діоксид вуглецю, парникові гази (метан та оксид діазоту), а також твердих частинок у вигляді суспендованих речовин. Це проблематично навіть за умови встановлення сучасного очисного обладнання.

Наразі особливо актуальним є питання мінімізації шкідливого впливу цементного виробництва на довкілля. Вирішення цієї проблеми передбачає активне впровадження новітніх технологій для очищення димових газів, які утворюються під час виробництва цементу із застосуванням вугілля.

Метою є проведення комплексного аналізу впливу виробничої діяльності ПАТ «ЮГцемент» на якість атмосферного повітря в межах Миколаївської області.

У цементній промисловості застосовуються три способи виробництва, що розрізняються технологією підготовки сировинних сумішей: мокрий, сухий та комбінований.

Вибір технологічного процесу залежить від характеристик сировини, таких як її вологість, твердість, однорідність тощо.

Філія «ЮГцемент» працює за технологією мокрого способу виробництва клінкеру. Основний напрямок діяльності підприємства – виробництво цементу. Виробничий процес включає декілька етапів: гірничо-дробильний цех, цех випалу клінкеру та цех помолу цементу. При цьому клінкер є ключовою сировиною для виготовлення цементу.

Для виробництва клінкеру використовують такі основні сировинні матеріали, як вапняк, глина та суглинок, які видобуваються в кар'єрі. Для покращення складу додаються огарки та каолін як допоміжні компоненти.

Основними сировинними компонентами є вапняк-ракушняк, червонобура глина, суглинки і добавка, що містить залізо. Як мінеральна добавка при помелі цементу застосовується доменний гранульований шлак і гіпсовий камінь.

Процес виробництва цементу на філії "ЮГцемент" включає наступні стадії:

1. Проведення розкривних робіт. Цей етап розпочинається з виконання геологічної розвідки за допомогою бурових машин для виявлення корисних копалин, що необхідні для виготовлення цементу.

2. Видобування сировини. У вапнякових, глиняних і суглинкових кар'єрах видобуті ресурси завантажуються екскаваторами у вантажівки вантажопідйомністю до 27 тонн. Потім сировину транспортують на виробничий майданчик для розвантаження та складування.

3. Приготування сировинного шламу. На цьому етапі усереднені матеріали, такі як вапняк, глина, каолін, глиноземний кек та волога золавинос, спрямовуються до приймального бункера шокової дробарки.

Матеріали, такі як клінкер, гіпс та шлак, через дозатори потрапляють до ковшового транспортера довжиною 55 м (один на кожний млин) і далі надходять безпосередньо до цементних млинів. У цьому цеху встановлено п'ять цементних млинів діаметром 3,2 м і довжиною 15 м з продуктивністю по 45 т/год. [1]

Для підвищення продуктивності та покращення текучості цементу використовується інтенсифікатор помелу пропіленгліколь, який додається

через дозуючі насоси з ємності на 16 м³. Щоб забезпечити охолодження цементу, особливо у літню пору, в млинах введено систему впрыскування води у другу камеру від компанії Естанда.

Готовий цемент транспортується до силосів для зберігання пневмогвинтовими насосами (п'ять одиниць) через мережу цементопроводів діаметром 250 мм.

Зберігання портландцементу організовується на силосному складі.

Відвантаження цементу насипом відбувається із використанням залізничного транспорту (вагонів-цементовозів) вантажністю 69-75 тонн. Зважування таких вагонів проводять на залізничних вагах.

Мішки з цементом, розміщені на палетах, переміщують стрічковими конвеєрами та рольгангами до навантажувачів. Палети з готовою продукцією одразу після палетування надходять на буферний склад для тимчасового зберігання. Подальше відвантаження готових палетів здійснюється як у автотранспорт, так і в залізничні криті вагони за допомогою навантажувачів із вантажністю 2,5 тонни. [2]

Цементний завод створює значний негативний вплив на всі компоненти навколишнього середовища. Для комплексної оцінки цього впливу пропонується поетапний аналіз ряду ключових факторів:

- Перший етап передбачає визначення основних джерел небезпечних речовин, які утворюються під час виробництва цементу, та ідентифікацію найактивніших джерел викидів.

- На другому етапі здійснюється аналіз потенційно забруднюючих речовин, акцентуючи увагу на наймасштабніших з них, що базується на розрахунках загальних обсягів викидів із найбільш інтенсивних джерел.

- Третій етап спрямований на оцінку фінансових витрат підприємства, спрямованих на покращення стану екології та мінімізацію наслідків найбільш небезпечних забруднень.

- На четвертому етапі здійснюється оцінка впливу окремих забруднюючих речовин на навколишнє середовище.

- П'ятий етап включає визначення зон найбільшого впливу забруднювальних речовин та аналіз ризиків, пов'язаних із загрозами для довкілля.

- Завершальний шостий етап обґрунтовує зв'язок між забрудненням навколишнього середовища та діяльністю конкретного цементного підприємства. [3]

Детально розглянемо джерела викидів в межах структурних елементів підприємства.

Виробничий цех:

Першим джерелом викидів тут виступає випалювальна обертова піч, зокрема її холодна частина. Забруднюючі речовини утворюються під час транспортування та перемелювання сировини. У період розпалювання додається ще й процес обпалювання клінкеру, що також сприяє появі

викидів.

Другим джерелом є холодильник клінкеру. У цьому випадку пил, який утворюється під час виробництва цементу, вивільняється і відводиться в процесі охолодження гарячого клінкеру на решітці. При цьому використовується атмосферне повітря, яке нагрівається вентиляторами.

Джерела викидів №3, №4, №5 — це силоси сировинної суміші №1-3. На даному етапі відбувається забруднення довкілля.

Наступні джерела викидів пов'язані з роботою технологічного обладнання дозувального блоку (№10, №12, №13). Сюди входять: конвеєри, силоси, живильники силосів та їх дозатори. Забруднення формується під час транспортування, перевантаження матеріалів, а також їхнього змішування на конвеєрі.

Якщо мова йде про систему, яка обслуговує обладнання для обробки глини, то в атмосферне повітря можуть потрапляти вугільна зола та неорганічний пил, що містить двоокис кремнію у межах 20-70%. Розглядаючи джерело викидів №16, тобто елеватор сировинного борошна, слід зазначити, що він виділяє неорганічний пил із вмістом двоокису кремнію нижче 20%, який утворюється та виводиться під час транспортування сировинного борошна. [4,5]

Іншим джерелом викидів є об'єднаний склад, на якому у повітря надходить неорганічний пил із вмістом двоокису кремнію у межах 20-70%. Щодо джерела викидів №75, а саме складу клінкеру №1, до повітря потрапляє пил, утворений у процесі цементного виробництва. Аналогічно, джерело №13, представлене складом клінкеру №2, також виділяє пил цементного виробництва.

Джерело викидів №6 — це силос меленого вугілля, який забезпечує відведення пилогазоповітряної суміші. Якщо мова йде про систему, яка обслуговує обладнання для обробки глини, то в атмосферне повітря можуть потрапляти вугільна зола та неорганічний пил, що містить двоокис кремнію у межах 20-70%. Розглядаючи джерело викидів №16, тобто елеватор сировинного борошна, слід зазначити, що він виділяє неорганічний пил із вмістом двоокису кремнію нижче 20%, який утворюється та виводиться під час транспортування сировинної муки. [6]

Проаналізувавши джерела викидів, спираючись на показники валового викиду підприємств цементної промисловості, було чітко визначено, що найбільш забруднюючою речовиною є неорганічний пил, а також значні обсяги парникових газів, зокрема діоксиду вуглецю. Такий характер впливу зумовлює необхідність переходу від традиційних підходів виробництва цементу до більш екологічно орієнтованих рішень.

У цьому напрямку особливого значення набуває концепція зеленого будівництва, яка передбачає мінімізацію негативного впливу на довкілля протягом усього життєвого циклу будівельних матеріалів і об'єктів. Цементна промисловість як базова складова будівельного сектору, відіграє

ключову роль у реалізації цих принципів.

Запобіжні заходи в межах зеленого будівництва, спрямовані на зниження екологічного навантаження цементного виробництва, доцільно визначити за такими напрямками:

- технологічна модернізація виробництва, яка передбачає поступовий перехід від мокрого способу виробництва клінкеру до більш енергоефективного сухого способу, що дозволяє суттєво зменшити викиди CO₂ та споживання палива; додатково впроваджуються сучасні системи газоочищення (електрофільтри, рукавні фільтри), які забезпечують ефективне уловлювання пилу;

- зниження клінкерного фактора цементу: одним із ключових принципів зеленого будівництва є використання альтернативних матеріалів, таких як доменний гранульований шлак, зола-винос, пуцоланові добавки; це дозволяє зменшити частку клінкеру в цементі, що прямо впливає на скорочення викидів парникових газів;

- впровадження ресурсоефективних та замкнених циклів виробництва: використання відходів інших галузей як вторинної сировини (наприклад, промислових шлаків) відповідає принципам циркулярної економіки та зменшує навантаження на природні ресурси.

- оптимізація енергоспоживання та використання альтернативних видів палива: застосування біопалива, відходів як енергетичного ресурсу та впровадження енергоощадних технологій сприяє зменшенню залежності від викопного палива та скороченню викидів.

Таким чином, інтеграція принципів зеленого будівництва у діяльність цементних підприємств, зокрема ПАТ «ЮГцемент», є необхідною умовою зменшення негативного впливу на атмосферне повітря та забезпечення сталого розвитку будівельної галузі. Реалізація зазначених заходів дозволить не лише підвищити екологічну безпеку виробництва, але й сприятиме адаптації підприємств до сучасних екологічних стандартів і вимог.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бабіч М., Європейські стандарти на цемент: практика впровадження / АВЦУ "Укрцемент". Х.: ПП "Юнісофт", 2016. 72 с.
2. ДСТУ Б EN 197-1:2015 (EN 197-1:2011, IDT). Цемент. Частина 1. Склад, технічні умови та критерії відповідності для звичайних цементів. К.: Мінрегіон України, 2016. 53 с.
3. Ковалів Л.М. Екологічні ризики у цементному виробництві - Науковий вісник НЛТУ України.- Вип. 24.1, 2014. - ст 114-117.
4. Оплачко І. О. Проблеми та перспективи управління діяльністю підприємств цементної промисловості в сучасних умовах / Серія «Економічні науки», Випуск 4(84). - 2018 р.
5. Романець О. М. Екологія цементного виробництва.

URL:<https://www.heidelbergcement.ua/uk/hcu>

6. Узунова Г. Д., Приходько В. Ю., Удосконалення методики комплексної оцінки впливу підприємств на навколишнє середовище. Ефективне функціонування екологічно стабільних територій у контексті стратегії стійкого розвитку: агроекологічний, соціальний і економічний аспекти. – Полтава. 2018. – 37 с.

АНАЛІЗ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШУМУ НА ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Артем Максименко¹, Ірина Клімова¹

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
mksmnkart@gmail.com, iklimova@i.ua*

Різні типи машин і механізмів генерують шум з характерними частотними особливостями, що визначають специфіку його розповсюдження та впливу на працівників. Спектральний склад шуму залежить від конструкції обладнання, режиму роботи, швидкості обертання механізмів і особливостей технологічного процесу. Дослідження частотних характеристик виробничого шуму є важливим для оцінки акустичних умов праці, визначення основних джерел шумового забруднення та вибору ефективних методів шумозахисту.

Вентиляційне та компресорне обладнання є одним із основних джерел постійного виробничого шуму. Для осьових і радіальних вентиляторів характерна генерація низькочастотного шуму у смугах 63, 125, 250 Гц, що пов'язане з частотою обертання робочого колеса та аеродинамічними процесами руху повітря. У спектрі також можуть спостерігатись виражені тональні компоненти, через оберти лопатей вентилятора. Для компресорних установок характерна наявність широкосмугового шуму в діапазоні частот 125-1000 Гц, який виникає внаслідок роботи поршневих або гвинтових механізмів та вібрації інженерних комунікацій. Під час роботи великих компресорів максимальні рівні шуму фіксуються в діапазоні 250-500 Гц. Низькочастотний шум від такого обладнання може поширюватись через огорожувальні конструкції та може створювати акустичне забруднення навіть у суміжних приміщеннях.

Одним із найбільш поширених методів зниження шуму вентиляційного обладнання є застосування шумоглушників у повітроводах. Пластинчасті, трубчасті та камерні шумоглушники дозволяють ефективно зменшувати рівні шуму у високочастотному та середньочастотному діапазонах. Їх дія базується на використанні звукопоглинаючих матеріалів, які перетворюють акустичну енергію на теплову. Найбільш ефективними вважаються мінераловатні та скловолоконні матеріали з пористою структурою. Важливим напрямом зниження шуму від вентиляційного обладнання є

оптимізація аеродинамічних характеристик вентиляційних систем. Зменшення швидкості руху повітря у повітроводах, плавні переходи перерізів, мінімізація кількості різких поворотів та усунення місцевих опорів дозволяють знизити рівень турбулентності потоку і, відповідно, аеродинамічного шуму. Дослідження показують, що найбільш інтенсивний рівень шуму виникає саме в місцях звуження каналів та зміни напрямку руху повітря.

Для боротьби з низькочастотним шумом від вентиляційного обладнання широко використовується віброізоляція. Віброізоляція виконується шляхом встановлення обладнання на спеціальні віброізоляційні фундаменти чи окремі віброопори або (у випадку підвісного обладнання) підвішування устаткування до стелі за допомогою віброізоляційних підвісів.

Одним із сучасних напрямів акустичного захисту є використання акустичних метаматеріалів та спеціальних фільтрів для вентиляційних систем. У наукових дослідженнях описано застосування тривимірних структур із періодичних елементів, які забезпечують зниження шуму в окремих октавних смугах, особливо у високочастотному діапазоні 4000-8000 Гц. Такі конструкції дозволяють зменшити тональні складові шуму вентиляторів без суттєвого зростання аеродинамічного опору системи [1].

Металообробні верстати генерують середньочастотний та високочастотний тип шуму. Для токарних верстатів характерним є шум в діапазоні частот 250-1000 Гц, що генерується внаслідок обертання шпинделя, взаємодії різального інструменту з металом та коливань станини. Фрезерні верстати генерують шум із вираженими максимумами у смугах 500-2000 Гц через переривчастий процес різання та високі швидкості обертання фрез. Свердлильні машини створюють шум у діапазоні 500-4000 Гц, де домінують високочастотні складові, пов'язані з тертям свердла об металеву поверхню. Найбільш несприятливими за спектральними характеристиками є шліфувальні верстати, шум яких концентрується у високочастотній області 2000–8000 Гц. Такі частоти виникають через високу швидкість обертання абразивного круга та значну інтенсивність контактних процесів між абразивом і поверхнею деталі. Високочастотний шум є особливо небезпечним, оскільки саме цей діапазон найчастіше спричиняє втрату слуху у працівників.

Зменшення акустичного забруднення від роботи металообробних верстатів досягається шляхом підвищення жорсткості конструкції верстатів, оптимізацію режимів різання та використання демпфувальних систем. Дослідження показують, що правильний вибір швидкості обертання шпинделя та подачі дозволяє суттєво знизити рівень шуму й уникнути резонансних коливань.

Ефективним методом зниження шуму є оптимізація параметрів різання. Зменшення глибини різання, оптимізація подачі та швидкості обертання інструмента дозволяють мінімізувати динамічні навантаження у зоні

контакту інструмента із заготовкою. Особливо це актуально для процесів фрезерування, де переривчастий характер різання створює інтенсивні імпульсні коливання. Наукові дослідження свідчать, що правильний підбір режимів різання може суттєво знизити як шум, так і зношення інструмента [2].

Сучасним напрямом є використання систем моніторингу шуму та вібрацій на основі акустичних сенсорів і машинного навчання. Акустичні датчики дозволяють виявляти появу дефектів інструмента, підвищене зношення або нестабільність процесу різання ще до виникнення критичних вібрацій.

Важливу роль відіграє технічне обслуговування верстатів. Зношення підшипників, люфти направляючих, недостатнє змащення та пошкодження різального інструмента суттєво підвищують рівень шуму. Регулярна діагностика обладнання, контроль стану шпинделя та своєчасна заміна інструмента дозволяють підтримувати стабільні акустичні характеристики верстатів [3].

Пресове обладнання характеризується широкосмуговим шумом із короткочасними піковими значеннями звукового тиску. Під час роботи механічних пресів максимальна енергія шуму концентрується у смугах 500-4000 Гц. Удар молота по металевій заготовці супроводжується виникненням високочастотних компонентів до 8000 Гц, а також низькочастотних коливань конструкцій будівлі. Для штампувального обладнання характерна наявність повторюваних імпульсів, частота яких залежить від продуктивності преса. Імпульсний шум має значно більший шкідливий вплив порівняно з постійним шумом аналогічного рівня, оскільки супроводжується різкими змінами звукового тиску.

Найбільш ефективним методом боротьби з шумом є його зниження безпосередньо у джерелі виникнення. Для пресового обладнання це досягається шляхом заміни ударних технологічних процесів менш шумними, оптимізації конструкції пресів та зменшення динамічних навантажень. У наукових дослідженнях зазначається, що перехід від механічних ударних процесів до гідравлічних систем дозволяє суттєво знизити рівень імпульсного шуму та вібрації.

Ефективним методом є акустичне оздоблення огорожуючих конструкцій у виробничих приміщеннях. У цехах із пресовим обладнанням значну роль відіграє реверберація звуку, яка збільшує загальний рівень шуму. Для її зменшення використовують звукопоглинаючі облицювання стін і стель. Найкращі результати забезпечують пористі матеріали з високим коефіцієнтом звукопоглинання у середньочастотному та високочастотному діапазонах. Перфоровані панелі з мінераловатним заповненням дозволяють суттєво знизити рівень відбитого шуму.

Шум, який створюється при роботі насосних станцій, холодильних установок та систем кондиціонування, переважно має постійний характер.

Для насосного обладнання типовими є низькочастотні смуги 63-250 Гц, що пов'язано з роботою електродвигунів та пульсацією рідини у трубопроводах. Холодильні установки генерують шум у межах 125-1000 Гц, а також можуть створювати тональні складові через вібрацію компресорів. Для систем кондиціонування характерне поєднання аеродинамічного та механічного шуму, у спектрі якого спостерігаються максимуми у смугах 250-2000 Гц.

Для насосного обладнання зниження рівня шуму досягається шляхом оптимізації конструкції робочих коліс, зменшення турбулентності потоку та балансування обертових елементів. Дослідження показують, що правильне центрування валів і балансування насосів дозволяє суттєво знизити вібрацію та рівень шуму, особливо у низькочастотному діапазоні. Для холодильних компресорів ефективним є використання багатокамерних глушників та удосконалених систем випуску холодоагенту, які зменшують пульсацію тиску та тональні компоненти шуму [4].

Також до основних заходів зі зниження рівня шуму від інженерного устаткування є застосування віброізоляції. Насоси, компресори та зовнішні блоки систем кондиціонування встановлюють на пружні амортизатори, віброізоляційні опори або віброізоляційні фундаменти. Це дозволяє знизити передачу структурного шуму на будівельні конструкції. Особливо ефективними є гнучкі вставки між насосами, компресорами та трубопроводами, які запобігають поширенню механічних коливань мережею трубопроводів [5].

Таким чином, різні типи виробничого обладнання характеризуються індивідуальними спектральними особливостями шуму, які визначають специфіку його впливу на працівників та виробниче середовище. Детальний аналіз частотних характеристик дозволяє підвищити ефективність акустичного контролю, оптимізувати системи шумозахисту та забезпечити безпечні умови праці на сучасних виробництвах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Trematerra A., Bevilacqua A., Iannace G. Noise Control in Air Mechanical Ventilation Systems with Three-Dimensional Metamaterials // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, № 3. Article 1650.
2. Lipski J., Litak G., Rusinek R., Szabelski K., Teter A., Warmiński J., Zaleski K. Surface Quality of a Work Material Influence on Vibrations in a Cutting Process // *Journal of Sound and Vibration*. 2002. Vol. 252, № 4. P. 729–737.
3. Józwik J., Wac-Włodarczyk A., Michałowska J., Kłoczko M. Monitoring of the Noise Emitted by Machine Tools in Industrial Conditions // *Journal of Ecological Engineering*. 2018. Vol. 19, № 1. P. 83–93.
4. An L., Shao S. Two-phase flow noise in refrigeration systems: Recent advances and state-of-the-art review // *International Journal of Refrigeration*.

2025. Vol. 178. P. 418–443.

5. Cao H.-F., Yang C.-J., Ma R.-L., Ni S.-W., Song Z.-K., Wang X., Chen Y.-X., Jiang C.-X. An Investigation of the Acoustic Enclosure of an Air Conditioning Compressor Using Response Surface Analysis and Topological Rigidity Optimization // Shock and Vibration. 2024. Vol. 2024. Article ID 1909530. 15 p.

СТАЛІ РОЗУМНІ БУДИНКИ В КОНТЕКСТІ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТА СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Віктор Моздолевський,

*Київський національний університет будівництва і архітектури
mozdolevskyi_vo-2024@knuba.edu.ua*

Сучасні глобальні екологічні виклики, пов'язані зі зміною клімату, виснаженням природних ресурсів, зростанням обсягів відходів та деградацією екосистем, зумовлюють необхідність трансформації підходів до організації життєвого простору людини. Однією з ключових сфер впливу на довкілля є житловий сектор, який споживає значну частку енергетичних і природних ресурсів та формує істотну частину антропогенного навантаження. У цьому контексті особливої актуальності набуває концепція сталих розумних будинків, що поєднує принципи екологічності з можливостями сучасних інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ).

З екологічної точки зору житлові будівлі є складними техногенно-природними системами, які взаємодіють із компонентами довкілля — атмосферою, гідросферою, літосферою та біотою. Традиційні підходи до будівництва та експлуатації житла часто ігнорують ці взаємозв'язки, що призводить до надмірного споживання енергії, забруднення навколишнього середовища та порушення природних циклів. У зв'язку з цим формування екологічно безпечного житлового середовища має базуватися на принципах сталого розвитку, зокрема ресурсозбереженні, мінімізації відходів, використанні відновлюваних джерел енергії та відтворенні природних процесів.

Концепція сталого розумного будинку передбачає інтеграцію двох взаємодоповнюючих підходів: екологізації житла та впровадження інтелектуальних технологій управління. З одного боку, це означає створення будівель із мінімальним впливом на довкілля шляхом використання екологічно чистих матеріалів, оптимізації енергоспоживання та впровадження замкнених ресурсних циклів. З іншого боку, ІКТ забезпечують можливість моніторингу, аналізу та управління екологічними параметрами житлового середовища в реальному часі. Завдяки використанню датчиків, мобільних застосунків і голосових асистентів користувач може дистанційно контролювати власне житло. Такі технології дозволяють не лише підвищити рівень комфорту, а й значно зменшити

споживання енергоресурсів, що особливо актуально в умовах енергетичних викликів в Україні [1].

Технології «розумного будинку» є частиною ширшої концепції «розумного міста». Smart City передбачає впровадження цифрових технологій у транспорт, житлово-комунальне господарство, медицину, освіту, систему управління та громадську безпеку. Основою такої моделі є ефективне використання ресурсів, автоматизація процесів та забезпечення постійної взаємодії між владою і громадянами. Важливу роль відіграє електронне урядування, яке забезпечує доступність адміністративних послуг та прозорість управління містом. Водночас розвиток цих технологій потребує значних інвестицій, удосконалення законодавства та належного рівня захисту персональних даних. Для України впровадження інтелектуальних технологій має стратегічне значення, оскільки сприяє модернізації інфраструктури, розвитку цифрової економіки та підвищенню якості життя населення [2].



Рис. 1. Загальна концепція технології «розумного будинку» в контексті Цілей сталого розвитку

З позицій екології особливе значення має впровадження циклічних моделей використання ресурсів, які протистоять традиційній лінійній моделі «видобуток – споживання – відходи». У сталих розумних будинках це реалізується через системи збору та повторного використання води, компостування органічних відходів, використання сонячної, геотермальної та інших видів відновлюваної енергії. Такий підхід дозволяє зменшити навантаження на природні екосистеми та сприяє формуванню замкнених екологічних циклів [3].

Важливим аспектом є також вибір будівельних матеріалів. Використання відновлюваних, нетоксичних та придатних до переробки матеріалів знижує екологічний слід будівництва та експлуатації житла. Водночас сучасні технології дозволяють створювати матеріали з покращеними теплоізоляційними та енергозберігаючими характеристиками, що сприяє зменшенню споживання енергії та скороченню викидів парникових газів.

Інформаційно-комунікаційні технології відіграють важливу роль у забезпеченні екологічної ефективності житлових систем. Системи моніторингу дозволяють відстежувати показники споживання енергії, води, рівень забруднення повітря, температуру та вологість, що створює передумови для оптимізації ресурсокористування. Використання сенсорних мереж і автоматизованих систем управління забезпечує адаптацію функціонування будинку до зовнішніх умов і потреб користувачів, що дозволяє мінімізувати втрати ресурсів.

Разом із тим, впровадження ІКТ у житлову сферу супроводжується низкою екологічних ризиків. Зокрема, виробництво електронних пристроїв пов'язане з використанням рідкісних і токсичних матеріалів, а також формуванням значних обсягів електронних відходів. Крім того, функціонування розумних систем потребує додаткових енергетичних ресурсів, що може знижувати загальний екологічний ефект від їх використання. За даними досліджень, частка енергоспоживання побутової електроніки постійно зростає, що створює додаткове навантаження на енергетичні системи та довкілля.

У цьому контексті важливим є врахування повного життєвого циклу технологій — від видобутку сировини та виробництва до утилізації або переробки. Перехід до принципів циркулярної економіки, зокрема повторного використання компонентів і матеріалів, дозволяє зменшити екологічні ризики та підвищити ефективність використання ресурсів. Перспективним є також розвиток модульних систем, які дозволяють оновлювати окремі елементи без повної заміни обладнання [4].

З точки зору екології людина є центральним елементом системи «розумний будинок – довкілля». Саме поведінка мешканців визначає рівень споживання ресурсів і ефективність використання технологій. У зв'язку з цим важливим напрямом є формування екологічної свідомості та відповідального ставлення до природних ресурсів. Використання технологій зворотного зв'язку, які надають інформацію про рівень споживання ресурсів, сприяє підвищенню екологічної обізнаності та стимулює зміну поведінки користувачів.

Особливу увагу слід приділити інтеграції житлових систем у ширший екологічний контекст — рівень громади, міста та регіону. Сталі розумні будинки можуть стати елементами більш широких систем — «розумних міст», які забезпечують ефективне управління ресурсами, зменшення

викидів і підвищення якості життя населення. У цьому випадку важливу роль відіграє координація між різними рівнями управління та інтеграція локальних рішень у загальні екологічні стратегії.

У підсумку слід зазначити, що розвиток сталих розумних будинків є важливим напрямом екологізації житлового сектору та переходу до сталого розвитку. Водночас досягнення реального екологічного ефекту можливе лише за умови комплексного підходу, який враховує не лише технологічні можливості, а й екологічні обмеження, економічні чинники та соціальні аспекти. Подальші дослідження у цій сфері мають бути спрямовані на розробку інтегрованих моделей управління житловими системами, оцінку їх екологічної ефективності та впровадження інноваційних рішень, що забезпечують баланс між потребами людини та збереженням природного середовища.

ЛІТЕРАТУРА

1. Riabchun Yu. V., Sereda D. E., Kokhan V. R., Dolya O. V. Можливості та переваги українського ринку технологій «розумний будинок» // Управління розвитком складних систем. 2023. № 56. С. 181–187. DOI: 10.32347/2412-9933.2023.56.181-187.
2. Strzelecki A. Smart Homes as Catalysts for Sustainable Consumption // Sustainability. 2024. Vol. 16, № 11. Art. 4676. DOI: 10.3390/su16114676.
3. Li W. Responsible smart home technology adoption: exploring sustainability, privacy and ethical challenges // Smart Cities. 2025. DOI: 10.1016/j.scs.2025.105692.
4. Komninos N., Kakderi C., Panori A., Tsarchopoulos P. Smart city planning from an evolutionary perspective // Journal of Urban Technology. 2019. Vol. 26, № 2. P. 3–20. DOI: 10.1080/10630732.2018.1485368.

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ПРИМІЩЕНЬ З VAV-СИСТЕМОЮ ВЕНТИЛЯЦІЇ ТА ЗЕЛЕНОЮ СТІНОЮ

Анна Москвітінa

*Київський національний університет будівництва і архітектури,
moskvitina.as@knuba.edu.ua*

Сучасні системи управління мікрокліматом у приміщеннях з динамічною зміною шкідливостей мають враховувати час реакції системи на зміни параметрів.

Зміна рівня CO₂ та вологості повітря у таких закладах є нестаціонарним випадковим процесом, що ускладнює отримання точних статистичних характеристик через імовірнісну природу та похибки вимірювань.

Використання зелених стін для зменшення навантаження на систему

вентиляції впродовж робочого дня вимагає використання систем вентиляції та кондиціонування повітря зі змінною витратою повітря (VAV-системою).

Періоди життєвого циклу рослин «виділення кисню» - «дихання/виділення CO₂» також вимагають використання сучасних систем управління системою вентиляції та кондиціонування повітря, щоб система лишалась енергоефективною і використовувала необхідну кількість повітря в даний момент часу згідно з потребою.

Метою роботи є розробка комплексного методу дослідження динаміки цих змін та впровадження інтелектуальної системи керування на основі нечіткої логіки для забезпечення комфорту та енергоефективності [1].

Для управління охолодженням (обробкою повітря в центральному вентиляційному агрегаті або центральному кондиціонері) повітря перспективним є застосування законів регулювання «нейротехнологія і нечітка логіка» (Neuro & Fuzzy logic).

Критерієм управління виступає сукупність параметрів, що визначають комфорт для трьох компонентів: людей ($m = 2$) — найвищий пріоритет; обладнання ($m = 1$) — надійна безпека обладнання; самого приміщення ($m = 3$) — дотримання норм експлуатації самого приміщення. Оцінка проводиться за величиною індексу дискомфорту D_n , що інтегрує вплив температури, вологості та швидкості повітряних потоків.

Перевагою нечіткого логічного регулятора (НЛР) є відсутність потреби у точній математичній моделі об'єкта та стійкість до змін його параметрів. Для розробки системи пропонується використовувати індекси дискомфорту.

Спільний вплив температури та вологості на людину оцінюється за формулою:

$$D_n^{(1)} = 0,72 t_1 \cdot (t_{\text{сух}} - t_{\text{вол}}) + 40,6, \quad (1)$$

де $t_{\text{сух}}$ - температура «сухого» термометра, ° С; $t_{\text{вл}}$ - температура «зволоженого» термометра, ° С.

Вплив швидкості потоку повітря v_n визначається як:

$$D_n^{(2)} = 37,5 \cdot v_n + 66,25 \quad (2)$$

де v_n - швидкість потоку повітряних мас, м / с.

В таблиці 1 представлені ступеня дискомфорту для людини, визначені за параметрами (1) і (2), які враховують спільний вплив на організм людини трьох провідних факторів, які визначають комфортність перебування в даному приміщенні: температури, вологості та швидкості потоку повітряних мас [2].

Таблиця 1

Ступені дискомфорту для людини

Індекс дискомфорту $D_n^{(1)}, D_n^{(2)}$	Level of discomfort
≤ 70	Comfortable

Індекс дискомфорту $D_n^{(1)}, D_n^{(2)}$	Level of discomfort
70 ... 75	Деякі відвідувачі ПЗСС почуваються некомфортно
75...80	50% людей у ПЗСС почуваються некомфортно
80... 85	Усі люди у ПЗСС почуваються некомфортно
≥ 85	Нетерпимий дискомфорт

Через складність визначення оптимальних параметрів у системі «люди – обладнання – приміщення» в реальному часі, перспективним є застосування апарату нечіткої логіки.

Цей підхід дозволяє оперувати нечіткими поняттями та експертними знаннями для прийняття рішень.

Структура системи нечіткого виведення:

- вхід - аналогові сигнали температури, вологості та швидкості повітря;
- фазифікація - перетворення сигналів у вхідні нечіткі змінні;
- логічне виведення - формування вихідної нечіткої змінної (індексу або ступеня дискомфорту) на основі бази правил;
- дефазифікація - формування аналогового сигналу для виконавчих механізмів системи кондиціонування.

Синтез нечіткого регулятора базується на підтримці індексу дискомфорту в допустимих межах для кожного компонента системи. Використовуються три основні лінгвістичні змінні:

- температура визначається на основі перетину меж «малих», «середніх» та «великих» температур (умовно 16 ° С до 30 ° С);
- швидкість руху повітря для комфорту людей має бути в межах $v_B = 0,1 \dots 0,5$;
- вологість базується на показниках «зволоженого» термометра, через широкий діапазон змін вона має більше лінгвістичних термів: від «дуже низької» до «дуже високої».

Для оцінки узагальненого індексу дискомфорту враховуються вага та пріоритетність локальних критеріїв на основі експертних оцінок системи «люди– обладнання – приміщення».

$$D_{nj}^{(gen)} = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \cdot D_{ni}^{(j)}, i = \overline{(1,3)}, j = (1,2), \quad (3)$$

тут $D_{ni}^{(j)}, i = \overline{(1,3)}$, позначені індекси дискомфорту, відповідно для людей, обладнання, приміщення.

Вихідною величиною нечіткого логічного регулятора є керуюча дія на компресор холодоагенту, який присвоюється наступні терміни: "велика негативна" (NB), "негативна" (N), "нульова" (ZE), "позитивна" (P), "велика позитивна" (PB). Тобто, за комфортних умов керуюча дія відсутня, і

компресор працює із заданою потужністю.

За наявності відхилень від комфортних умов нечіткого логічного регулятора виробляє керуючу дію у бік збільшення або зменшення потужності компресора до тих пір, поки не буде компенсовано негативне обурення мікроклімату приміщення і всієї системи в цілому.

У таблиці 2 наведено базу правил нечіткого логічного регулятора підтримка мікроклімату приміщень.

Таблиця 2

База правил нечіткого логічного регулятора

$\{t_{\text{сух}}, ^\circ\text{C};\}$ $\{v_{\text{п}}, \text{м/с}\}$	Температура «мокрого» термометра, $^\circ\text{C}$					
	Дуже мала (6-11)	Мала (12-14)	Задовільно мала (15-18)	Задовільна (19-21)	Велика (22-25)	Дуже велика (26-29)
Мала $\{16 - 21;\}$ $\{0,1 - 0,2\}$	N	N	ZE	ZE	-	-
Середня $\{22 - 25;\}$ $\{0,21 - 0,4\}$	N	ZE	ZE	P	P	-
Велика $\{26 - 30;\}$ $\{0,41 - 0,5\}$	ZE	ZE	P	P	P	PB

Система з НЛР постійно коригує параметри мікроклімату, забезпечуючи зниження енерговитрат за рахунок усунення зайвих дій при малих відхиленнях. Використання узагальненого індексу дискомфорту дозволяє одночасно задовольнити потреби відвідувачів та вимоги до експлуатації обладнання.

Незважаючи на "грубіше" регулювання порівняно з ПІД-контролерами, система є робастною та ефективною в умовах невизначеності. Запропонований метод дозволяє ідентифікувати процеси зміни CO_2 та вологості з точністю до 10%.

ЛІТЕРАТУРА

1. TRČKA, Marija; HENSEN, Jan LM. Overview of HVAC system simulation. Automation in construction, 2010, 19.2. P.93-99.

2. Бабак В.П., Хандецький В.С., Шрюфер Е. Обробка сигналів [Текст]: підручник. К.: Либідь, 1999. – 496 с.

ПОВОЄННА «ЗЕЛЕНА» ВІДБУДОВА З УРАХУВАННЯМ ВОЄННИХ РИЗИКІВ: ПРИНЦИПИ, ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ДЛЯ УКРАЇНИ

Катерина Мішук¹, Сусанна Пастухова¹, Владислав Кузнєцов¹

¹Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні
Запорізький національний університет,

¹mishukivk@gmail.com, susannapastukhova@gmail.com,
kouznetsov595@gmail.com

Повномасштабна війна стала причиною масштабних руйнувань житлової, енергетичної, транспортної та промислової інфраструктури України. На Рисунку 1 показано тенденцію завданих збитків (кількості зруйнованих/пошкоджених об'єктів), станом на січень 2024 року, та, станом на листопад 2024 року [1, с. 7-10; 2, с. 7-10].

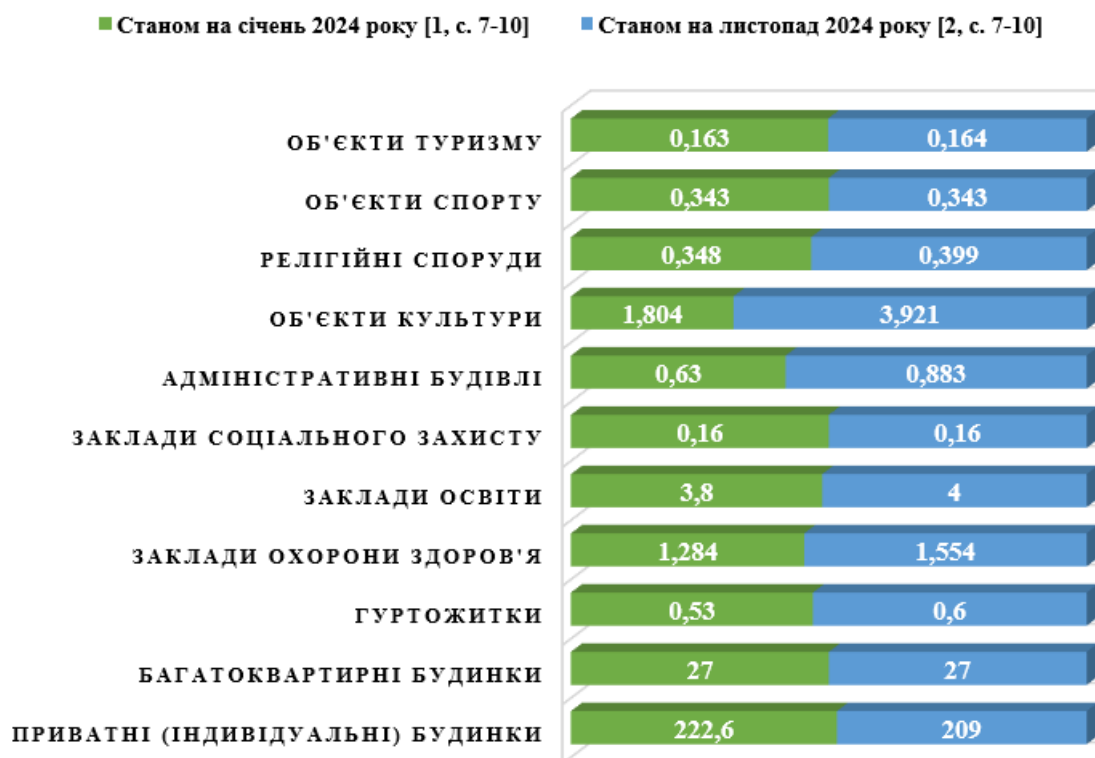


Рис 1. Тенденція завданих збитків, станом на січень 2024 року, та, станом на листопад 2024 року [тис. шт.], [1, с. 7-10; 2, с. 7-10]

Згідно звіту, опублікованому спільно Світовим банком, урядом України, Організацією Об'єднаних Націй (ООН) та Європейською комісією у лютому 2024 року, загальна вартість відбудови становитиме близько 486 млрд дол. США протягом наступних 10 років (рис. 2) [3].

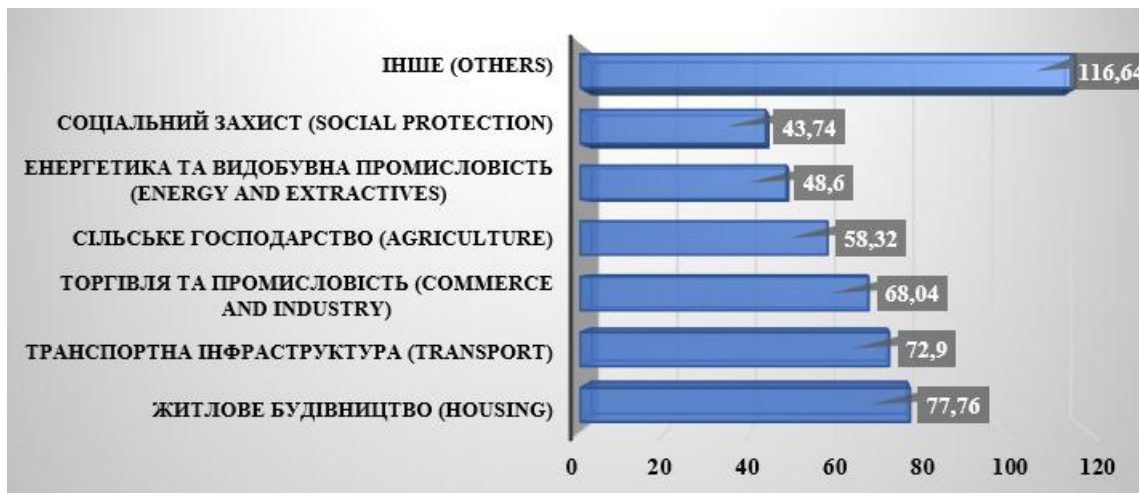


Рис 2. Загальні оціночні потреби у відновленні за секторами протягом наступних 10 років [млрд дол. США], [3]

Водночас, варто зазначити, що ця масштабна криза формує можливість не лише для звичайної відбудови первісного (довоєнного) стану зруйнованої інфраструктури, а й для створення нової моделі розвитку держави – більш енергоефективної, орієнтованої на сталий розвиток і екологічну стабільність та стійкої до зовнішніх ризиків і загроз.

Відповідно до цього, повоєнна відбудова будівельного сектора України постає як синергетична система, що поєднує в собі «зелені» технології та можливості для зведення стійких до зовнішніх впливів (у нашому випадку до воєнних загроз) будівельних об'єктів.

Вивчення та впровадження «зелених» технологій сприяє розвитку, так званого, «зеленого» будівництва, що передбачає формування нових підходів щодо планування, проектування, будівництва (зведення) та експлуатації будівельних об'єктів з метою раціонального використання природних (невідновлюваних) ресурсів, покращення екологічного стану навколишнього середовища, забезпечення оптимального мікроклімату приміщень, мінімізування шкідливого впливу на здоров'я людини тощо. З огляду багатовекторності «зеленого» будівництва, варто зазначити, що воно поєднує в собі аспекти таких наук, як: екологічна надійність та безпека, урбоекологія, біопозитивне будівництво, енергоактивні та енергозберігаючі будівлі, безвідходність виробництва, утилізація відходів, екомоніторинг тощо. З огляду цього, можна виділити ряд особливостей, завдяки яким будівельний об'єкт можна вважати «зеленим»: ефективне та раціональне використання енергетичних, водних й інших ресурсів; використання джерел відновлюваної енергії; проведення заходів щодо скорочення кількості утворених відходів будівництва та знесення, їх повторного використання та/або переробки (так званий, принцип «3R»); підтримка нормованої якості повітря та формування відповідного мікроклімату в приміщенні; застосування інженерно-конструктивних інженерних рішень під час проведення заходів з термомодернізації будівельних об'єктів; використання

екологічно чистих будівельних матеріалів (з низьким вуглецевим слідом); врахування впливу на довкілля (складання, так званої, оцінки впливу на довкілля (ОВД)) при проєктуванні, будівництві та експлуатації; врахування впливу на якість життя мешканців при проєктуванні, будівництві та експлуатації; застосування конструкцій, які дозволяють адаптуватися до мінливості навколишнього середовища [4, с. 64]. На Рисунку 3 представлено приклад «зеленої» будівлі, так званої, будівлі з майже нульовим споживанням енергії (Nearly Zero-Energy Buildings) (nZEB-будівлі) [5].



Рис 3. Модель будівлі з майже нульовим споживанням енергії (Nearly Zero-Energy Buildings) (nZEB-будівлі), [5]

Щодо формування стійкості до ризиків та загроз, особливо пов'язаних з військовими діями, досить перспективним напрямком є розвиток та використання концепції «Build Back Better» (BBB) («Відбудувати краще, ніж було»), що була запропонована Управлінням ООН зі зменшення ризику лих (UNDRR), яка передбачає не лише звичайну відбудову зруйнованих об'єктів, а й їх трансформацію, що, на загальному плані, зменшує вразливість зведених та/або відновлених будівельних об'єктів до майбутніх загроз, криз, ризиків та підвищує рівень стійкості суспільства [6, с. 11]. Відповідно до цього, особливістю цієї концепції є те, що вона не розглядає відбудову пошкодженої/зруйнованої інфраструктури як повернення до «нормального» або «первісного» стану, який, з огляду реалій, є досить вразливим, а як можливість створити з неї більш безпечну, ефективну та стійку до відповідних впливів систему [6, с. 12]. Концепція «Build Back Better» (BBB) базується на 4-ох ключових принципах, зокрема [6, с. 11-12]:

- підвищення рівня резильєнтності, тобто відновлення будівельних об'єктів, покращивши їх стійкість до зовнішнього впливу (активних бойових дій, техногенних аварій, природних явищ тощо);
- послаблення та зменшення впливу ризиків майбутніх катастроф та подій, за рахунок використання ризик-орієнтованого підходу під час проєктування,

планування, будівництва (зведення) та експлуатації будівельних об'єктів загалом;

- включення аспектів інклюзивності та соціальної справедливості (врахування потреб найбільш вразливих груп населення, створення фізично доступної інфраструктури, залучення місцевих громад до прийняття рішень щодо відновлення їхніх територій, врахування рівності у потребах чоловіків та жінок у процесі проєктування та реалізації проєктів відновлення);
- модернізація (використання надбань цифровізації, поступове впровадження та цілковите використання «розумних» технологій, оптимізація функціонального призначення будівельних об'єктів) та екологічна трансформація (покращення енергоефективності об'єктів, декарбонізація та екологізація будівельної галузі, енергетична децентралізація, врахування природоорієнтованих рішень (екологічні матеріали, зелені зони, сталий розвиток тощо)).

Зазначені принципи концепції «Build Back Better» (BBB) можна класифікувати за 4-ма ключовими підходами реалізації, що продемонстровано на рисунку 4.

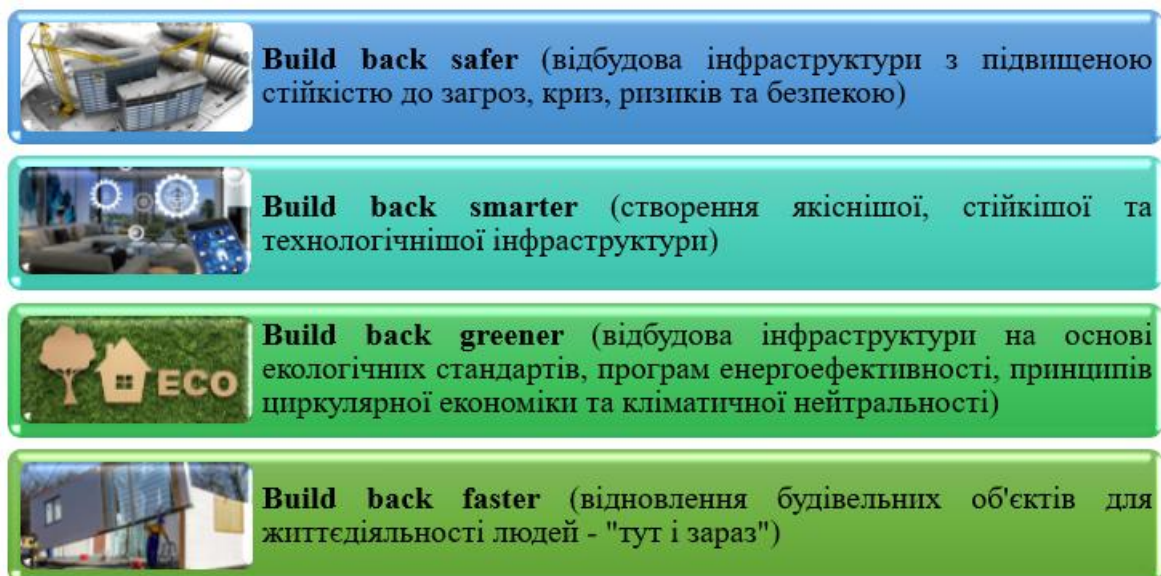


Рис 4. Підходи реалізації концепції «Build Back Better» (BBB)

Підсумовуючи, варто зазначити, що повоєнна «зелена» відбудова з урахуванням воєнних ризиків – це не лише екологічна концепція, але й водночас стратегія національної безпеки України, яка поєднує «зелені» технології та аспекти для створення інфраструктури, здатної протидіяти зовнішнім впливам. На основі дослідження, варто зазначити, що така синергія досягається за рахунок поєднання аспектів «зеленої» трансформації (покращення енергоефективності об'єктів; використання матеріалів з низьким вуглецевим слідом; застосування відновлюваних джерел енергії та енергозберігаючих інженерних систем; врахування

можливості для зменшення/скорочення (Reduce), повторного використання (Reuse) та переробки (Recycle) відходів будівництва та знесення; включення аспектів, що враховують вплив зведених/відновлених будівельних на екологічний стан навколишнього середовища та якість життя суспільства) та концепції «Build Back Better» (BBB) (створення стійкої до зовнішніх впливів інфраструктури; відновлення будівельних об'єктів на засадах екологічності та сталого розвитку; відбудова інфраструктури за принципом «тут і зараз»; відновлення будівельних об'єктів з урахування потреб зацікавлених осіб (маломобільні групи суспільства, громади) та науково-технічного прогресу). Однак для повноцінного впровадження та застосування на практиці важливо оновлювати нормативно-правову базу будівництва, проводити дослідження на більш масштабних проєктах, залучати зацікавлених осіб та застосовувати фінансово-економічні механізми для стимулювання розвитку цього напрямку в будівельній сфері.

ЛІТЕРАТУРА

1. Київська школа економіки (KSE Institute). Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії Росії проти України станом на початок 2024 року [Електронний ресурс]. Київ, 2024. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/01.01.24_Damages_Report.pdf
2. Київська школа економіки (KSE Institute). Звіт про збитки інфраструктури України внаслідок війни станом на листопад 2024 року [Електронний ресурс]. Київ, 2025. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/02/KSE_Damages_Report-November-2024-UA.pdf
3. Policy framework for green reconstruction: Towards an EU-readiness of Ukraine's carbon pricing | Deloitte Deutschland. *Deloitte* : website. URL: <https://www.deloitte.com/de/de/services/consulting-risk/research/policy-framework-green-reconstruction-ukraine.html> (дата звернення: 10.05.2026)
4. Bilotil V. Basic theoretical fundamentals, current state of development and trends of formation of green construction in Ukraine in the context of sustainable development. *Balanced nature using*. 2022. № 1. P. 63-73. URL: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2022.255225> (дата звернення: 10.05.2026)
5. Чи вимагає українське законодавство енергоефективного відновлення?. *Рубрика* : веб-сайт. URL: <https://rubryka.com/article/energoefektyvne-vidnovlennya/> (дата звернення: 10.05.2026).
6. Батіг В. В. Післявоєнне відновлення: світові практики та можливості застосування в Україні : кваліфікаційна робота бакалавра / Нац. ун-т «Києво-Могилянська академія». Київ, 2025. URL: <https://ekmair.ukma.edu.ua/items/3ee77a73-4f12-4c8c-9492-be4808e30e3c> (дата звернення: 10.05.2026)

ВПЛИВ КОНЦЕНТРАЦІЇ БІОМАСИ НА ФОРМУВАННЯ ТОВЩИНИ БІОПЛІВКИ

Сергій Телима

Інститут гідромеханіки НАН України, sertelyma@gmail.com

Розглянемо комплексну математичну модель біоплівки, яка враховує динаміку формування біомаси по товщині біоплівки і описується наступними рівняннями [1,2-4]:

1. Рівнянням транспорту субстрату та його споживання всередині біоплівки:

$$\frac{\partial L}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 L}{\partial x^2} - \frac{\mu_{\max}}{Y} \frac{L X_L}{K_{mL} + L}, \quad (1)$$

з початковою умовою: при $t = 0$ $L = L_0$ (2)

і граничними умовами:

при $x = 0$ $-D_L \frac{dL}{dx} = K_L (L_e - L),$ (3)

при $x = \delta$ $\frac{dL}{dx} = 0.$ (4)

де t - час, с,

x - просторова координата, м,

$L = L(x, t)$ - концентрація рідких забруднень в біоплівці, г/м³,

L_e - концентрація розчинених забруднень в стічних водах, г/м³,

$X_L(x, t)$ – концентрація мікроорганізмів в біоплівці, г/м³,

Y - маса витраченої норми кисню на одиницю маси споживаного субстрату,

$\mu_{\max}$ - максимальна швидкість утилізації, с⁻¹,

K_{mL} - концентрація забруднень, при якій швидкість перетворень складає 50% від максимальної, г/м³,

D_L - коефіцієнт дифузії, м²/с,

K_L – коефіцієнт переносу органічних забруднень, м/с.

2. Рівнянням балансу біомаси:

$$\frac{\partial X_L}{\partial t} = \mu_{\max} \frac{L}{K_{mL} + L} X_L - b X_L^2, \quad (5)$$

з початковою умовою: при $t = 0$ $X_L = X_{L0}$

де b - експериментальний параметр, м³/г с,

3. Рівнянням, що описує зростання біоплівки:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\mu_{\max}}{\rho_b} \int_0^{\delta} \frac{LX_L}{K_{mL} + L} dx - r\delta. \quad (6)$$

з початковою умовою: при $t=0$ $\delta = \delta_0$

де δ – товщина біоплівки, м,

r – інтенсивність відриву субстрату від біоплівки, c^{-1} ,

ρ_b – щільність біоплівки, .

Система рівнянь (1),(4)-(6) вирішується з початковими умовами і граничними (2)- (4), а також (7):

$$L(0, x) = L_0, X_L(0, x) = X_{L0}, \delta(0) = \delta_0. \quad (7)$$

Шуканими функціями є концентрації $L(x, t)$, $X_L(x, t)$ і товщина біоплівки $\delta(t)$.

Для розв'язання системи рівнянь (1)-(7) використано метод послідовної зміни стаціонарних станів, тобто, на кожний момент часу t при відповідній товщині плівки δ розподіл концентрацій $L(\delta)$ і $X_L(\delta)$ знаходиться з вирішення стаціонарних рівнянь транспорту субстрату та балансу біомаси [5.7].

Система рівнянь (1)-(7) у безрозмірному вигляді буде наступною:

$$\frac{\partial \bar{L}}{\partial \bar{t}} = \frac{\partial^2 \bar{L}}{\partial \bar{x}^2} - \alpha \frac{\bar{L} \bar{X}_L}{\bar{K}_{mL} + \bar{L}}, \quad (8)$$

$$\text{при } \bar{x} = 0 \quad \frac{d\bar{L}}{d\bar{x}} = \beta(\bar{L} - 1), \quad (9)$$

$$\text{при } \bar{x} = \bar{\delta} \quad \frac{d\bar{L}}{d\bar{x}} = 0. \quad (10)$$

$$\frac{\partial \bar{X}_L}{\partial \bar{t}} = \gamma \frac{\bar{L}}{\bar{K}_{mL} + \bar{L}} \bar{X}_L - \bar{b} \bar{X}_L^2, \quad (11)$$

$$\text{з початковою умовою: при } \bar{t} = 0 \quad \bar{X}_L = \bar{X}_{L0} \quad (12)$$

$$\frac{d\bar{\delta}}{d\bar{t}} = \lambda \int_0^{\bar{\delta}} \frac{\bar{L} \bar{X}_L}{\bar{K}_{mL} + \bar{L}} d\bar{x} - \bar{r} \bar{\delta} \quad (13)$$

$$\text{з початковою умовою: при } \bar{t} = 0 \quad \bar{\delta} = 1. \quad (14)$$

$$\text{де } \bar{L} = \frac{L}{L_e}, \bar{X}_L = \frac{X_L}{X_{L0}}, \bar{K}_{mL} = \frac{K_{mL}}{L_e}, \bar{L}_0 = \frac{L_0}{L_e}, \bar{x} = \frac{x}{\delta_0}, \bar{t} = \frac{D_L}{\delta_0^2} t,$$

$$\bar{\delta} = \frac{\delta}{\delta_0}, \quad \alpha = \frac{\mu_{\max} \delta_0^2 X_{L0}}{Y D_L L_e}, \quad \beta = \frac{K_L \delta_0}{D_L}, \quad \gamma = \frac{\mu_{\max} \delta_0^2}{D_L},$$

$$\lambda = \frac{\mu_{\max} \delta_0^2 X_{L0}}{D_L \rho_b}, \quad \bar{b} = \frac{b \delta_0^2 X_{L0}}{D_L}, \quad \bar{r} = \frac{r \delta_0^2}{D_L}. \quad (15)$$

Для врахування впливу біомаси на товщину біоплівки розглянемо

крайову задачу (8)-(14), яка має наступний вигляд :

$$\frac{\partial^2 L}{\partial x^2} - \alpha \frac{LX_L}{K_{mL} + L} = 0, \quad (16)$$

$$\text{при } x=0 \quad \frac{dL}{dx} = \beta(L-1), \quad (17)$$

$$\text{при } x=\delta \quad \frac{dL}{dx} = 0. \quad (18)$$

$$\gamma \frac{L}{K_{mL} + L} - bX_L = 0, \quad (19)$$

$$\text{з початковою умовою: при } t=0 \quad X_L = X_{L0} \quad (20)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \lambda F(\delta) - r\delta \quad (21)$$

$$F(\delta) = \int_0^\delta \frac{LX_L}{K_{mL} + L} dx$$

$$\text{з початковою умовою: при } t=0 \quad \delta=1 \quad (22)$$

З рівняння балансу біомаси (19) знаходимо зв'язок між шуканими функціями $L(x,t)$ і $X_L(x,t)$

$$X_L = \frac{\gamma}{b} \frac{L}{K_{mL} + L}, \quad (23)$$

Очевидно, що функції розподілу концентрацій L і X_L є також функціями (через $\alpha = \frac{\mu_{\max} \delta_0^2 X_{L0}}{YD_L L_e}$ і $\beta = \frac{K_L \delta_0}{D_L}$) від товщини біоплівки, тобто $L = L(x, \delta)$ та $X_L = X_L(x, \delta)$.

Отже, отримуємо для розв'язку наступну крайову задачу:
рівняння транспорт субстрату та його споживання всередині біоплівки з урахуванням балансу біомаси [1,3,8]:

$$\frac{\partial^2 L}{\partial x^2} - \alpha_1 \left(\frac{L}{K_{mL} + L} \right)^2 = 0, \quad (24)$$

$$\text{Де } \alpha_1 = \frac{\mu_{\max}^2 \delta_0^2}{bYD_L L_e}$$

$$\text{при } x=0 \quad \frac{dL}{dx} = \beta(L-1), \quad (25)$$

$$\text{при } x=\delta \quad \frac{dL}{dx} = 0. \quad (26)$$

та рівняння, що описує зростання біоплівки :

$$\frac{d\delta}{dt} = \lambda F(\delta) - r\delta \quad (27)$$

$$\text{де} \quad F(\delta) = \frac{\gamma}{b} \int_0^\delta \left(\frac{L}{K_{mL} + L} \right)^2 dx$$

з початковою умовою: при $t=0$ $\delta=1$ (28)

Очевидно, що розв'язок рівняння (24) транспорту субстрату та його споживання всередині біоплівки з відповідним балансом біомаси не залежить від параметра X_{L0} .

Вирішення крайової задачі (24)-(28) було виконано з використанням методу скінченних різниць.

Нижче приведені графіки зміни товщини біоплівки у часі при різних значеннях параметрів $r = 0.005-0.030 \text{ год}^{-1}$ і $X_{L0} = 18000 \text{ г/м}^3$. Графіки побудовані із врахуванням біомаси і без врахування

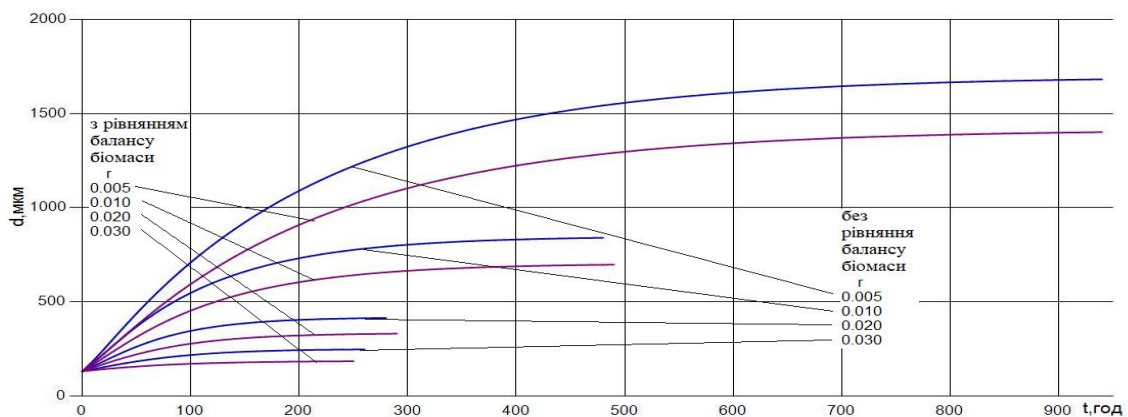


Рис.1. Зміна товщини біоплівки у часі при $r = 0.005 \div 0.030 \frac{1}{\text{год}}$ і

$$X_{L0} = 18000 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}.$$

Як свідчать дані розрахунків і побудовані графіки, вплив концентрації біомаси суттєво впливає на товщину біоплівки. Врахування складової балансу біомаси зменшує товщину біоплівки при інтенсивності її відриву більше 0.01 год^{-1} до оптимальних величин менше 500 мкм і таким чином на стадії проектування та експлуатації очисних споруд є можливість на основі прогнозних розрахунків і моделювання планувати різні режими та регулювати процес очистки і підвищувати ефективність роботи біореакторів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Henze M., M van Loosdrecht M.E., Ekama G.A., Brdjanovic D.(2008). Biological Wastewater Treatment. IWA Publishing, London, 511p.

2. Moira Alvi et.al.(2023). Deep learning in wastewater treatment: a critical review. Water Research, vol.245.pp.1-15.
3. Boltz J., Morgenroth C., Dipankar S.(2010). Mathematical modeling of biofilms and biofilm reactors. Water Science and Technology, vol.62(8).pp.1821-1836.
4. Levandowsky Z., Beynal H.(2014). Fundamentals of biofilm research. CRC Press.157p.
5. Elenter D., Milferstedt K., Zhang W., Hausner M., Morgenroth E.(2007). Influence of detachment on substrate removal and microbial ecology in a heterotrophic / autotrophic biofilm. Water Res., 41.pp.4657-4671.
6. Телима С.В.(2025). Про формування структури закріпленого біоценозу біореакторах при очищенні стічних вод. Матеріали 1У Міжнародної науково-практичної конференції “Green Construction”.Київ, КНУБА,14-15 травня 2025.С.292-297.
7. Laspidou C.S., Rittman B.F.(2004). Modeling the development of biofilm density including active bacteria, inert biomass and extracellular polymeric substances. Water Research, vol.38. pp.3349-3361.
8. Ohi Leon A., Horn H., Hemper D.C.(2004). Behaviour of biofilm systems under varying hydrodynamic conditions. Water Science and Technology. vol.49, no.11. IWA Publishing. pp.345-351.

ОЦІНКА СОНЯЧНОГО ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ КІРОВОГРАДСЬКОЇ ОБЛАСТІ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ ПРОЄКТІВ

Марія Тємченко

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
mariia.tiemchenko-ekom251@iung.edu.ua*

Енергоефективність будівельних проєктів є важливим складником зеленого будівництва та сталого розвитку сучасних територій. В умовах зростання вартості традиційних енергоресурсів використання відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної, стає одним із найефективніших шляхів зниження енергоспоживання будівель.

Метою статті є оцінка сонячного енергетичного потенціалу Кіровоградської області та м. Кропивницький для обґрунтування можливості впровадження сонячних фотоелектричних систем у будівельні проєкти регіону.

Дослідження виконано на основі даних міжнародної платформи Global Solar Atlas [1]. Було проаналізовано ключові показники: питому фотоелектричну вихідну потужність (PVOUT), пряму нормальну сонячну радіацію (DNI), сумарну радіацію на горизонтальну поверхню (GHI), розсіяну радіацію (DIF), сумарну радіацію на нахилену поверхню (GTI),

оптимальний кут нахилу фотоелектричних модулів (ОРТА) та температуру повітря. Проведено просторовий аналіз картографічної інформації для визначення найбільш перспективних районів області.

Результати та обговорення. Геліоенергетичні показники Кіровоградської області наведено в Таблиці 1.

Таблиця 1

**Геліоенергетична характеристика Кіровоградської області
(середньодобові значення)**

Показник	Значення
Питома фотоелектрична вихідна потужність (PVOUT), кВт*год/кВтп	3.30 – 3.42
Пряма нормальна сонячна радіація (DNI), кВт*год/м ²	3.22 – 3.42
Сумарна радіація на горизонтальну поверхню (GHI), кВт*год/м ²	3.39 – 3.52
Розсіяна радіація на горизонтальну поверхню (DIF), кВт*год/м ²	1.52 – 1.62
Сумарна радіація на нахилену поверхню (GTI), кВт*год/м ²	3.96 – 4.12
Оптимальний нахил фотоелектричних модулів (ОРТА), °	34 – 36
Температура повітря, °С	8.9 – 10.1
Висота місцевості (ELE), м	-

Середньодобова питома фотоелектрична вихідна потужність (PVOUT) становить 3,30–3,42 кВт·год/кВтп, сумарна радіація на горизонтальну поверхню (GHI) — 3,39–3,52 кВт·год/м², а сумарна радіація на нахилену поверхню (GTI) — 3,96–4,12 кВт·год/м².

Просторовий розподіл сумарної радіації на горизонтальну поверхню (GHI) представлено на Рисунку 1.

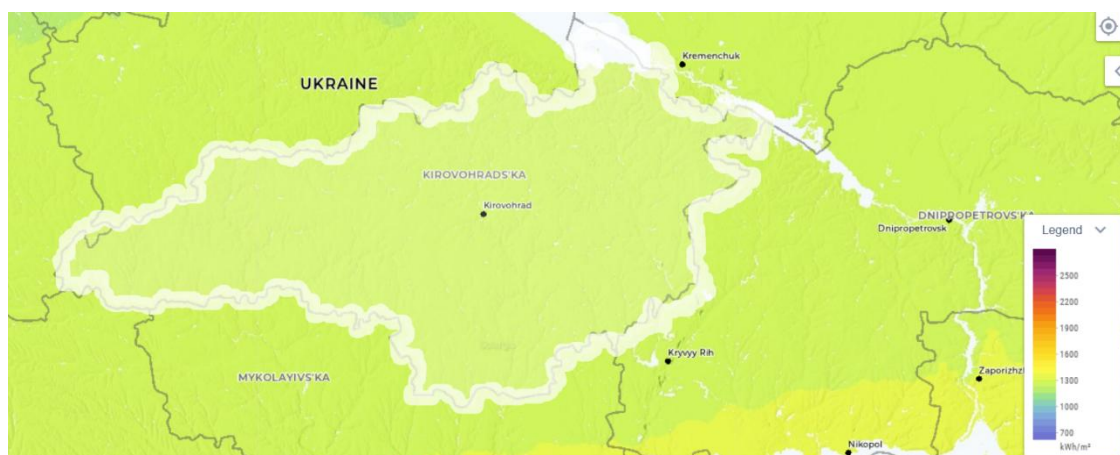


Рис 1. Сумарна радіація на горизонтальну поверхню (GHI) Кіровоградської області

За результатами просторового аналізу 97,9 % території області має показник GHI більше 3,40 кВт·год/м². Річний показник GHI на більшій частині території становить приблизно 1300 кВт·год/м².

Розподіл сумарної радіації на нахилу поверхню (GTI) та оптимального кута нахилу модулів також свідчить про високу придатність території. 80 % площі області мають GTI більше 4 кВт·год/м².

Геліоенергетичні показники м. Кропивницький наведено в Таблиці 2.

Таблиця 2

**Геліоенергетична характеристика м. Кропивницький
(середньодобові значення)**

Показник	Значення
Питома фотоелектрична вихідна потужність (PVOUT), кВт*год/кВтп	3.34 – 3.37
Пряма нормальна сонячна радіація (DNI), кВт*год/м ²	3.32 – 3.34
Сумарна радіація на горизонтальну поверхню (GHI), кВт*год/м ²	3.44 – 3.45
Розсіяна радіація на горизонтальну поверхню (DIF), кВт*год/м ²	1.58 – 1.58
Сумарна радіація на нахилу поверхню (GTI), кВт*год/м ²	4.02 – 4.03

Продовження таблиці 2

Оптимальний нахил фотоелектричних модулів (OPTA), °	35 – 36
Температура повітря, °C	9.6 – 9.8
Висота місцевості (ELE), м	106 - 183

Місто Кропивницький має дещо вищі показники порівняно із середніми по області: GHI становить 3,44–3,45 кВт·год/м², GTI — 4,02–4,03 кВт·год/м², PVOUT — 3,34–3,37 кВт·год/кВтп.

Просторовий розподіл сумарної радіації на горизонтальну поверхню для міста Кропивницький представлено на Рисунку 2.

Висота місцевості міста коливається в межах 106–183 м, що є сприятливим фактором для розміщення сонячних панелей.

Отримані результати (Таблиці 1, 2 та Рисунки 1–3) підтверджують високий сонячний потенціал Кіровоградської області. Інтеграція сонячних фотоелектричних систем у будівельні проєкти дозволить суттєво підвищити енергоефективність будівель, знизити споживання традиційних енергоносіїв та зменшити вуглецевий слід. Таке впровадження відповідає вимогам чинного законодавства України [2] та державним будівельним нормам щодо енергоефективності [3].

Особливо перспективним є використання сонячної енергетики при новому будівництві та реконструкції об'єктів у центральній і південній частинах області.

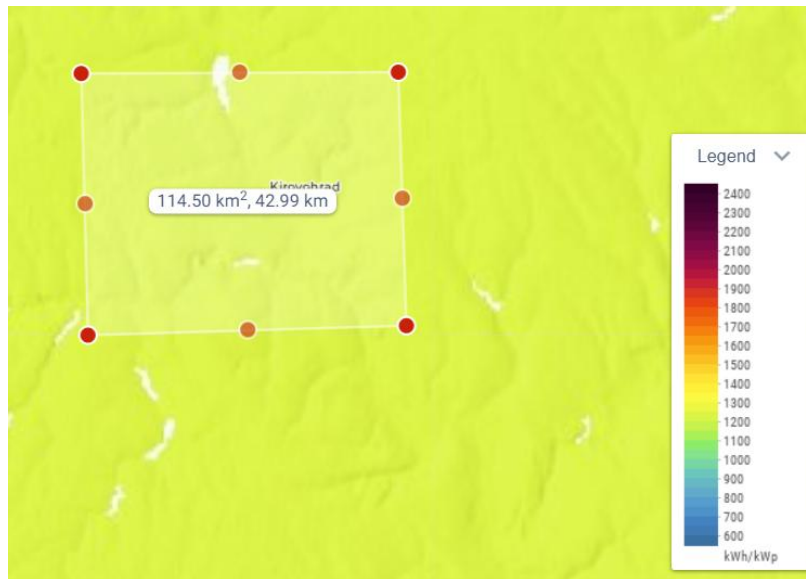


Рис 2. Сумарна радіація на горизонтальну поверхню (GHI) м. Кропивницький



Рис 3. Карта м. Кропивницький

Висновки. Кіровоградська область має високий сонячний енергетичний потенціал (річний GHI приблизний 1300 кВт·год/м²), що значно перевищує мінімальний поріг доцільності (1100 кВт·год/м²). Більше 97 % території області та практично вся територія м. Кропивницький придатні для ефективного використання сонячних панелей.

Інтеграція сонячних технологій у будівельні проекти регіону є перспективним напрямом підвищення їх енергоефективності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Global Solar Atlas [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://globalsolaratlas.info>

2. Закон України «Про альтернативні джерела енергії» від 20.02.2003 № 555-IV.

3. ДБН В.2.5-56:2014 Інженерне обладнання будинків і споруд. Системи електропостачання.

РОЗУМНІ БУДИНКИ ТА УКРИТТЯ НОВОГО ПОКОЛІННЯ В УМОВАХ ЕКОЛОГІЧНОЇ СТІЙКОСТІ

Ольга Ченчева

*Кременчуцький національний університет імені Михайла
Остроградського, chenchevaolga@gmail.com*

Сучасний світ стикається з масштабними екологічними, енергетичними та безпековими викликами. Зміни клімату, урбанізація, дефіцит ресурсів і воєнні загрози вимагають нових підходів до формування житлової та захисної інфраструктури. Особливо актуальним це стало для України в умовах війни, коли питання безпеки населення, енергонезалежності та стійкості інфраструктури набули стратегічного значення. У таких умовах важливого значення набувають розумні будинки та укриття нового покоління, які поєднують сучасні цифрові технології, автономність, енергоефективність і принципи сталого розвитку, що стають основою концепції «Країна-фортеця» [1].

Ця концепція набуває особливого значення в умовах сучасних воєнних та техногенних загроз. Її основна ідея полягає у формуванні стійкої державної інфраструктури, здатної забезпечувати безпеку населення навіть в умовах тривалих кризових ситуацій. У межах цієї концепції важливу роль відіграє створення мережі автономних укриттів нового покоління, інтегрованих у систему «розумного міста» та оснащених smart-технологіями. Такі споруди повинні забезпечувати автономне енергоживлення, очищення повітря, водопостачання, цифровий моніторинг і зв'язок. Поєднання принципів енергоефективності, екологічної стійкості та сучасних технологій дозволяє створити адаптивну безпекову інфраструктуру, яка відповідає потребам цивільного захисту населення та стратегічним завданням післявоєнної модернізації України [2].

Концепція розумного будинку базується на використанні автоматизованих систем управління, які контролюють освітлення, опалення, вентиляцію, водопостачання та системи безпеки. Основою таких рішень є технології Інтернету речей (IoT), сенсорні мережі, системи моніторингу та елементи штучного інтелекту. Завдяки автоматизації будівля може адаптуватися до потреб мешканців, регулювати споживання ресурсів і мінімізувати втрати енергії. Наприклад, smart-системи автоматично вимикають освітлення у порожніх приміщеннях, контролюють

температуру або регулюють вентиляцію залежно від кількості людей у приміщенні [3].

Важливим напрямом розвитку розумних будинків є використання відновлюваних джерел енергії. Сонячні панелі, теплові насоси, системи накопичення електроенергії та рекуперації тепла забезпечують енергетичну автономність будівель і зменшують залежність від централізованих мереж. Для України це особливо важливо в умовах пошкодження енергетичної інфраструктури та нестабільного електропостачання. Крім того, використання екологічних матеріалів і сучасних теплоізоляційних конструкцій дозволяє зменшити тепловтрати та скоротити викиди парникових газів [4].

Особливу увагу сьогодні привертає розвиток укриттів нового покоління. Події останніх років показали, що традиційні захисні споруди часто не відповідають сучасним вимогам щодо безпеки, автономності та тривалого перебування людей. Нові укриття повинні бути не лише місцем тимчасового захисту, а багатофункціональними просторами, здатними забезпечувати життєдіяльність населення у разі тривалих надзвичайних ситуацій [5].



Рис.1. Концепція сучасних розумних укриттів з контролем внутрішніх параметрів середовища

Однією з головних характеристик сучасного укриття є автономність. У разі аварійного відключення електроенергії споруда повинна мати резервні джерела живлення: акумулятори, генератори, сонячні панелі та системи накопичення енергії. Це забезпечує безперебійну роботу освітлення, вентиляції, зв'язку та інших критично важливих систем. Використання альтернативної енергетики не лише підвищує рівень безпеки, а й відповідає принципам екологічної стійкості.

Не менш важливими є системи очищення та вентиляції повітря. Укриття нового покоління оснащуються автоматизованими системами контролю мікроклімату, які відстежують температуру, вологість, рівень кисню та концентрацію шкідливих речовин. Інтелектуальні системи здатні автоматично регулювати роботу вентиляції залежно від кількості людей у приміщенні та зовнішніх умов. Це особливо важливо у випадку тривалого перебування населення в закритому просторі.

Важливим елементом сучасних укриттів є також автономне

водопостачання та системи ресурсозбереження. Резервуари для зберігання води, системи очищення та повторного використання ресурсів дозволяють підтримувати життєдіяльність людей навіть за відсутності зовнішньої інфраструктури. У деяких проєктах застосовуються системи збору дощової води та технології циркулярної економіки, що сприяють зменшенню навантаження на довкілля.

Суттєву роль відіграють smart-технології моніторингу та оповіщення. Інтеграція укриттів у цифрову систему «розумного міста» дозволяє здійснювати централізований контроль технічного стану споруд, координувати евакуацію та оперативно інформувати населення про небезпеку. Використання мобільних застосунків, геоінформаційних платформ і автоматизованих систем управління значно підвищує ефективність реагування на надзвичайні ситуації.

Особливо перспективним напрямом є створення модульних автономних укриттів, які можуть швидко встановлюватися біля житлових будинків, навчальних закладів або об'єктів критичної інфраструктури. Такі споруди оснащуються автономними системами електроживлення, вентиляції, очищення повітря та цифрового управління. Модульний принцип забезпечує мобільність, швидкість монтажу та адаптацію до різних умов експлуатації.

Для України розвиток розумних будинків та укриттів нового покоління має стратегічне значення. Відновлення інфраструктури після руйнувань потребує впровадження сучасних енергоефективних та безпечних рішень. Інтеграція smart-технологій, автономних систем життєзабезпечення та відновлюваної енергетики дозволить сформувати новий рівень цивільного захисту населення та забезпечити стійкість міст до сучасних викликів.

Таким чином, розумні будинки й укриття нового покоління стають важливою складовою екологічно стійкого та безпечного середовища. Вони поєднують енергоефективність, автономність, цифрові технології та високий рівень захисту населення. У перспективі саме такі споруди можуть стати основою модернізації міської інфраструктури та формування безпечного простору для життя в умовах глобальних криз і воєнних загроз.

ЛІТЕРАТУРА

1. Коваль М. В., Коваль В. В., Коцюрба В. І., Білик А. С. Організаційно-технічні засади побудови системи інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури енергетичної галузі України // Наука і оборона. 2022. № 3. С. 11–16. DOI: 10.33099/2618-1614-2022-20-3-4-11-16.
2. Wang L., Zhao H., Li X. Sustainable underground infrastructure and smart shelter design in resilient cities // Tunnelling and Underground Space Technology. 2023. Vol. 140. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105321.
3. Li W. Responsible smart home technology adoption: exploring sustainability, privacy and ethical challenges // Smart Cities. 2025. DOI:

10.1016/j.scs.2025.105692.

4. Рябчун Ю. В., Серета Д. Є., Кохан В. Р., Доля О. В. Можливості та переваги українського ринку технологій «розумний будинок» // Управління розвитком складних систем. 2023. № 56. С. 181–187. DOI: 10.32347/2412-9933.2023.56.181-187.
- Li, W. (2025). Responsible smart home technology adoption: Exploring sustainability, privacy and ethical challenges. *Smart Cities*. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.105692>
5. Ahmed M., Hassan R., Gupta N. Energy-efficient autonomous shelter systems integrating renewable energy and IoT technologies // *Energy and Buildings*. 2024. Vol. 315. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114320.

ВПЛИВ ДОБАВОК ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ДІЇ НА МІЦНІСТЬ ЛУЖНОГО ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТУ

Ольга Бондаренко¹, Костянтин Каверин¹

¹*Київський національний університет будівництва і архітектури,
bondolya3@gmail.com, 1krik.1k1@gmail.com*

Загострення економічних та екологічних проблем України, що спостерігається в наш час, потребує розробки нових низькоенергоємних технологій переробки відходів теплоенергетики та металургії, які б забезпечували максимальний ступінь їхньої утилізації та гарантували можливість отримання будівельних матеріалів, безпечних для здоров'я людини [1]. Досвід використання відходів показує, що в'язучі речовини, які містять їх у своєму складі характеризуються низькими будівельно-технологічними властивостями, в тому числі повільним тужавінням, невисоким темпом твердіння на ранніх етапах, а бетони на їх основі мають невисокі експлуатаційні характеристики, зокрема морозо- та корозійну стійкість [2]. Для запобігання цих явищ до складу бетонної суміші вводяться комплексні добавки поліфункціональної дії, які визначають не тільки кінетику набору міцності, але й формування відповідної структури матеріалу, що має суттєвий вплив на властивості та довговічність отриманого штучного каменю. При цьому актуальною є розробка концепції максимального використання потенційних можливостей відходів, як сировини для отримання таких будівельних матеріалів та виробів, які за своїми властивостями не поступаються традиційним, але є ефективнішими з екологічної та економічної точок зору [3].

Метою роботи було дослідження впливу добавок поліфункціональної дії, які містять у своєму складі лужний компонент – пластифікатор, на синтез міцності штучного каменю на основі лужного шлакопортландцементу.

Аналіз отриманих результатів дослідження міцнісних характеристик розроблених в'язучих композицій показує, що сумісний помел позитивно впливає на процеси структуроутворення у лужних

шлакопортландцементних системах і дозволяє прискорити процес набору міцності при стиску як на ранніх, так і на більш пізніх етапах твердіння (рис. 1, а). Так, при використанні окрім метасилікату натрію пластифікуючих добавок “Неопласт 500” та “Coral N – 4” міцність шлакопортландцементних композицій на 2 добу зростає на 15...20%, порівняно з немодифікованим шлакопортландцементом, і становить 10,6 та 10,8 МПа, а на 28 добу – на 20...25% і сягає 45,5 та 45,7 МПа відповідно; при застосуванні “Неопласт 700” та “Неопласт 1000” міцність модифікованого шлакопортландцементу на 2 добу зростає на 20...25% і сягає 14,7 та 14,6 МПа, а на 28 добу – на 25...30% і становить 49,5 та 46,5 МПа відповідно.

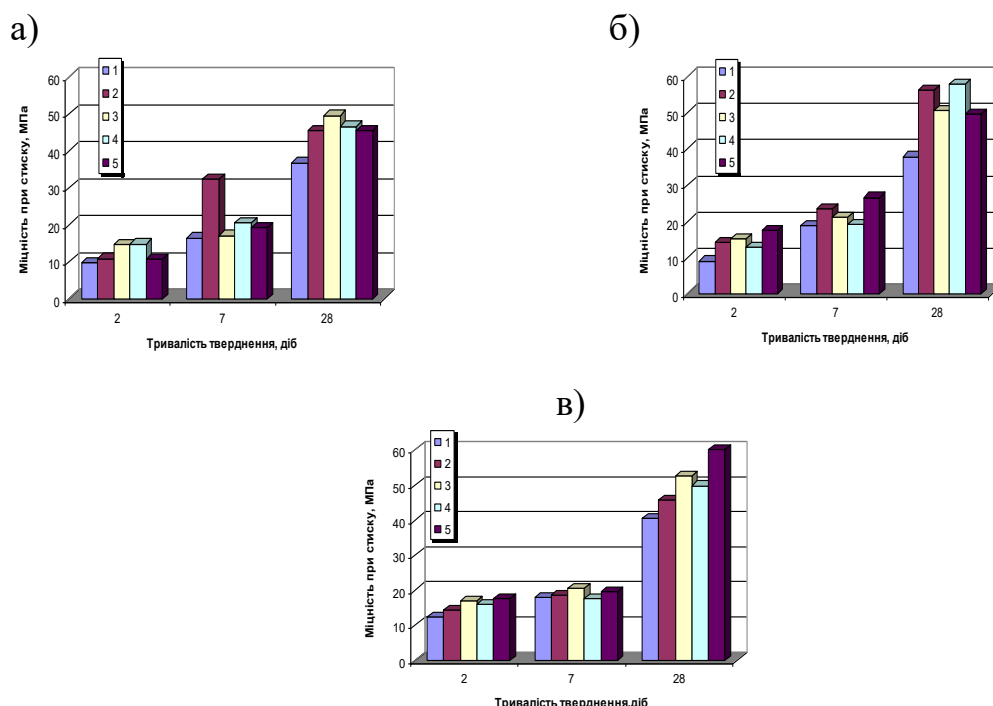


Рис. 1. Кінетика набору міцності при стиску шлакопортландцементу, що містить 60% шлаку (1), модифікованого метасилікатом натрію (а), кальцинованою содою (б), метасилікатом натрію і кальцинованою содою (в) та добавками: “Неопласт 500” (2), “Неопласт 700” (3), “Неопласт 1000” (4), “Coral N – 4” (5)

Введення кальцинованої соди у комплексі з “Неопласт 700” та “Coral N – 4” забезпечує найвищі результати зростання міцності на початкових етапах твердіння. Так, на 2 добу вона збільшується на 23...28% і становить 15,0 та 17,5 МПа. На більш пізніх етапах твердіння найвищі показники міцності досягаються при застосуванні “Неопласт 500” та “Неопласт 1000”. Так, на 28 добу вони збільшуються на 25...30% і становлять 57,8 та 56,1 МПа відповідно (рис. 1, б). Комплексне використання метасилікату натрію, кальцинованої соди і пластифікуючих добавок забезпечує найвищі показники міцності в разі застосування “Неопласт 700” та “Coral N – 4” (на

2 добу – 17 і 17,5 МПа та на 28 добу – 52,5 і 60 МПа) (рис. 1, б).

В ході подальших досліджень було встановлено фазовий склад новоутворень шлакопортландцементних в'язучих композицій, який представлений переважно низькоосновними гідросилікатами кальцію (CSH (В), скоутитом, афвілітом, піктолітом) та рентгеноаморфними гідроалюмосилікатними фазами.

Показано, що активація шлакопортландцементу лужною складовою та пластифікуючою добавкою “Неопласт 700” забезпечує зниження основності утворених продуктів гідратації (CaO/SiO_2) до 1,1...1,2 в разі використання метасилікату натрію (рис. 2, б), до 1,3...1,4 (рис. 2, в) – при застосуванні кальцинованої соди та до 1,25...1,35 – при використанні метасилікату натрію і кальцинованої соди у комплексі, тоді як для шлакопортландцементу без добавок співвідношення CaO/SiO_2 становить 2,1...2,5 (рис. 2, а).

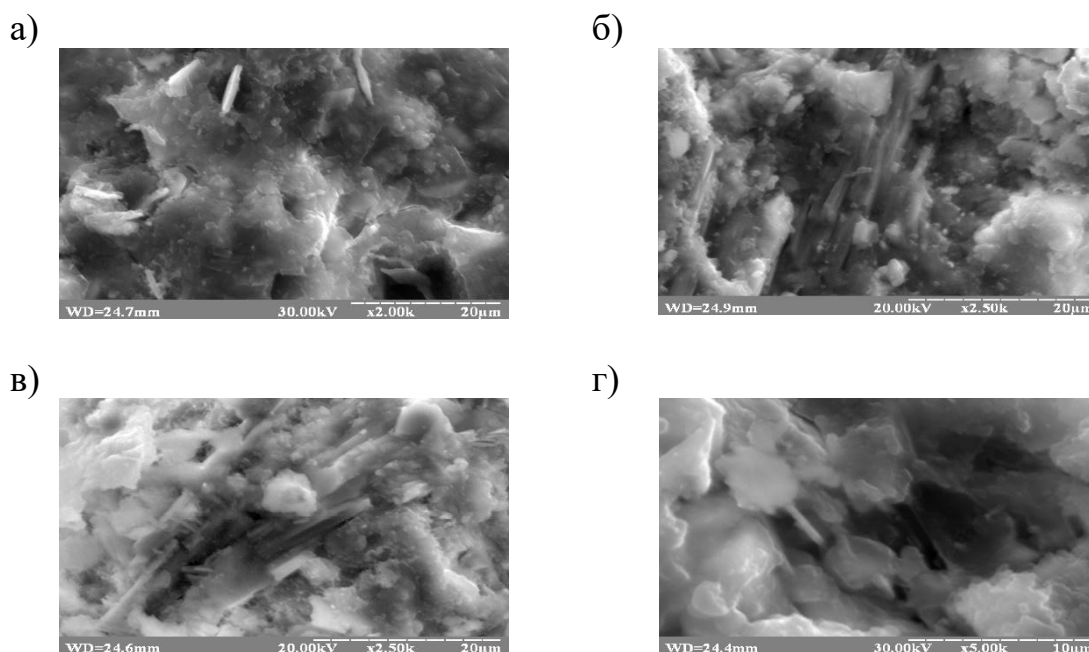


Рис. 2. Електронно-мікроскопічні фотографії поверхні сколу цементного каменю на основі шлакопортландцементу, що містить 60% шлаку (а), модифікованого метасилікатом натрію (б), кальцинованою содою (в), метасилікатом натрію і кальцинованою содою (г) та пластифікуючою добавкою “Неопласт 700” після твердіння в нормальних умовах протягом 28 діб

Таким чином, в результаті проведених досліджень встановлено, що формування низькоосновних гідросилікатів кальцію та рентгеноаморфних гідроалюмосилікатних фаз у складі продуктів гідратації цементного каменю позитивно впливає на фізико-механічні показники отриманих в'язучих композицій на основі лужного шлакопортландцементу, модифікованого добавками поліфункціональної дії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kryvenko P.V., Pushkareva E.K., Gots V.Y., Kovalchuk G.Yu. Cements and concretes based on fuel ashes and slags: Monograph – K.: Publishing House "Express-Polygraf", 2012. 258 p.
2. Kryvenko P.V., Pushkareva E.K. Durability of slag-alkaline concrete. K.: Budivelnik, 1993. 224 p.
3. Пушкарьова К.К., Бондаренко О.П., Несенюк В.Г. Бетони на основі шлакопортландцементів, модифікованих водоредукуючими добавками. Зб. “Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка”. К., НДІБМВ, 2011. Вип. 39. С. 74-77.

УДОСКОНАЛЕНИЙ БАГАТОШАРОВИЙ ВОГНЕЗАХИСНИЙ ТЕКСТИЛЬ: МАТЕРІАЛИ, ГІБРИДНІ АРХІТЕКТУРИ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ФУНКЦІОНАЛІЗАЦІЯ

Оксана Касьянова

*Київський національний університет будівництва і архітектури,
kasianova_ot@knuba.edu.ua*

Станом на початок березня 2026 року, за даними МВС України, від початку повномасштабного вторгнення (з 24 лютого 2022 року) загинули 114 рятувальників ДСНС, понад 500 працівників ДСНС зазнали поранень під час виконання службових обов'язків. Найбільше рятувальників гине під час повторних обстрілів (коли рятувальники прибувають на місце першого удару), а також при розмінуванні. Окрім професійних рятувальників, загинули також понад 100 волонтерів, які працювали разом з ДСНС у небезпечних районах.

Ключові причини втрат:

- *повторні удари* - це найпоширеніша причина смертей і поранень. Після першого обстрілу цивільного чи промислового об'єкта рятувальники прибувають на місце для гасіння пожеж і розбору завалів. Ворог свідомо завдає другого удару по тих самих координатах, коли там уже працюють загони ДСНС.

- *мінна небезпека та розмінування* - сапери та піротехніки ДСНС щодня працюють на деокупованих територіях. Травмування стаються через підриви на протипіхотних мінах, мінах-пастках та нерозірваних боєприпасах, якими забруднено понад 133 тисячі км² території України.

- *обстріли під час евакуації та гасіння пожеж* - рятувальники часто потрапляють під вогонь артилерії, РСЗВ або ударних дронів безпосередньо в процесі гасіння вогню в прифронтових зонах чи під час вивезення людей із небезпечних районів.

- *специфічні ризики рятувальних робіт* - окрім воєнних чинників, надзвичайники зазнають травм через обвалення конструкцій пошкоджених

будівель, високі температури та токсичні продукти горіння під час ліквідації масштабних пожеж [1].

Проблема захисту особового складу підрозділів ДСНС й персоналу газодобувних та металургійних підприємств загострюється й потребує більш сучасних рішень в сфері використання вогнестійких матеріалів у засобах індивідуального захисту (ЗІЗ). Окреме місце також займають будівельні матеріали та конструкції для захисту й підвищення вогнетривких властивостей будівель й споруд.

У останні роки проблематика у розробці вогнезахисного текстилю змістилася від оптимізації одного волокна до інтегрованих багатошарових систем, що поєднують термостійкість, механічну міцність та термофізіологічний комфорт. Особлива увага приділяється гібридним композитним архітектурам та компромісу між тепловим захистом та комфортом користувача. Нові проблемні дослідження розглядають міграцію вогнезахисних речовин (FR) [2], старіння матеріалу [3 - 5] та обмежену репрезентативність лабораторних випробувань.

Вогнезахисний одяг відіграє вирішальну роль у забезпеченні безпеки персоналу, який працює в умовах високих температур та небезпечних середовищ. Традиційно дослідження в цій галузі зосереджувалися на розробці волокон, стійких до полум'я, таких як арамід та полібензімідазол. Однак останні дослідження демонструють зміну парадигми в бік багатошарових композитних систем, де загальна продуктивність визначається структурною конфігурацією, а не властивостями окремих матеріалів.

Основна проблема полягає у вирішенні внутрішнього протиріччя між тепловим захистом та фізіологічним комфортом. Збільшення теплового опору зазвичай знижує проникність вологи та збільшує теплове навантаження, що призводить до зниження експлуатаційної ефективності та підвищеного ризику для користувача. Отже, сучасні дослідження наголошують на багатоцільовій оптимізації, інтегруючи теплоізоляцію, повітропроникність та ергономічні характеристики.

Недавні огляди підтверджують, що вогнезахисна продуктивність визначається взаємодією кількох шарів, включаючи: зовнішню оболонку, яка забезпечує вогнестійкість, вологозахисний бар'єр та теплову підкладку для підвищення ізоляційних властивостей.

Механізми теплового переносу включають теплопровідність, випромінювання та конвекцію в повітряних зазорах. Передові підходи до моделювання включають рівняння переносу тепла в умовах тимчасових процесів та емпіричні індекси, такі як TPP та TNL.

У дослідженні 2021 року [5] співавтори наголошують на зростаючій залежності від емпіричних та напівемпіричних моделей для прогнозування теплових характеристик, тоді як у дослідженні 2021 року демонструється приклад проєктування та виготовлення аерогель-нетканого матеріалу для

багатошарової захисної системи одягу [6]. Автори наголошують, що розроблений аерогель-нетканий композит має майже таку ж стійкість до сухого та променевого тепла, але нижчу стійкість до контактного тепла порівняно з комерційними аерогель-нетканими матеріалами. Він має високу проникність для повітря та вологих парів і забезпечує тепловий комфорт користувачеві в жаркому та вологому середовищі. Загальні характеристики термостійкості, разом з високою гнучкістю та здатністю, роблять аерогель-нетканий матеріал потенційною альтернативою комерційним нетканим матеріалам для будь-якої термозахисної системи одягу, де ключовими вимогами є гнучкість тканини та тепловий комфорт.

До поширених матеріалів належать: арамід (наприклад, кевлар, номекс), РВІ та РВО, модакрил та FR-віскоза, неорганічні волокна (вуглець, діоксид кремнію, базальт).

Однак останні дослідження показують чіткий зсув до гібридних систем, де різні типи волокон поєднуються для балансу термічної стабільності, гнучкості та управління вологою.

Гібридизація дозволяє адаптувати функціональні градієнти між шарами, покращуючи як захист, так і комфорт.

Фазово-перехідні матеріали все частіше досліджуються для зменшення теплопередачі в захисному одязі пожежників. Однак ці матеріали, як правило, є вуглеводнями, а отже, легкозаймистими. Було виявлено, що включення кремнеземного аерогелю до покриття тканини з фазово-перехідного матеріалу знижує займистість (тобто надає більшої стійкості до тепла, вищої температури займання та повільнішого поширення полум'я) [7]. Зниження займистості, ймовірно, пов'язане з тим, що фазово-перехідний матеріал залишається на частинках аерогелю після його розплавлення через дуже високу питому площу поверхні аерогелю. Тому новітні розробки зосереджені на гнучких аерогелевих композитах, інтеграції аерогелю та нетканого матеріалу, механічно армованих аерогелях. Незважаючи на їхні переваги, все ще залишаються проблеми з точки зору крихкості, виділення пилу та інтеграції в текстильні системи, що звужує область застосування цих матеріалів.

Технології фазоперехідних матеріалів (PCM) підвищують термофізіологічний комфорт, поглинаючи та вивільняючи приховане тепло під час фазових переходів. Їх інтеграція в захисний одяг допомагає стабілізувати температуру тіла людини під впливом тепла.

Ключові досягнення включають наступні напрямки: мікроінкапсуляцію, стабілізований за формою PCM, інтеграцію на рівні волокон.

Однак, обмеження щодо витоків, циклічної стабільності та обмеженої ємності акумулювання тепла зберігаються [8, 9]. Зважаючи на наведені передумови основною тенденцією останніх років є розробка інтелектуальних систем ЗІЗ, що інтегрують датчики температури,

газодетектори та системи фізіологічного моніторингу при розробці ЗІЗ для використання у надскладних умовах та при наявності чинників, що потребують захисту від високих температур.

Використання матеріалів з фазовим переходом пов'язане з певними труднощами. Наприклад, використання нових креативних матеріалів та включення РСМ в одяг вимагає створення нових методів та стандартів випробувань. Техніка нанесення є найскладнішим аспектом створення текстильних РСМ систем. Очевидним рішенням є поміщення РСМ у полімерну оболонку, проте це додає додаткової ваги активному матеріалу. Деякі з технологічних проблем включають ефективне інкапсулювання, вихід інкапсуляції та стабільність під час використання, а також інтеграцію капсул у тканинну структуру. Ще однією значною проблемою є довговічність тканин з включенням РСМ при багаторазовому використанні.

Ці системи дозволяють оцінювати ризики в режимі реального часу та підвищують безпеку експлуатації. Однак проблеми, пов'язані з джерелом живлення, довговічністю та термостійкістю вбудованої електроніки, залишаються значними.

Наведений у [10] аналіз демонструє, що жоден окремий матеріал не може одночасно задовольнити всі вимоги до ефективності та дієвості ЗІЗ. Натомість, у цьому аспекті важлива системна інженерія, завдяки якій доречним буде перехід до багатофункціональних шаруватих архітектур, інтеграція адаптивних систем терморегуляції, розробка можливостей інтелектуального моніторингу, збільшення уваги до екологічної безпеки та довговічності.

Критичним обмеженням поточних досліджень є залежність від лабораторних випробувань, які не повністю відтворюють реальні умови. Майбутні дослідження повинні пріоритезувати повномасштабні випробування на знос, випробування на теплових манекенах, аналіз тривалого старіння [11].

Висновки.

Еволюція вогнезахисних текстильних виробів демонструє чіткий перехід від матеріально-орієнтованих підходів до системно-орієнтованих парадигм проектування, в яких загальна продуктивність визначається взаємодією кількох функціональних шарів, а не властивостями окремих компонентів. Сучасні досягнення все частіше базуються на гібридних багатошарових архітектурах, що інтегрують аерогелі, матеріали з фазовим переходом (PCM) та інтелектуальні технології моніторингу, що дозволяє покращити тепловий захист, зберігаючи при цьому прийнятний рівень термофізіологічного комфорту.

Фундаментальною проблемою залишається невід'ємний компроміс між теплоізоляцією та фізіологічним комфортом, що вимагає застосування багатоцільових стратегій оптимізації при проектуванні засобів індивідуального захисту. У цьому контексті гібридизація та функціональна

градація між шарами виступають ключовими інженерними принципами для досягнення збалансованого профілю продуктивності.

Незважаючи на значний прогрес, залишається кілька критичних обмежень, включаючи недостатню довговічність передових матеріалів, не вирішені питання, пов'язані з інтеграцією та стабільністю систем РСМ, та проблеми, пов'язані з інтеграцією інтелектуальних компонентів в екстремальних теплових умовах. Крім того, залежність від лабораторних випробувань продовжує обмежувати надійність оцінки продуктивності, оскільки такі умови не повністю відтворюють реальні операційні середовища.

Тому майбутні дослідження повинні пріоритетувати розробку адаптивних та інтелектуальних захисних систем з підвищеною довговічністю та екологічною безпекою. Особливий акцент слід зробити на повномасштабній експериментальній валідації, дослідженнях довгострокового старіння та впровадженні передових підходів до моделювання, здатних фіксувати пов'язані процеси тепло- та масопередачі в реальних умовах впливу.

Загалом, очікується, що розвиток вогнезахисного текстилю буде зумовлений міждисциплінарною інтеграцією, поєднанням матеріалознавства, текстильної інженерії та системної інженерії для досягнення захисних рішень наступного покоління, придатних для дедалі складніших та небезпечних операційних сценаріїв.

ЛІТЕРАТУРА

1. Костенко Т.В. Особливості травматизму особового складу рятувальних підрозділів ДСНС України в умовах воєнного стану / Т.В. Костенко // *Актуальні питання охорони праці, цивільної та техногенної безпеки*. № 1(1), 2025. [https://doi.org/10.36910/3083-6255/1\(1\).2025](https://doi.org/10.36910/3083-6255/1(1).2025).
2. Effects of ageing on the fire behavior of flame retarded polymers: A review. Henri Vahabi, Rodolphe Sonnier, Laurent Ferry // *Polymer International* / Volume 64(3), November 2014. DOI: 10.1002/pi.4841.
3. Фізико-хімічний механізм гасіння і попередження пожеж засобами на основі високопористих носіїв / Єлагін Г. І., Кришталь Д.О., Тищенко Є.О. та інш. // *TECHNICAL SCIENCES «Colloquium-journal»* № 11(204), 2024. С. 36-39. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/21994/1/Colloquium-journal-2024-204-1%20%281%29.pdf>.
4. Flame retardancy evolution behavior and molecular mechanism of polyvinyl chloride under the action of damp heat aging / Ke Xu, Chenyu Gao, Xin Liu et al. // *Polymers* // Volume 17. Issue 6. DOI: 10.3390/polym17060794.
5. Characterization and Modeling of Thermal Protective and Thermo-Physiological Comfort Performance of Polymeric Textile Materials-A Review / Sumit Mandal, Nur-Us-Shafa Mazumder, Robert J. Agnew et al. // *Materials*

(Basel). 2021 May 5;14(9):2397. DOI: 10.3390/ma14092397.

6. Aerogel incorporated flexible nonwoven fabric for thermal protective clothing / Abu Shaid, M.A. Rahman Bhuiyan, Lijing Wang // *Fire Safety Journal*. Volume 125, October 2021. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103444>.

7. Emerging applications of aerogels in textiles / Steven J. McNeil, Honey Gupta // *Polymer Testing* // Volume 106, February 2022, 107426. URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107426>.

8. An overview of phase change materials, their production, and applications in textiles / Anik Das, Md.Mehedi Hasan Apu, Asma Akter et al. // *Results in Engineering* // Volume 25(8):103603, December 2024. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.103603.

9. A review on volatilization of flame retarding compounds from polymeric textile materials used in firefighter protective garment / Obikwelu Raphael Okonkwo, Vincent Mokoana, Joseph K. O. Asante // *Journal of Fire Sciences* // Volume 41(8):073490412311713, May 2023. DOI: 10.1177/07349041231171349.

10. Thermal Protective Performance of Firefighters' Clothing Under Low-Intensity Radiation Heat Exposure / Hualing He, Zhicai Yu, Chunbo Zhang, Minhua Li // *Autex Research Journal* // Volume 21(3), May 2020. DOI: 10.2478/aut-2020-0018.

11. Flammability and Thermoregulation Performance of Multilayer Protective Clothing Incorporated with Phase Change Materials / Muhammad Shoaib, Hafsa Jamshaid, Rajesh Mishra et al. // *Materials* // Volume 17(23):5826, November 2024. DOI: 10.3390/ma17235826.

ПРОБЛЕМИ ОНОВЛЕННЯ ЖИТЛОВОЇ ЗАБУДОВИ ДЛЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА

Марина Кравчук¹, Тетяна Кривомаз¹

¹*Київський національний університет будівництва і архітектури,
zaxra@ukr.net, kryvomaz.ti@knuba.edu.ua*

Актуальність оновлення житлової забудови зростає в усьому світі на фоні екологічних, соціальних та економічних викликів сталого розвитку міст. Зокрема, дослідження Інституту екологічних змін Оксфордського університету прогнозує необхідність знесення близько трьох мільйонів будівель до 2050 року для досягнення цілей скорочення енергоспоживання, проте такі підходи потребують комплексного врахування повного життєвого циклу будівель, включаючи втілені вуглецеві витрати, використання ресурсів та вплив на міське середовище [3].

В умовах триваючої війни житловий фонд України зазнає значних руйнувань і деградації, що суттєво загострює проблеми функціонування міського середовища та посилює потребу у комплексному оновленні

житлової забудови. Водночас проблема модернізації застарілого житлового фонду існувала ще до початку повномасштабного вторгнення, оскільки значна частина житлових будинків, зведених у період масового індустріального будівництва, характеризується низькою енергоефективністю та невідповідністю сучасним вимогам безпеки, комфорту й екологічної стійкості. У зв'язку з цим в Україні було прийнято низку законодавчих і нормативних актів, спрямованих на стимулювання реконструкції, реновації та комплексного оновлення житлових територій. Однак практична реалізація таких програм супроводжується численними технічними, економічними, соціальними та екологічними викликами. Дослідження реконструкції застарілого житлового фонду свідчать, що для українських міст проблема оновлення житлової забудови ускладнюється високим рівнем фізичного зносу будівель (50–70%), значною часткою приватизованого житла (до 92%) та обмеженими фінансовими можливостями населення, що ускладнює реалізацію комплексних програм реновації [2].

Сучасні дослідження демонструють, що знесення будівель супроводжується значними екологічними, соціально-економічними та культурними наслідками, тоді як збереження та модернізація існуючої забудови можуть мати більш позитивний вплив на довкілля порівняно з повним демонтажем і новим будівництвом [1]. Аналіз міжнародного досвіду демонструє, що для п'ятиповерхових панельних будинків першого періоду масового житлового будівництва найбільш ефективним підходом є реновація, яка повинна поєднувати модернізацію житлового середовища, підвищення енергоефективності та дотримання майнових прав мешканців [2]. У науковій літературі наголошується на необхідності комплексного оцінювання рішень щодо знесення або збереження будівель на рівні міської політики, планування та управління нерухомістю, що визначає актуальність досліджень оновлення житлової забудови для сталого розвитку міст [1].

Порівняльний аналіз економічної ефективності житлової забудови різної поверховості свідчить, що утримання п'ятиповерхових хрущовок є менш рентабельним порівняно із сучасними багатоповерховими житловими комплексами. Значна частина таких будинків проєктувалася як тимчасове житло з обмеженим строком експлуатації, тому подальше продовження їх життєвого циклу потребує непропорційно великих витрат на ремонти та модернізацію інженерних систем. Для двох будинків з однаковою площею земельної ділянки різниця між п'ятиповерховою та шістнадцятиповерховою забудовою формує додаткові щомісячні надходження на рівні близько 155 тис. грн навіть без урахування витрат на електроенергію та обслуговування ліфтового обладнання. За умови однакової площі прибудинкової території та підвальних приміщень низькоповерхова забудова демонструє нижчу економічну ефективність використання земельних ресурсів і комунальної інфраструктури. У довгостроковій перспективі знесення хрущовок є

об'єктивно необхідним процесом, зумовленим фізичним та моральним зношенням житлового фонду, низькою енергоефективністю будівель, високими витратами на їх утримання та невідповідністю сучасним вимогам безпеки, комфорту й сталого розвитку міського середовища.

Процес знесення п'ятиповерхової хрущовки на п'ять під'їздів загальною площею приблизно 3,5–4,5 тис. м² є складним інженерно-технологічним проєктом, який включає не лише демонтаж надземних конструкцій, але й розбирання фундаменту, сортування будівельних відходів та організацію їх подальшого вивезення і переробки. Орієнтовна вартість таких робіт у 2026 році становить від 10 до 20 млн грн і може зростати залежно від типу конструкцій, щільності забудови та логістичних умов виконання робіт. Для попередніх розрахунків вартість демонтажу зазвичай визначають у перерахунку на площу будівлі. Середня ціна демонтажу «під ключ» разом із вивезенням сміття становить близько 2,5–4,5 тис. грн за 1 м². При цьому демонтаж цегляних будинків є дорожчим порівняно з панельними через більшу трудомісткість розбирання конструкцій. Найбільшу частку витрат формує саме вивезення та переробка будівельних відходів, що може становити до 40–50 % загальної вартості демонтажних робіт.

Аналіз практики демонтажу свідчить, що на тривалість виконання робіт суттєво впливають логістичні, природно-кліматичні та містобудівні фактори. У щільно забудованих кварталах складний доступ будівельної техніки до внутрішньодворових територій може істотно уповільнювати темпи робіт та збільшувати витрати на організацію будівельного процесу. Несприятливі погодні умови, зокрема інтенсивні опади, ускладнюють роботу важкої техніки та підвищують ризики пошкодження ґрунтів і тимчасових під'їзних шляхів. Додаткові обмеження виникають у разі близького розташування сусідніх будинків, оскільки це потребує зменшення швидкості демонтажу та застосування додаткових заходів для мінімізації вібрацій, шуму та пилового навантаження.

Активна фаза знесення хрущовок зазвичай триває від трьох до п'яти тижнів і характеризується найбільш інтенсивним техногенним навантаженням на навколишнє середовище та міську інфраструктуру. Основний обсяг робіт виконується із застосуванням спеціалізованої будівельної техніки, зокрема екскаваторів-руйнівників, які здійснюють механізоване обвалення конструкцій безпосередньо на майданчику. Для багатопід'їзної будівлі середньої поверховості тривалість таких робіт може становити близько 15–20 робочих змін залежно від технічного стану конструкцій, щільності забудови та організації будівельного процесу. На цьому етапі особливого значення набуває контроль рівня шуму, пилового забруднення та вібрацій, оскільки їх перевищення може негативно впливати на стан прилеглих будівель і комфорт мешканців навколишніх територій. Паралельно зі знесенням доцільно здійснювати первинне сортування

будівельних відходів безпосередньо на майданчику. Відокремлення металевих елементів та арматури сприяє підвищенню ефективності переробки матеріалів і зменшенню обсягів відходів, що підлягають захороненню. Такий підхід відповідає принципам циркулярної економіки та дозволяє скоротити потребу у використанні первинної сировини в подальшому будівництві.

Етап переробки відходів та подрібнення конструкцій триває орієнтовно від чотирьох до шести тижнів. Значну роль у сучасних практиках демонтажу відіграє використання мобільних дробильних установок, які забезпечують переробку бетонних конструкцій у вторинний щебінь безпосередньо на будівельному майданчику. Для переробки значних обсягів будівельного матеріалу мобільна дробарка потребує близько одного місяця стабільної роботи. Використання вторинного щебеню дозволяє знизити екологічне навантаження, пов'язане з видобутком природних нерудних матеріалів, а також скоротити транспортні витрати та обсяги будівельного сміття. Одночасно здійснюється вивезення матеріалів, що не підлягають повторному використанню або переробці, зокрема ізоляційних матеріалів, деревини та змішаних відходів.

Фінальний етап знесення, який триває приблизно два–три тижні, передбачає демонтаж фундаментних конструкцій, подрібнення бетонних блоків та підготовку території до подальшого використання. У разі передбачення проєктом виконується засипка котловану та попереднє планування ділянки. Саме на цьому етапі формується остаточний стан території та оцінюється готовність майданчика до нового будівництва або рекультивації. Для мінімізації негативного впливу на мешканців та інфраструктуру міст важливо забезпечити поетапність знесення із концентрацією робіт на обмеженій кількості об'єктів одночасно. Надмірна інтенсивність демонтажних процесів у межах одного кварталу може спричинити локальне перевантаження транспортної системи та різке зростання сукупного навантаження на навколишнє середовище, включаючи пилове забруднення, шум, транспортне перевантаження та накопичення відходів. Для забезпечення належної якості життя мешканців та зменшення впливу на довкілля доцільним є поетапне знесення житлових будинків із концентрацією робіт у межах обмеженої кількості об'єктів одночасно. Оптимальною вважається організація демонтажу не більше одного–двох будинків на одній ділянці вулиці.

На місці знесеної хрущовки площею близько 4 тис. м² зазвичай можливо реалізувати будівництво сучасного шістнадцятиповерхового житлового будинку загальною площею 12–18 тис. м². Собівартість будівництва житла класу «комфорт» у місті Києві станом на 2025–2026 роки в середньому становить 600–850 \$ за 1 м² загальної площі. Відповідно, будівництво житлового комплексу площею близько 15 тис. м² потребує мінімального бюджету на рівні приблизно 9 млн \$, тоді як середній бюджет

проєкту може становити 12–13,5 млн \$. У зазначену суму зазвичай включаються витрати на монолітний каркас, зовнішні та внутрішні стіни, фасадні системи, скління, інженерні мережі та оздоблення місць загального користування.

Водночас реновація території застарілої забудови супроводжується значними додатковими витратами, які можуть збільшувати загальний бюджет проєкту ще на 20–30 %. До таких витрат належать проєктування та оформлення дозвільної документації, вартість яких може становити близько 15–25 \$ за 1 м², а також підключення нової будівлі до інженерних мереж. Сучасний шістнадцятиповерховий будинок потребує у 4–5 разів більшої потужності електропостачання та водозабезпечення порівняно зі старою хрущовкою, що може збільшувати витрати на інженерну інфраструктуру до 0,5–1,5 млн \$ на один об'єкт. Додатково необхідно враховувати витрати на благоустрій території, облаштування дитячих майданчиків, гостьових або підземних паркінгів відповідно до сучасних містобудівних нормативів.

Однією з ключових проблем є соціальний опір мешканців, пов'язаний із недовірою до механізмів переселення та ризиком втрати звичного життєвого середовища. Подолання цієї проблеми потребує законодавчого закріплення прозорих гарантій відселення, надання рівноцінного або покращеного житла, а також створення механізмів участі мешканців у процесах планування реновації кварталів. У більшості випадків переселення здійснюється із наданням житла у новому будинку із підвищувальним коефіцієнтом площі, який зазвичай становить 1,2–1,5 від площі попереднього житла. Для хрущовки загальною площею близько 4 тис. м² це означає необхідність безоплатної передачі мешканцям приблизно 5–6 тис. м² житлової площі у новому будинку. Фактично це зменшує потенційний прибуток девелоперського проєкту на 30–40 %. За таких умов один новозбудований багатоповерховий будинок може забезпечити переселення мешканців орієнтовно трьох п'ятипід'їзних хрущовок, що визначає необхідність комплексного квартального підходу до реновації житлового фонду. Важливим напрямом є впровадження поетапного переселення в межах одного району, що дозволяє мінімізувати соціальну дезінтеграцію громади та зберегти доступність соціальної інфраструктури. Для забезпечення економічної доцільності реновації необхідно впроваджувати моделі державно-приватного партнерства, залучати міжнародні фінансові організації та створювати спеціальні державні програми підтримки комплексного оновлення житлового фонду. Ефективним інструментом може стати використання механізмів зеленого фінансування, які дозволяють підвищити інвестиційну привабливість проєктів та інтегрувати критерії енергоефективності, екологічної безпеки й соціальної відповідальності у процес реновації.

Серед ключових проблем відновлення житлового фонду слід відзначити значну вартість демонтажу та нового будівництва, складність

відселення мешканців, недосконалість механізмів фінансування, високий рівень приватизації житла, а також ризики негативного впливу на довкілля та міську інфраструктуру. Це не лише процес фізичного оновлення житла, але водночас масштабна трансформація міського середовища, яка потребує збалансованого поєднання економічної ефективності, соціальної справедливості та екологічної безпеки. Лише комплексний підхід, заснований на принципах сталого розвитку та довгострокового містобудівного планування, здатний забезпечити успішну реалізацію програм реновації та формування якісно нового побудованого середовища в українських містах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Huuhka, S. (2023). Understanding demolition. *Buildings & Cities*, 4(1), 927–937. <https://doi.org/10.5334/bc.398>
2. Pleshkanovska, A., & Biriuk, S. (2021). «Outdated housing stock» as an object of complex reconstruction programs and projects: challenges for Ukraine. *Journal of Urban & Regional Analysis*, 13(2), 257–280. <https://doi.org/10.37043/JURA.2021.13.2.4>
3. Power, A. (2008). Does demolition or refurbishment of old and inefficient homes help to increase our environmental, social and economic viability? *Energy policy*, 36(12), 4487–4501. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.022>

ВИКОРИСТАННЯ ДОЩОВОЇ ВОДИ В БУДІВЛЯХ: ЕКОЛОГІЧНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ ПЕРЕВАГИ

Софія Попеску¹, Таміла Сахно¹, Леся Василенко¹

¹Київський національний університет будівництва і архітектури
ropesku_ss-2023@knuba.edu.ua, sakhno_tv-2023@knuba.edu.ua

У сучасних умовах зростаючого навантаження на водні ресурси та системи централізованого водопостачання важливого значення набуває впровадження альтернативних джерел води. Одним із таких рішень є використання дощової води в будівлях шляхом її збору, накопичення та подальшого застосування для різних господарсько-побутових потреб. Такі системи дозволяють підвищити ефективність використання водних ресурсів і зменшити залежність від традиційних джерел водопостачання.

Актуальність дослідження зумовлена зростанням дефіциту прісної води, урбанізацією та необхідністю впровадження принципів сталого розвитку у будівництві. Використання дощової води сприяє зменшенню навантаження на міські інженерні мережі, зниженню ризику підтоплень і забруднення поверхневих вод, а також дозволяє скоротити витрати на водопостачання. У зв'язку з цим впровадження таких систем є перспективним напрямом розвитку сучасного міського середовища.

Метою дослідження є аналіз особливостей використання дощової води в будівлях та обґрунтування її екологічних і економічних переваг.

Збір дощової води — це альтернативний підхід до водопостачання, який передбачає збирання, відведення та зберігання дощової води для подальшого використання та є доступною технологією для широкого впровадження. Зібрана дощова вода може використовуватися як джерело питної води за умови відповідного очищення, а також для забезпечення водою диких тварин, домашніх улюбленців і худоби.

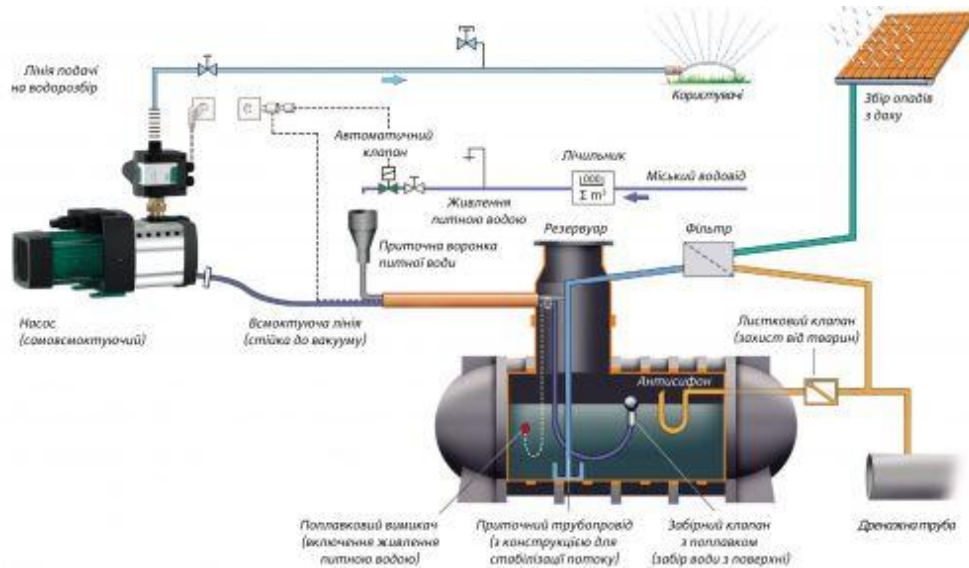


Рис.1. Схема збору дощової води

Крім того, її застосовують для озеленення, оскільки вона не містить солей та інших шкідливих мінералів, і для більшості непитних потреб не потребує обробки хімічними речовинами, що можуть мати залишковий вплив. Збір дощової води також допомагає запобігати підтопленням і ерозії, перетворюючи проблеми зі зливовими водами на ресурс водопостачання завдяки уповільненню стоку та просочуванню води в ґрунт, а також сприяє зменшенню забруднення поверхневих вод осадами, добривами та пестицидами, які змиваються під час дощів.

Такі системи можуть застосовуватися як у невеликих приватних господарствах, так і у великих об'єктах, зокрема парках, школах, комерційних територіях, автостоянках і житлових комплексах, а також у будинках для змиву в туалетах і прання одягу або, за умови додаткової фільтрації та очищення, — для всіх побутових потреб. Незалежно від розміру чи ступеня забудови території, ці принципи можуть бути використані для ефективного планування системи збору дощової води.

Збирання дощової води є екологічно свідомим способом отримання додаткового водного ресурсу, який може використовуватися для поливу рослин, миття автомобілів і навіть для побутових потреб. Існує багато різноманітних систем збору дощової води, які можна адаптувати до різних

умов використання.

Найпростішим варіантом є класичні бочки, що встановлюються під водостічними трубами та збирають воду з даху; вони можуть бути виготовлені з пластику, металу або дерева. Для зберігання більших об'ємів води застосовують підземні резервуари, які не впливають на зовнішній вигляд території та зменшують втрати води через випаровування. Також поширеним рішенням є зелені дахи, які не лише покращують теплоізоляцію будівель, але й накопичують та частково фільтрують дощову воду для подальшого використання. Гнучкість у плануванні забезпечують модульні резервуари, які можна розташовувати в різних конфігураціях залежно від простору. Додатково застосовуються пермеабельні покриття, що дозволяють воді просочуватися в ґрунт і накопичуватися в підземних системах.

Важливу роль відіграють фільтрувальні системи, які очищують воду від сміття та забруднень перед її зберіганням. Окрім цього, дощову воду можуть використовувати декоративні елементи ландшафту, такі як ставки та водоспади, а також інтегровані резервуари, вбудовані у конструкції будівель. У міських умовах застосовуються компактні системи для балконів і терас, а також спеціальні контейнери для обмежених просторів. Існують також керамічні водяні башти, вертикальні сади, що створюють замкнутий цикл водокористування, та системи, які працюють за рахунок гравітації без використання електроенергії. Сучасні технології включають автоматизовані системи контролю рівня води та інноваційні гнучкі резервуари, які адаптуються до доступного простору.

У сукупності всі ці рішення дозволяють ефективно збирати та використовувати дощову воду, зменшуючи навантаження на природні ресурси та сприяючи сталому розвитку.

Екологічні переваги:

- ✓ зменшення споживання питної води та збереження природних водних ресурсів

- ✓ зниження навантаження на системи водопостачання та каналізації

- ✓ зменшення обсягів зливого стоку, що допомагає запобігати підтопленням і ерозії

- ✓ зниження рівня забруднення поверхневих вод (менше змиву добрив, пилу, забруднювачів)

- ✓ скорочення використання хімічних реагентів для очищення води

- ✓ підтримка принципів сталого розвитку та екологічного будівництва

Економічні переваги:

- ✓ зменшення витрат на водопостачання

- ✓ часткова або повна окупність системи в довгостроковій перспективі

- ✓ зниження навантаження на інженерні мережі будівлі

- ✓ підвищення енергоефективності (менше витрат на подачу та очищення води)

✓ збільшення ринкової вартості будівель завдяки впровадженню “зелених” технологій

Будівля Reichstag Building у Берліні є одним із найвідоміших прикладів інтеграції екологічних технологій у державну архітектуру. Під час реконструкції у 1990-х роках за проєктом Norman Foster було впроваджено комплекс рішень, спрямованих на підвищення енергоефективності та раціональне використання ресурсів, зокрема системи збору і використання дощової води.

Дощова вода з даху будівлі збирається через систему водостоків, проходить первинну фільтрацію та накопичується у спеціальних резервуарах. Надалі вона використовується для технічних потреб будівлі, таких як змив у санвузлах, прибирання та частково для обслуговування інженерних систем. Це дозволяє суттєво скоротити споживання питної води та зменшити навантаження на міську каналізаційну мережу.

Екологічний житловий комплекс BedZED (Beddington Zero Energy Development) у Лондоні є одним із перших масштабних прикладів сталого житлового будівництва у Європі. Проєкт був реалізований на початку 2000-х років за участю організації BioRegional та архітектурного бюро ZEDfactory з метою створення енергоефективного та ресурсозберігаючого середовища для проживання.

У BedZED впроваджено комплексну систему управління водними ресурсами, важливою складовою якої є збір і використання дощової води. Опади з дахів будівель збираються, проходять очищення та накопичуються, після чого використовуються для технічних потреб, зокрема для змиву в санвузлах і поливу зелених насаджень. Це дозволяє суттєво зменшити споживання питної води мешканцями комплексу.

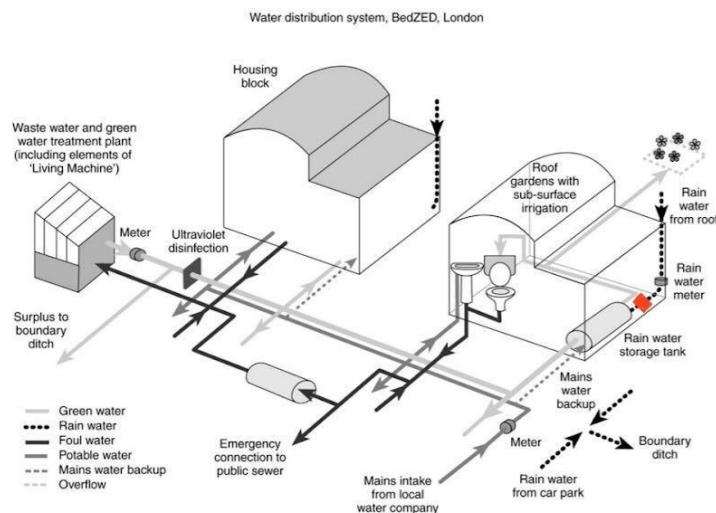


Рис.2. Система збору дощової води в BedZED

Крім того, у проєкті застосовано систему повторного використання “сірої” води, що разом із дощовою водою формує замкнений цикл водокористування. Завдяки цьому загальне водоспоживання в BedZED

значно нижче, ніж у традиційних житлових комплексах. Також використання локальних очисних споруд сприяє зменшенню навантаження на міські каналізаційні мережі та зниженню рівня забруднення довкілля.

Висновок. Наведені приклади демонструють ефективність впровадження систем збору дощової води у сучасному будівництві та підтверджують доцільність їх використання в міському середовищі. Отже, використання дощової води в будівлях є ефективним напрямом раціонального водокористування, що поєднує екологічні та економічні переваги. Впровадження систем збору й повторного використання опадів дозволяє зменшити споживання питної води, знизити навантаження на інженерні мережі та мінімізувати негативний вплив на довкілля. Світовий досвід, зокрема реалізація подібних рішень у сучасних екологічних будівлях і комплексах, підтверджує їхню ефективність та доцільність.

В Україні такі технології лише набирають поширення, проте мають значний потенціал для впровадження як у новому будівництві, так і при модернізації існуючих об'єктів. Таким чином, розвиток систем збору дощової води є перспективним напрямом формування сталого міського середовища та підвищення ефективності використання природних ресурсів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Зозуля С. В. Принципи реалізації технології замкнутого циклу використання води на території приватної власності // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. 2022. № 46. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2022-46-02>
2. Петлін І. В. Економічні та екологічні аспекти використання води в закладах індустрії гостинності // Herald of Lviv University of Trade and Economics. Economic Sciences. 2025. № 83. С. 123–130 (уточни сторінки!)
3. Глущенко Р., Ткаченко Т. Збереження, якість та використання дощової води після «зеленої» покрівлі // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2023. Вип. 42. С. 4–12. DOI: 10.32347/2524-0021.2023.42.4-12
4. Kravchenko M., Tkachenko T. Calculation of the ecological and economic effect of collecting rainwater with «green» roofs // Екологічна безпека та природокористування. 2024. Вип. 1 (49). С. 39–44. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.1.34-48>

БЕЗПЕКА ПРАЦІ В УМОВАХ ЗЕЛЕНОГО БУДІВНИЦТВА

Роман Кацан¹

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
romakatsan4107@gmail.com,*

Зелене будівництво є стратегічним орієнтиром розвитку сучасної

будівельної галузі, оскільки поєднує ефективне використання ресурсів, дбайливе ставлення до довкілля та орієнтацію на потреби людини у формуванні життєвого простору. Його основні принципи передбачають раціональне використання природних ресурсів, зниження негативного впливу на навколишнє середовище та забезпечення комфортних і безпечних умов для життя і діяльності.

Водночас розширення впровадження екологічних стандартів у будівельну практику зумовлює необхідність оновлення підходів до організації системи охорони праці. Активне впровадження інноваційних технологічних рішень, застосування нових матеріалів і трансформація організаційно-виробничих процесів у межах зеленого будівництва супроводжуються появою нехарактерних виробничих небезпек. За таких умов особливої ваги набуває комплексне дослідження питань охорони праці, спрямоване на ідентифікацію, оцінювання та мінімізацію професійних ризиків у цій динамічній сфері.

Умови праці в галузі зеленого будівництва вирізняються низкою специфічних рис, що зумовлені характером застосовуваних матеріалів, технологій і технічних засобів. Використання екологічно безпечних матеріалів, упровадження енергоощадних рішень і залучення сучасного обладнання формують нове виробниче середовище, яке потребує відповідної адаптації підходів до безпеки праці.

На працівників у таких умовах впливає комплекс різноспрямованих чинників. Зокрема, хімічні фактори пов'язані з дією компонентів новітніх матеріалів; фізичні – проявляються через рівень шуму, вібрації та температурні коливання; біологічні – обумовлені можливим розвитком плісняви й мікроорганізмів у вологому середовищі; психофізіологічні – виникають унаслідок підвищеної напруженості праці та відповідальності під час виконання складних виробничих операцій.

Водночас інтеграція інноваційних технологій, зокрема систем «розумного будинку», сонячних панелей і установок рекуперації повітря, висуває додаткові вимоги до кваліфікації персоналу. Це зумовлює необхідність спеціальної підготовки працівників і неухильного дотримання посилених заходів безпеки в процесі їх експлуатації.

Зелене будівництво, маючи значні екологічні переваги, супроводжується виникненням специфічних виробничих ризиків, зумовлених застосуванням нових матеріалів, технологій та інженерних систем [1].

У практиці оцінювання професійних ризиків (OHSRA) є послідовне виявлення небезпечних чинників, аналіз причинно-наслідкових зв'язків їх виникнення та подальша організація трудового процесу за рівнем ризику для ефективного управління ними [2]. Такий підхід дозволяє розглядати системний вплив виробничих небезпечних факторів, а не поокремі чинники впливу.

Основні виробничі ризики зеленого будівництва представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Небезпечний фактор	Можливі наслідки	Заходи безпеки
Хімічні речовини	Отруєння, алергічні реакції	Використання ЗІЗ, вентиляція
Пил	Захворювання дихальних шляхів	Респіратори, зволоження повітря
Робота на висоті	Падіння, травматизм	Страхувальні системи, інструктаж
Електричні установки	Ураження електричним струмом	Ізоляція, перевірка обладнання, інструктаж
Пожежна безпека	Пожежі, вибухи	Контроль матеріалів, пожежна безпека
Машини та механізми (крани, підйомники)	Травмування різного ступеня тяжкості	Інструктаж, огороження, техогляд, навчання персоналу

Система забезпечення безпеки праці в умовах зеленого будівництва формується на основі сучасних підходів до управління професійними ризиками та інтегрує екологічні, технологічні й організаційні аспекти виробничої діяльності. Відповідно до міжнародних стандартів, зокрема ДСТУ ISO 45001:2019, ефективна система охорони праці повинна базуватися на принципах ризик-орієнтованого управління [3].



Рис.1 Система забезпечення безпеки праці в зеленому будівництві

Організація безпеки праці в умовах зеленого будівництва характеризується низкою переваг, що зумовлені впровадженням енергоефективних рішень, інноваційних технологій і використанням матеріалів, притаманних цьому напряму будівельної діяльності [1; 4]. Водночас актуальним залишається питання адаптації чинних систем охорони праці до особливостей сучасного технологічного процесу в будівництві.

Для мінімізації виробничих ризиків необхідно впроваджувати комплексну систему заходів, що поєднує технічні, організаційні та індивідуальні складові охорони праці відповідно до ДСТУ ISO 45001:2019 [3].



Рис.2. Система забезпечення безпеки праці в зеленому будівництві

Технічні заходи спрямовані на створення максимально безпечного виробничого середовища. Вони передбачають широке застосування сучасного сертифікованого обладнання з високим рівнем автоматизації, надійних систем вентиляції та локального видалення шкідливих речовин, автоматизоване пиловидалення, зволоження повітря та постійний моніторинг параметрів мікроклімату в реальному часі. Особлива увага приділяється забезпеченню електробезпеки під час монтажу сонячних панелей, систем «розумного будинку» та іншого енергоефективного обладнання, а також використанню матеріалів зі зниженою пожежною небезпекою [4].

Організаційні заходи формують фундамент ефективного управління безпекою. Вони включають регулярне оновлення інструкцій з охорони праці з урахуванням специфіки зелених технологій і матеріалів, проведення всіх видів інструктажів, систематичне навчання та підвищення кваліфікації працівників. Важливу роль відіграє оптимізація технологічних процесів, раціональне планування робіт та постійний контроль за дотриманням вимог охорони праці. Значною складовою є активне формування культури безпеки через семінари, тренінги та залучення працівників до виявлення ризиків [2; 5].

Індивідуальні заходи безпосередньо забезпечують захист здоров'я кожного працівника. Вони охоплюють забезпечення сучасними засобами індивідуального захисту, адаптованими до умов зеленого будівництва, проведення обов'язкових медичних оглядів, навчання правильному

використанню засобів захисту та безпечним методам роботи, а також залучення працівників до оцінки ризиків на їхніх робочих місцях [1].

Комплексне застосування технічних, організаційних та індивідуальних заходів дозволяє не тільки суттєво знизити рівень професійних ризиків, але й створити комфортні умови праці, які повністю відповідають філософії зеленого будівництва – збереженню здоров'я людини та дбайливому ставленню до довкілля [4].

Ефективне управління ризиками є фундаментальною складовою системи охорони праці та забезпечення безпеки на робочих місцях. Відповідно до сучасних підходів, цей процес має системний і безперервний характер та включає взаємопов'язані етапи, спрямовані на зниження ймовірності виникнення нещасних випадків і професійних захворювань [3].

Першим етапом управління ризиками є ідентифікація небезпек, яка передбачає виявлення потенційних джерел шкоди для життя та здоров'я працівників. Цей процес охоплює детальний аналіз виробничих процесів, застосовуваних технологій, обладнання, умов праці, а також врахування людського фактора. Результати ідентифікації стають основою для подальшої оцінки ризиків і визначення пріоритетності заходів безпеки [2].

Сучасні дослідження у сфері охорони праці підкреслюють, що ефективність ідентифікації небезпек значною мірою залежить від застосування ризик-орієнтованого підходу. Такий підхід дозволяє адаптувати систему безпеки до умов цифровізації та активного впровадження інноваційних технологій у будівництві, сприяє своєчасному виявленню нових типів ризиків і підвищує якість управлінських рішень [1].

Наступним етапом є оцінка ризиків, яка полягає у визначенні ймовірності виникнення небезпечних подій та тяжкості їх можливих наслідків. Проведення якісної оцінки дає змогу встановити рівень ризику, пріоритизувати загрози та обґрунтовано розподілити ресурси для їхньої мінімізації. Сучасні методи оцінки професійних ризиків, що поєднують якісні, кількісні та комбіновані підходи, дозволяють враховувати частоту виникнення небезпек, ймовірність їх реалізації та серйозність наслідків. Застосування цих методів повністю відповідає принципам ризик-орієнтованого управління, закріпленим у міжнародних і національних стандартах охорони праці [3].

Після оцінки ризиків здійснюється впровадження заходів контролю. Цей етап передбачає розроблення та реалізацію технічних, організаційних та індивідуальних рішень, спрямованих на усунення або суттєве зниження рівня ризиків. Ефективність цих заходів значно зростає, коли вони інтегруються в єдину систему управління охороною праці підприємства [2].

Завершальним і водночас постійно діючим етапом є моніторинг і контроль ризиків. Він забезпечує оцінювання ефективності впроваджених заходів, своєчасне виявлення нових небезпек та адаптацію системи безпеки до змін умов праці. Регулярний аналіз виробничого середовища, проведення

аудитів і оновлення процедур управління ризиками дозволяють підтримувати високу ефективність системи охорони праці в динамічних умовах зеленого будівництва [1].

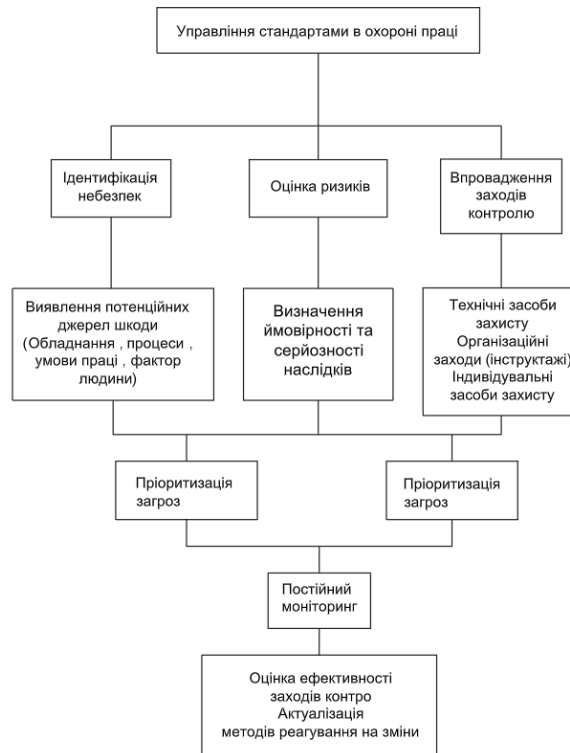


Рис.3. Схема управління ризиками в охороні праці

Зелене будівництво, як провідний напрям сучасного розвитку будівельної галузі, відкриває нові можливості для створення екологічно безпечного та комфортного життєвого середовища. Водночас перехід до зелених технологій і матеріалів супроводжується виникненням специфічних виробничих ризиків, що вимагає суттєвого оновлення підходів до організації охорони праці.

У результаті проведеного дослідження встановлено, що умови праці в зеленому будівництві характеризуються комплексним впливом хімічних, фізичних, біологічних та психофізіологічних факторів. Ефективне забезпечення безпеки працівників можливе лише за умови впровадження ризик-орієнтованого управління відповідно до вимог ДСТУ ISO 45001:2019. Комплексний підхід до управління професійними ризиками, що включає системну ідентифікацію небезпек, їхню оцінку, впровадження заходів контролю та постійний моніторинг, дозволяє суттєво знизити рівень виробничого травматизму та професійної захворюваності. Особливого значення набуває інтеграція технічних, організаційних та індивідуальних заходів охорони праці з урахуванням специфіки інноваційних технологій і матеріалів, що використовуються в зеленому будівництві.

Перспективними напрямками подальших досліджень є розроблення

галузових методик оцінки професійних ризиків саме для об'єктів зеленого будівництва, удосконалення нормативної бази, а також створення спеціалізованих програм навчання й підвищення кваліфікації працівників з урахуванням нових викликів.

Таким чином, забезпечення безпеки праці в умовах зеленого будівництва є не лише обов'язковою вимогою, а й важливим елементом реалізації концепції сталого розвитку, що поєднує турботу про здоров'я людини, збереження довкілля та підвищення ефективності будівельної галузі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Adesoji T., Pearce A., Kleiner B., McGinnis S. Occupational health and safety in green construction // Journal of Cleaner Production. 2025. In press. URL: <https://surl.lt/ivysgo> (дата звернення: 10.05.2026).
2. Ковальчук О. Ю. Охорона праці в будівництві: навч. посіб. Київ: Кондор, 2020. 280 с.
3. ДСТУ ISO 45001:2019. Системи управління охороною праці. Вимоги та настанови щодо застосування. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 48 с.
4. Kibert C. J. Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery. 2nd ed. Hoboken: Wiley, 2016. 544 p.
5. Kibert C. J. Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery. 5th ed. Hoboken: Wiley, 2022. 656 p. URL: <https://surl.li/vxxops> (date of access: 10.05.2026).

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ, ВЕНТИЛЯЦІЇ ТА КОНДИЦІОНУВАННЯ

Денис Буличов¹, Михайло Кириченко², Наталія Чепурна²

¹Технічний директор ТОВ «Вент-Сервіс», dbylichov@gmail.com

²Київський національний університет будівництва та архітектури, kyrychenko.ma@knuba.edu.ua, chepurna.nv@knuba.edu.ua

"Найдешевша енергія - та, яка не була витрачена"

Системи опалення, вентиляції та кондиціонування (ОВ) входять до числа найбільш енергоємних інженерних систем будівель. За різними оцінками, на їх частку припадає від 30 до 50% від загального споживання електроенергії в комерційних та адміністративних об'єктах. При цьому значна частина цієї енергії витрачається не на забезпечення комфорту або технологічного процесу, а через не оптимально підібране обладнання, відсутність злагодженого управління та застарілі технічні рішення.

Одна з найпоширеніших помилок при проектуванні - підбір вентиляційного агрегату «в точку» або навіть із заниженим запасом. На

практиці це призводить до роботи обладнання з підвищеним аеродинамічним опором, що прямо транслюється у зростання споживаної потужності.

Швидкість повітря в перерізі фільтра або теплообмінника визначає падіння тиску на них. Залежність нелінійна: при збільшенні швидкості вдвічі опір зростає приблизно вчетверо (закон квадратичного опору). Агрегат більшого типорозміру при тій самій витраті повітря забезпечує меншу фронтальну швидкість - і, відповідно, суттєво нижчий опір.

Практичний ефект:

- Зниження статичного тиску на фільтрах на 30-60% при збільшенні типорозміру на один крок.

- Зменшення частоти та глибини забруднення фільтрів (нижча швидкість менше вибивання пилу з осередку).

- Більший ресурс підшипників та двигунів завдяки зниженню навантаження на вентилятор.

- Зниження рівня шуму - критично для офісних і медичних об'єктів.

Інтелектуальна автоматизація - енергія за «потребою». Правильно налаштована система автоматизації є одним із найбільш рентабельних заходів підвищення енергоефективності. Ключовий принцип: система не повинна працювати на розрахункову потужність увесь час — вона має відповідати поточному запиту.

Регулювання за CO₂ та якістю повітря (DCV - Demand Controlled Ventilation). Традиційний підхід - розрахунок витрати повітря на максимальну кількість людей у приміщенні. Реально приміщення заповнені на 100% лише кілька відсотків робочого часу. Системи DCV вимірюють концентрацію CO₂ та автоматично знижують витрату при відсутності людей.

- Потенціал економії: 20-40% річного споживання вентиляційної установки.

- Нормативна база: EN 15251, ASHRAE 62.1.

Регулювання за часом і календарем. Диференційовані графіки роботи: знижена потужність у нічні години, вихідні дні, святкові дати. Передпусковий прогін перед початком робочого дня дозволяє накопичити «буфер» якості повітря без роботи на повну потужність упродовж дня.

PID-регулювання та частотні перетворювачі. Плавне регулювання частоти обертання вентилятора через частотний перетворювач (ЧП) - обов'язковий елемент сучасної системи. Зниження обертів на 20% зменшує споживану потужність приблизно на 49% (закон подоби для вентиляторів: $P \sim n^3$).

Єдина система керування - усунення енергетичних конфліктів. Роздільне управління вентиляцією, кондиціонуванням і тепловим контуром будівлі - один із головних прихованих джерел надлишкового енергоспоживання. Без координації між системами виникають класичні

конфлікти.

Архітектура інтегрованого управління. Рішення - побудова єдиного диспетчерського рівня (BMS - Building Management System або SCADA), який отримує дані від усіх підсистем і ухвалює скоординовані рішення. Протоколи інтеграції: BACnet (стандарт де-факто для ОВ), Modbus, KNX.

За розрахунками ряду аудиторських компаній, усунення конфліктів між системами без заміни обладнання дає 10–25% економії залежно від якості вихідного стану автоматизації.

Рекуперація - вимога Екодизайну та інструмент економії. Директива ЄС 1253/2014 (Екодизайн для вентиляційних установок) встановлює мінімальну ефективність рекуперації тепла 73% для припливно-витяжних установок. Це не верхня межа - сучасні роторні та пластинчасті рекуператори досягають 85-95%.

Роторний рекуператор: $\eta = 80-85\%$. Передає не лише тепло, але й вологу (ентальпійний обмін). Оптимальний для клімату з вираженими зимами та сухим повітрям.

Пластинчастий перехресний: $\eta = 60-75\%$. Простий, без рухомих частин, не потребує обслуговування ротора. Підходить для приміщень із жорсткими вимогами до відсутності перетоків.

Проти точний пластинчастий: $\eta = 85-95\%$. Найвища ефективність серед пасивних рекуператорів.

При ефективності 80% і розрахунковому перепаді «вулиця - припливне» 30°C агрегат повертає 24°C з витяжного потоку, зменшуючи навантаження на нагрівач на 80%. Це безпосередньо транслюється в зниження витрат на теплову енергію.

Електронно-комутовані (ЕЦ) вентилятори. ЕЦ-вентилятори (EC-electronically commutated) замість традиційного асинхронного привода використовують без щіткові двигуни з постійними магнітами та вбудованою електронікою керування.

- ККД ЕЦ-мотора: 92–95% проти 60–75% у стандартного асинхронного.

- Вбудоване плавне регулювання 0–100% без зовнішнього ЧП — спрощення монтажу та підвищення надійності.

- Відсутність ременів та шківів у більшості виконань (direct-drive) — нульові витрати на обслуговування приводу.

- Стандартний інтерфейс 0–10 В або PWM дозволяє напряду інтегруватись у будь-яку АСУ.

- Клас енергоефективності ErP 2015/2021 — відповідність вимогам без до опрацювань.

Перехід з асинхронних на ЕЦ-вентилятори при реконструкції — один із найшвидших за окупністю заходів: 2–4 роки навіть без урахування зниження витрат на ТО.

Сучасні компресорні технології. Компресор — серце холодильного

контурі і, як правило, найбільший споживач електроенергії в системі кондиціонування. Вибір компресорної технології безпосередньо визначає як клас ефективності, так і поведінку системи на часткових навантаженнях.

Інверторні компресори (INVERTER / DC Inverter)

На відміну від традиційних ON/OFF-компресорів, інверторні агрегати плавно змінюють частоту обертання відповідно до теплового навантаження. Це дає декілька ключових переваг:

- COP (coefficient of performance) при частковому навантаженні вищий, ніж при повному - система найефективніша в режимі 40-70% потужності, де вона перебуває переважну частину року.
- Відсутність пікових пускових струмів - зниження навантаження на мережу та подовження ресурсу електрики.
- Підтримання точного температурного завдання $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ замість коливань $\pm 2-3^{\circ}\text{C}$ у ON/OFF-системах.

Відцентрові та гвинтові компресори для великих об'єктів. Для чилерів потужністю від 200 кВт все ширше застосовуються відцентрові компресори з магнітними підшипниками (Danfoss Turbocor, Carrier AquaEdge). Ключові характеристики:

- ККД компресора до 97% завдяки відсутності механічного тертя.
- Безмасляна конструкція - відсутність масляного сепаратора, спрощення обслуговування, підвищення надійності теплообміну в конденсаторі та випарнику.
- IPLV (Integrated Part Load Value) значно вищий за AHRI-стандартні значення – 10-12 на відміну від 5-7 у традиційних гвинтових компресорів.

Холодоагенти нового покоління. Перехід на низько-GWP холодоагенти (R-32, R-454B, R-290) не лише вирішує екологічні задачі (F-gas Regulation ЄС), а й підвищує ефективність циклу завдяки кращим термодинамічним властивостям. R-32, наприклад, забезпечує COP на 5–10% вищий порівняно з R-410A за однакових умов.

Так само, як і у вентиляції, перехід на ЕЦ-вентилятори у блоках кондиціонування дає системний ефект. При цьому важливо враховувати специфіку застосування як у внутрішніх, так і в зовнішніх блоках.

- Зниження споживання вентилятора внутрішнього блоку на 30–60% порівняно з традиційним конденсаторним мотором.
- Безшумна робота на низьких швидкостях — критично для спальних та переговорних приміщень.
- Можливість точного регулювання витрати повітря під фактичне теплове навантаження.

У зовнішніх блоках ЕЦ-вентилятори дозволяють реалізувати адаптивне регулювання тиску конденсації — ключовий параметр ефективності холодильного циклу.

- При зниженні температури зовнішнього повітря (нічний час,

осінь/весна) система автоматично знижує оберти вентилятора конденсатора, підтримуючи оптимальний тиск конденсації замість мінімально допустимого.

- Це збільшує COP системи в перехідні сезони на 15-25%.
- У мультизональних системах VRF/VRV - погоджене регулювання кількох вентиляторів конденсаторної секції залежно від сумарного холодильного навантаження.

ВИСНОВКИ

Енергоефективність систем ОВ — це не один захід, а багаторівнева задача, де кожен елемент посилює інші. Максимальний ефект досягається лише при комплексному підході:

- Правильно підібране обладнання (типорозміри агрегатів, ЕЦ-вентилятори, інверторні компресори) закладає фізичний фундамент ефективності.
- Коректна налаштована автоматизація гарантує, що ця ефективність реалізується щодня, а не лише на стенді виробника.
- Інтегрована система управління усуває конфлікти між підсистемами та дозволяє будівлі «думати» як єдиний організм.
- Рекуперація тепла і «free cooling» перетворюють «відходи» на ресурс, кардинально знижуючи навантаження на генерацію тепла/холоду.

Сукупний потенціал перерахованих заходів при реконструкції існуючих об'єктів – 35-60% скорочення витрат на енергоносії систем ОВ. Для нового будівництва ці показники є стандартом, що відповідає класу А або А+ за EPBD.

ЛІТЕРАТУРА

1. Babiak J., Olesen B. W., Petras D. Low temperature heating and high temperature cooling. REHVA Guidebook No. 7. Brussels: REHVA, 2009. 84 p.
2. ISO 7730:2005. Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using the PMV and PPD indices. Geneva: International Organization for Standardization, 2005.
3. Sourbron M., Helsén L. Evaluation of energy efficiency and comfort of thermally activated building systems (TABS). Energy and Buildings. 2011. Vol. 43, Issue 8. P. 1779-1785.
4. Волох, Ю., & Кириченко, М. (2025). Вплив системи автоматизації на ефективність поверхневого охолодження при створенні теплового комфорту. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, 54, 30–38. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.54.30-38>.
5. Погосов, О., Скочко, В., Солонніков, В., Кириченко, М. та Чепурна, Н. (2024). Огляд та концепція пасивного індивідуального житлового будівництва для помірно-континентального клімату. Архітектурні дослідження, 10(2), 14-24. <https://doi.org/10.56318/as/2.2024.14>.

6. Дорошенко , А., & Кириченко , М. (2024). ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНИХ НЕОДНОРІДНИХ ВКЛЮЧЕНЬ ЗОНИ ПРИМИКАННЯ ДО НЕСУЧОЇ ПЛИТИ ДЛЯ БУДІВЕЛЬ З МЕТАЛОКАРКАСУ. Матеріали конференцій МНЛ, (26 квітня 2024 р., м. Одеса), 288–291. Вилучено з <https://archive.liga.science/index.php/conference-proceedings/article/view/930>.
7. Шаповал, О., Чепурна, Н., & Кириченко, М. (2021). Аналіз ефективності роботи повітряного теплового насоса залежно від коливань температури зовнішнього повітря. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, 37, 24–30. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2021.37.24-30>.
8. Podenezhko, Y., Kirichenko, M., Cherpurna, N., & Cherpurnyi V. (2019). Дослідження опалювальних приладів на основі фазового переходу першого роду. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, (31), 63–70. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2019.31.63-70>.
9. Дорошенко , А., & Пасічник , П. (2025). Особливості застосування низькотемпературних променевих внутріньобудинкових систем опалення в розрізі їх експлуатації. Матеріали конференцій МЦНД, (02.05.2025; Івано-Франківськ, Україна), 398–402. вилучено із <https://archives.mcnd.org.ua/index.php/conference-proceeding/article/view/759>.
10. Погосов , О., Пасічник , П., & Кулінко , Є. (2023). ВПЛИВ ДЕЯКИХ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ НА КЛАС ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЛІ. Collection of Scientific Papers «SCIENTIA», (December 22, 2023; Coventry, UK), 214–217. Retrieved from <https://previous.scientia.report/index.php/archive/article/view/1526>.
11. Погосов, О., Кулінко, Є., Козячина, Б., & Кольчик, М. (2025). Аналіз та шляхи розвитку українського законодавства у сфері вимог до енергоефективності будівель. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, 55, 33–46.
12. Passive individual residential building overview and concept for a continental temperate climate / Oleksandr Pohosov, Volodymyr Skochko, Vladyslav Solonnikov, Mykhailo Kyrychenko, Nataliia Cherpurna // Architectural Studies. — Lviv: Lviv Politechnic Publishing House, 2024. — Vol 10. — No 2. — P. 14–24. DOI: 10.56318/as/2.2024.14
13. Пасічник, П. О., Габа, К. О., & Кириченко, М. А. (2021). Експериментальне визначення електротехнічних характеристик комбінованого сонячно-електричного повітрянагрівача. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, 36, 15–20. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2021.36.15-20>
14. Franchuk, Y., Konovaliuk, V., Kyrychenko, M., & Liubarets, O. (2024). Justification of measures to improve stability of gas distribution networks. In *23rd International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”*: proceedings: [Jelgava, Latvia], May 22-24, 2024 (Vol. 23, pp. 271-279).

15. Tkachenko, T., & Mileikovskiy, V. (2025). New Ukrainian Green Construction Standards. *Green Dimensions: Fundamental, Applied, and Industrial Aspects*, June 5– 7, 2025 [Electronic resource], Mykolaiv: PMBSNU, 2025, 100 p., 92.

16. Корбут, В., Ткаченко, Т., Мілейковський, В., Вахула, В., & Коновалюк, В. (2023). Оцінювання формування комфортних теплових умов і чистоти повітря зональними місцево-центральною системами кондиціонування повітря і санаційним фітодизайном. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*, 45, 5–20. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2023.45.5-20>

ДИНАМІКА ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ПІД ЧАС АНАЕРОБНОГО КОМПОСТУВАННЯ БІОВІДХОДІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕМ-ПРЕПАРАТУ БОКАШІ

Лія Кузнєцова¹, Альона Перебинос¹

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
perebynos.ar@knuba.edu.ua*

Проблема раціонального управління побутовими відходами залишається однією з найгостріших екологічних викликів сьогодення [1]. Згідно із законодавством України, значну частку побутових відходів (до 40 %) складають саме біовідходи [2]. Традиційна модель управління відходами «збирання — захоронення» призводить до того, що органічні рештки на полігонах стають джерелом метану, який є потужним парниковим газом. Перехід до циркулярної економіки вимагає впровадження методів локального оброблення біовідходів, серед яких особливе місце посідає використання «ефективних мікроорганізмів» (ЕМ).

Актуальність даного дослідження зумовлена необхідністю пошуку доступних та ефективних способів зменшення навантаження на полігони. Домашнє оброблення харчових решток з використанням ЕМ-препаратів дозволяє не лише мінімізувати викиди метану, а й отримувати органічне добриво. Розуміння динаміки ферментації та ролі мікробіологічних добавок є одним із ключових факторів для популяризації даного методу серед населення.

Об'єктом дослідження стали кухонні відходи, що піддавалися ферментації в анаеробних умовах за допомогою ЕМ-препарату Бокаші. Методика включала наступні етапи:

1. Пошарове закладання біовідходів у ЕМ-контейнер з подвійним дном для збирання рідини, що утворюється у процесі ферментації.
2. Внесення препарату Бокаші (суміш висівок, інокульованих фотосинтезуючими, молочнокислими бактеріями та дріжджами).
3. Моніторинг органолептичних показників (запах, колір,

структура) протягом 6 тижнів.

4. Контроль фізико-хімічних параметрів (табл. 1):

- температура вимірювалася за допомогою лабораторного термометра;
- показник рН визначався в ЕМ-рідині за допомогою рН-метра та компосту за допомогою індикаторних тест-смужок;
- вологість визначалася гравіметричним (ваговим) методом, що передбачає визначення різниці у масі між вологим та висушеним матеріалом.

У процесі експерименту температура компостної маси спочатку зроста до максимальних 20 °С на 14-й день, після чого спостерігалось її поступове зниження до 18 °С. Така динаміка може свідчити про проходження активної теплової фази розкладання та подальшу стабілізацію процесу ферментації.

Таблиця 1

Фізико-хімічні показники процесу ферментації

Параметр	Етап дослідження (день)					
	7	14	21	28	35	42
Температура, °С	17	20	19	18	18	18
Вологість, %	85,5	81,4	80,4	80,3	66,6	—
Показник рН компосту	7,5	6,5	5	5	6,5	6,5
Показник рН компостної рідини	-	5,1	4,02	5,97	4,5	5

Рівень рН компосту мав тенденцію до зниження (з 7,5 на 7-й день до 5 на 21–28-й день), що вказує на активне протікання кислотної ферментації під впливом ЕМ-препарату Бокаші. При цьому на 35-й день зафіксовано підвищення показника рН до 6,5, що може свідчити про завершення активної кислотної фази та перехід до стадії дозрівання компостної маси.

Показник рН компостної рідини (фільтрату) також продемонстрував динаміку, характерну для ферментаційних процесів. Найвищу кислотність зафіксовано на 21-й день (рН 4,02), що повністю синхронізується з піком кислотності самої компостної маси. На 28-й день відмічалось зниження кислотності рідини (показник рН зріс до 5,97), що додатково підтверджує поступову стабілізацію мікробіологічних процесів.

Вологість компостної маси поступово зменшилась з 85,5% (на 7-й день) до 66,6 % (на 35-й день), що може бути пов'язано з утворенням та виділенням фільтрату, інтенсивність утворення якого пов'язана з вологістю самих біовідходів.

У процесі дослідження також здійснювалися візуальні спостереження за станом компостної маси, зокрема оцінювалися структурні зміни, поява плісняви та інтенсивність запаху на кожному етапі ферментації (табл. 2).

Таблиця 2

Результати моніторингу процесу ферментації харчових відходів

Етап спостереження	Інтенсивність запаху	Органолептичні показники	Вихід ЕМ-рідини, мл
Тиждень 1	Висока	Запах різкий, неприємний; ферментативний; нотки сірководневого та капустиного запаху. Біло-блакитна пліснява.	0
Тиждень 2	Середня	Запах у відрі – тухлий; компостний чай – солодкувато-землистий. Зменшення блакитної плісняви; домінування білої у компості.	30
Тиждень 3	Висока	Запах різкий; ферментативний; виражений кисло-солодкий профіль. Лише біла пліснява; блакитна зникла.	140
Тиждень 4	Середня	Запах посилений, кисло-солодкий і ферментативний; компостний чай має різкіший запах. Збільшення білої плісняви на поверхні компоста.	76
Тиждень 5	Дуже висока	Різко неприємний, їдкий, гнильний; виражений кислий та бродильний профіль. Кількість білої плісняви зменшилася.	98
Тиждень 6	Дуже висока	Запах гнильний, тухлий, різкий; кислий тон зберігається. Кількість білої плісняви без змін.	15

Окрім фізико-хімічних параметрів та органолептичних показників, фіксувалося утворення компостної рідини (фільтрату), кількість якої змінювалася протягом експерименту. Початок виділення рідини зафіксовано на 14-й день (30 мл), а максимальне значення спостерігалось на 21-й день (140 мл), після чого відмічалось різке зменшення об'єму до 76 мл на 28-й день та наступне незначне зростання до 98 мл на 35-й день. На фінальному 7-му тижні (42-й день) зафіксовано суттєве падіння об'єму утвореного фільтрату до мінімального показника — 15 мл.

Висновки

1. Застосування ЕМ-препарату забезпечує стабільний перебіг анаеробної ферментації харчових відходів без початку процесів гниття.
2. Оптимальний термін ферментації в домашніх умовах становить 4–6 тижнів, після чого субстрат готовий до мінералізації в ґрунті.
3. Показник рН є надійним індикатором успішності процесу:

падіння рН нижче 4,5 гарантує відсутність патогенів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Про управління відходами : Закон України від 20.06.2022 № 2320–IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320–20#Text>
2. Національний план управління відходами до 2033 року: розпорядження Кабінету Міністрів України від 27.12.2024 № 1353–р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1353–2024–%D1%80#Text>

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО КОМПОСТУВАННЯ БІОВІДХОДІВ ЗА ДОПОМОГОЮ РІДКИХ ЕМ-ПРЕПАРАТІВ

Єлизавета Гетьман¹, Марія Носач¹, Альона Перебинос¹

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
perebynos.ar@knuba.edu.ua*

На сучасному етапі розвитку цивілізації проблема управління побутовими відходами трансформувалася з чисто технологічного питання у критичний виклик для екологічної безпеки. Для України, де тривалий час домінує лінійна модель управління, що полягає у збиранні відходів та їх захороненню на сміттєзвалищах, перехід до засад сталого управління згідно ієрархії управління відходами [1], є не лише вимогою європейської інтеграції, а й необхідністю для збереження життєздатності локальних екосистем.

Згідно із Законом України «Про управління відходами», ключовим пріоритетом є запобігання утворенню відходів та їх рециклінг [2]. Особливе місце в морфологічному складі побутових відходів посідають біовідходи, які складають близько 40 % сміттевого контейнера середньостатистичного громадянина [3]. Проблема полягає в тому, що, потрапляючи на полігони, органічні залишки стають джерелом емісії метану та фільтрату, що призводить до посилення парникового ефекту та забруднення ґрунтових вод у випадку відсутності на полігонах захисних інженерних споруд.

Актуальність теми зумовлена необхідністю пошуку дієвих рішень для децентралізованого управління біовідходами в умовах щільної міської забудови. Використання біотехнологічних методів, зокрема технологій ефективних мікроорганізмів (ЕМ), запропонованих японським професором Тєруо Хіґа, дозволяє не лише пришвидшити деструкцію органіки, а й спрямувати процес шляхом ферментації, а не гниття.

ЕМ-технологія базується на співіснуванні молочнокислих бактерій, дріжджів та фотосинтезуючих бактерій. Це дозволяє перетворити харчові відходи на добриво (ферментовану масу) та ЕМ-рідину, що мінімізує негативний вплив на довкілля та сприяє відновленню біогеохімічних циклів.

Дослідження проводилося командою студентів з метою оцінки практичного потенціалу рідкого ЕМ-препарату «Емочка» для домашнього компостування.

Об'єкт дослідження: процес ферментації кухонних біовідходів.

Інструментарій дослідження: спеціалізований побутовий ЕМ-компостер з герметичною кришкою, подвійним дном та дренажним краном; ЕМ-препарат «Емочка» (активованій розчин ефективних мікроорганізмів), ваги лабораторні (точність 1 г), термометр лабораторний, рН-метр, папір індикаторний універсальний, вимірювальні ємності.

Алгоритм виконання дослідження передбачав здійснення серії повторюваних процедур:

1. Підготовка: подрібнення та зважування органічних відходів (залишки овочів, фруктів, кавової гущі тощо).

2. Закладка: пошарове укладання біовідходів в компостер.

3. Інокуляція: обприскування кожного шару розчином ЕМ-препарату (1:100).

4. Експозиція: витримування в анаеробних умовах протягом семи днів.

5. Моніторинг: відбір та вимірювання об'єму утвореної ЕМ-рідини, визначення фізико-хімічних показників (табл. 1), а також фіксація органолептичних показників.

Таблиця 1

Фізико-хімічні показники процесу ферментації

Параметр	Етап дослідження (день)					
	7	14	21	28	35	42
Температура, °С	19,5	20	19,5	17	17	18
Вологість, %	91,5	78	83,7	75	78,3	–
Показник рН компосту	8,5	6,5	5	5	5	5
Показник рН компостної рідини	5	5	4,51	4,28	4	–

У процесі експерименту спостерігалось поступове зниження температури компостної маси від 20 °С до 17 °С, що свідчить про стабілізацію процесу ферментації. Рівень рН мав тенденцію до зниження (з 6–7 до 5), що вказує на активне протікання кислотної ферментації під впливом ЕМ-препарату. Вологість компостної маси поступово зменшилась, що може бути пов'язано з випаровуванням рідини та перебігом біохімічних процесів розкладання органічної речовини, а також низькою вологістю біовідходів.

Упродовж шести візитів було зафіксовано послідовні зміни у вигляді та запаху компостної маси, що відображають типовий перебіг анаеробної ферментації під дією рідкого ЕМ-препарату «Емочка». На початкових етапах (тиждень 1) компост складався зі свіжих органічних відходів із добре

збереженою структурою, а на поверхні спостерігалася змішана пліснява — біла, сіра та незначна кількість блакитної. Запах був різким, їдким і кислуватим, що відповідало високому вмісту капустяних компонентів та початку кислотоутворюючих процесів.

У подальші тижні ферментації структура відходів поступово змінювалася: з'являлося більше слизу, збільшувалася кількість білої плісняви, а сама маса темніла та ставала м'якшою. Поряд із цим запах втрачав різкість і набував більш стабільного кислувато-фруктового характеру. Спостереження свідчили про активізацію ферментативних мікроорганізмів, які пригнічували розвиток небажаних мікробних груп, зокрема тих, що спричиняють гниття.

Таблиця 2

Результати моніторингу органолептичних показників процесу ферментації біовідходів

Етап дослідження	Вигляд компостної маси	Пліснява	Запах	Вихід ЕМ-рідини, мл
Тиждень 1	Свіжі органічні відходи з чіткою структурою; початок розкладання	Біла, сіра, блакитна (дуже мало)	Різкий, неприємний, їдкий, з кислинкою	—
Тиждень 2	Збільшення слизу; відходи потемніли	Тільки біла	Стабільний, менш різкий; фруктовий аромат з кислинкою; запах рідини — кисло-солодкий, не різкий	140
Тиждень 3	Зволожена маса, наявність рідкої фракції; окремі плями білої плісняви; структура порушена відходів	Біла (окремі плями)	Менш виражений, кислуватий	137
Тиждень 4	Значне поширення білої плісняви; інтенсивне розкладання; маса однорідна	Біла (активне покриття поверхні)	Виражений кислий, без ознак гниття	127
Тиждень 5	Пліснява рівномірно розподілена; глибоке розкладання; м'яка, однорідна структура	Біла (значна кількість)	Стабільно кислуватий, типовий для анаеробної ферментації	92

Етап дослідження	Вигляд компостної маси	Пліснява	Запах	Вихід ЕМ-рідини, мл
Тиждень 6	Значне зменшення об'єму; суттєво деградована структура	Біла (рівномірне покриття верхнього шару)	Слабко виражений, кисло-солодкий; без ознак гниття; ознака стабілізації ферментації	44

Середина експерименту характеризувалася інтенсивним розкладанням органічних залишків, що проявлялося у перезволоженні маси, зменшенні її структурної цілісності та домінуванні білої плісняви, рівномірно розподіленої по поверхні. Запах у цей період був переважно кислим, типовим для анаеробної ферментації, але без ознак гниття, що вказувало на стабільність процесу та ефективну роботу ЕМ-культури.

На завершальному етапі компостна маса істотно зменшилась в об'ємі і набула однорідної, деградованої структури — окремі відходи вже не зберігали первинної форми. Верхній шар був повністю вкритий білою пліснявою, що відповідає здоровому ферментаційному процесу. Запах став слабко вираженим, кисло-солодким і стабільним, що свідчить про завершення активної фази ферментації та перехід компосту до стадії стабілізації.

На основі проведеного дослідження можна сформулювати наступні висновки:

1. Ефективність методу: використання рідких ЕМ-препаратів є високоефективним способом оброблення біовідходів у міських квартирах. Метод дозволяє уникнути гниття та утворення неприємних запахів.
2. Ресурсний потенціал: процес забезпечує отримання двох видів біодобрив: твердого ферментованого субстрату та рідкого концентрату, багатого на амінокислоти та антиоксиданти.
3. Кліматична значущість: локальна переробка органіки є прямим внеском у боротьбу зі зміною клімату, оскільки запобігає утворенню метану на полігонах.
4. Соціальний аспект: популяризація ЕМ-технологій серед населення може стати ключовим фактором переходу до культури «нуль відходів». Відсутність запахів та легкість у використанні роблять цей метод доступним для широкого кола громадян.

Для подальшого масштабування технології доцільно рекомендувати розробку муніципальних програм підтримки домашнього компостування та включення відповідних курсів до екологічної освіти молоді.

ЛІТЕРАТУРА

1. Waste Framework Directive : [електронний ресурс] / European Commission; Directorate-General for Environment. URL:

https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_en (дата звернення: 07.05.2026).

2. Про управління відходами : Закон України від 20.06.2022 № 2320–IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320–20#Text>

3. Національний план управління відходами до 2033 року: розпорядження Кабінету Міністрів України від 27.12.2024 № 1353–р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1353–2024–%D1%80#Text>

ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ РИНКУ ПРОЄКТІВ ЗЕЛЕНОГО БУДІВНИЦТВА В КОНТЕКСТІ ЗМІНИ КЛІМАТУ

Руслана Задорожна¹, Тетяна Димань¹, Наталія Димань¹

Білоцерківський національний аграрний університет,

ruslana.zadorozhna@btsau.edu.ua

Будівництво як одна з базових галузей економіки забезпечує матеріальну основу функціонування суспільства й створює необхідне підґрунтя для розвитку інших секторів. В умовах наростаючих несприятливих ефектів зміни клімату посилюється роль зеленого будівництва як інструменту зниження антропогенного навантаження на навколишнє природне середовище.

Зелене будівництво передбачає комплексний підхід до проектування, реалізації та експлуатації будівель, що мінімізує вплив на довкілля, забезпечує раціональне використання ресурсів та високу якість життя населення [1, с. 81].

«Зелені» будівлі проєктуються, будуються та експлуатуються в такий спосіб, щоб мінімізувати вплив на природне довкілля, при цьому максимізуючи добробут мешканців та ефективність використання ресурсів. Вони використовують енергоефективні системи, екологічно чисті матеріали, водозберігальні технології та методи будівництва з низьким рівнем викидів [2, с. 205].

У результаті досягається зменшення вуглецевого сліду, знижуються експлуатаційні витрати, покращується якість внутрішнього середовища та підтримується довгострокова екологічна стійкість.

У зеленому будівництві широко використовують інноваційні рішення, зокрема модульне збірне виробництво, інтелектуальні датчики, автоматизацію будівель на основі інтернету речей, оптимізацію енергоспоживання за допомогою штучного інтелекту.

Ефективність будівель зростає завдяки вдосконаленій теплоізоляції, енергоефективному скління та сучасним композитним матеріалам. Ці технології роблять «зелені» будівлі більш технологічними, водночас скорочуючи викиди протягом усього життєвого циклу та знижуючи експлуатаційні витрати. Підвищений комфорт для мешканців також робить

об'єкти зеленого будівництва привабливішими для покупців житлової нерухомості.

Керуючись ідеями пріоритету сталого розвитку, уряди країн та забудовники забезпечують підтримку проєктів екологічно орієнтованої забудови, відтак світовий ринок зеленого будівництва швидко розвивається (Рис. 1).

За даними Global Market Insights Inc., у разі збереження середньорічного темпу зростання ринку на рівні 10,2 % можна очікувати, що в 2034 р. його обсяг становитиме 1,39 трлн доларів США [3].

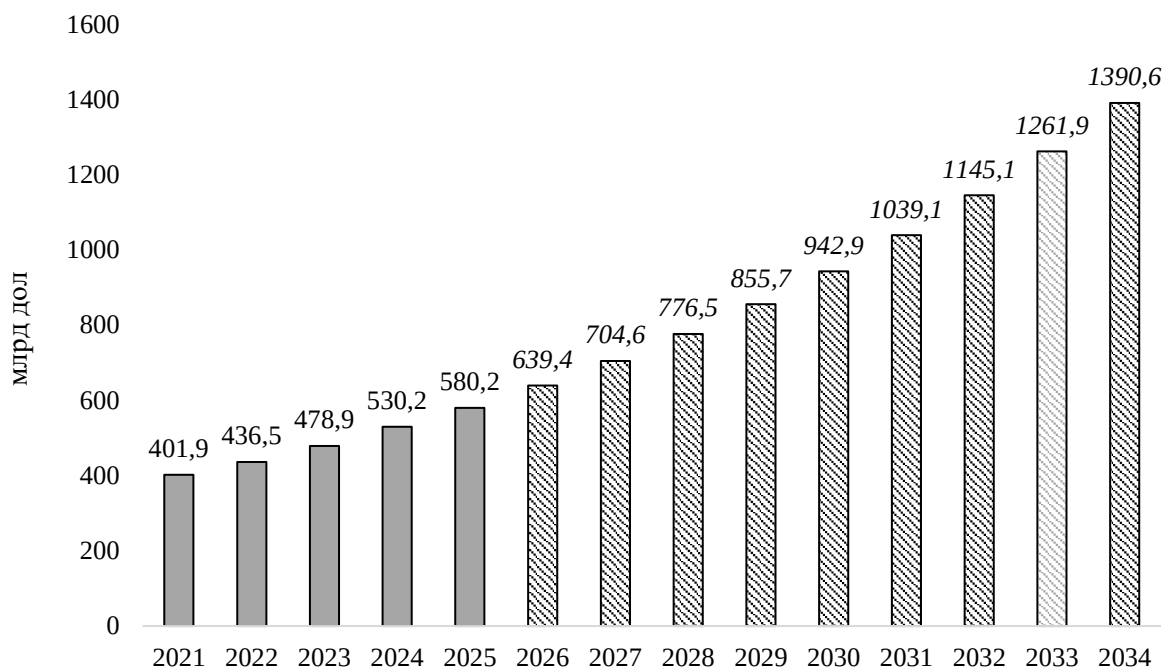


Рис. 1. Обсяги ринку зеленого будівництва в 2021-2025 рр.
та прогноз на 2026-2034 рр.

Джерело: побудовано авторами за [3]

Сегментацію ринку зеленого будівництва здійснюють за низкою ознак:

- за кінцевим використанням – житлова, комерційна та промислова нерухомість;
- за типом проєкту – нові будівлі, модернізація;
- за продуктом – внутрішній (інтер'єрний), зовнішній, інший;
- за типом матеріалу – конструкційна, ізоляційна, оздоблювальна, скляна та склопакетна галузі;
- за каналами збуту – онлайн, офлайн.

У 2024 р. частка житлового сегменту становила приблизно 45 % обсягу ринку, що еквівалентно 238,5 млрд доларів США; на промислову нерухомість припадало 94,8 млрд доларів США.

Очікується, що комерційний сегмент до 2034 р. перевищить 450 млрд

доларів США. Ця галузь швидко зростає, оскільки підприємства прагнуть створювати енергоефективні об'єкти, котрі знижують експлуатаційні витрати і сприяють досягненню цілей корпоративного сталого розвитку [3].

За прогнозами, ринок зеленого будівництва в Північній Америці до 2034 року сягне 400 млрд доларів США. Провідні позиції на цьому ринку займають Сполучені Штати: у 2024 році їхня частка становила приблизно 80 %, а дохід американських компаній – майже 132 млрд доларів США.

Ринок зеленого будівництва в Латинській Америці є сегментом глобального ринку, що розвивається найшвидше [4].

Європейський ринок формується під впливом суворих підходів державних інституцій до кліматичної політики та дотримання правил енергоефективності. Наприклад, в травні 2024 р. Європейський Союз повідомив про прогрес ініціативи «Хвиля реконструкції», в рамках якої держави-члени представили переглянуті довгострокові стратегії реконструкції відповідно до оновленої Директиви про енергетичну ефективність будівель. Ці стратегії визначають шляхи досягнення нульового рівня викидів будівель до 2050 р. з проміжними цілями на 2030 та 2040 рр. [3].

На рівні окремих компаній лідерами індустрії зеленого будівництва є BASF, IBM, General Electric Company, Siemens та Schneider Electric. Сукупно в 2024 р. вони займали приблизно 40 % ринку.

Хімічний концерн BASF постачає будівельну хімію, ізоляційні матеріали, покриття та екологічно чисті рішення для будівель. Портфоліо компанії включає поліуретанові ізоляційні системи, добавки до бетону та системи зовнішнього ізоляційного оздоблення.

Компанія IBM спеціалізується на рішеннях для інтелектуальних будівель, платформ Інтернету речей, штучного інтелекту для оптимізації будівель та аналізу даних. Її пакет додатків Maximo включає можливості управління будівлями, тоді як Watson IoT забезпечує прогнозне обслуговування та оптимізацію енергоспоживання.

General Electric пропонує комплексні рішення, що охоплюють автоматизацію та керування будівлями, енергоефективне освітлення, обладнання для опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, системи відновлюваної енергії, накопичення енергії та цифрові платформи для управління енергією в будівлях. Комплексність підходу робить General Electric пріоритетним партнером у великомасштабних комерційних та інституційних проєктах зеленого будівництва.

Технологічна компанія Siemens надає послуги з автоматизації будівель, пожежної безпеки, керування системами опалення, вентиляції та кондиціонування повітря. Платформа компанії забезпечує інтегроване управління будівлями, а підрозділ інтелектуальної інфраструктури займається електрифікацією, автоматизацією та цифровізацією будівель.

Schneider Electric – визнаний лідер у сфері сталого розвитку, що

розробляє комплексні рішення для будівель з нульовим рівнем викидів. Спеціалізація компанії – управління енергією та автоматизація. Її платформа EcoStruxure пропонує рішення на базі Інтернету речей, включно з системами управління будівлями, розподілом електроенергії, керуванням освітленням та енергетичною аналітикою.

Отже, ключовими чинниками розвитку ринку екологічного будівництва є зростання рівня обізнаності щодо екологічної стійкості та економічні переваги, пов'язані із впровадженням принципів зеленого будівництва.

Світовий досвід реалізації проєктів зеленого будівництва доцільно враховувати під час післявоєнного відновлення України. Це дасть змогу досягти трьох важливих результатів: по-перше, забезпечити ефективне використання енергетичних ресурсів; по-друге, зменшити негативний вплив на навколишнє природне середовище; по-третє, створити комфортні умови для життєдіяльності суспільства.

ЛІТЕРАТУРА

1. Глущенко Р.О. Проблеми «зеленого» будівництва в Україні на стадіях нормативної імплементації та практичної реалізації. *Екологічна безпека та природокористування*. 2025. № 57(1). С. 79-94. URL: <https://es-journal.in.ua/article/view/358129>
2. Vranayova Z., Tkachenko T., Lis A., Savchenko O., Vranay F. Green Buildings in Pursuit of Healthy and Safe Human Living Environment. *System Safety: Human – Technical Facility – Environment*. 2023. № 5(1). С. 204-211. URL: <https://doi.org/doi:10.2478/czoto-2023-0022>
3. Green Building Market Size & Share 2025-2034. URL: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/green-building-market>
4. Commercial Green Construction Market (2025-2030). URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/commercial-green-construction-market-report>.

ВИКОРИСТАННЯ РЕЦИКЛЬОВАНИХ ПЛАСТИКІВ З БУДІВЕЛЬНИХ ВІДХОДІВ ДЛЯ 3D-ДРУКУ НЕСТАНДАРТНИХ КРІПЛЕНЬ ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ: ВІД ВІМ-МОДЕЛІ ДО ВИРОБУ

Дмитро Кришук¹,

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
kryshchuk_ds-2024@knuba.edu.ua*

Вступ та постановка проблеми. Сучасна будівельна галузь постійно стикається з безпрецедентними екологічними та логістичними викликами. З

одного боку, глобальний перехід до концепції «Зеленого будівництва» (Green Construction) вимагає мінімізації вуглецевого сліду та радикального скорочення обсягів будівельного сміття. З іншого боку, в умовах післявоєнного відновлення України та активної розбудови цивільної інфраструктури виникає гостра потреба у швидких, ефективних та адаптивних інженерних рішеннях.

За статистичними даними, значну частку будівельних відходів на майданчиках становлять залишки полімерних матеріалів: обрізки труб систем водопостачання та водовідведення, елементи пластикової незнімної опалубки, захисні гофри кабельних трас, пакувальні матеріали та ізоляція. Традиційно ці матеріали класифікуються як неліквідні відходи і транспортуються на полігони твердих побутових відходів, де період їх природного розкладання сягає сотень років.

Водночас активне впровадження технологій інформаційного моделювання будівель (BIM) докорінно змінило підхід до проєктування інженерних мереж. Сучасні BIM-комплекси (наприклад, Autodesk Revit, ArchiCAD) дозволяють проєктувати вентиляцію, водопостачання та електрокабельні траси з надзвичайно складною просторовою геометрією, оминаючи несучі конструкції та архітектурні елементи. Однак на етапі фізичного монтажу таких мереж виникає суттєва проблема: стандартні заводські кріплення (металеві хомути, траверси, консолі) мають фіксовану геометрію. Для їх монтажу у тісних технічних приміщеннях або на об'єктах реконструкції будівельникам часто доводиться доопрацьовувати деталі на місці (згинати, зварювати, використовувати надмірну кількість перехідників), що призводить до втрати часу, зниження надійності вузла та здорожчання проєкту.

Обґрунтування обраного напрямку. Фокус даного дослідження саме на *інженерних системах та нестандартних (кастомних) деталях* зумовлений чіткими технологічними та економічними чинниками. По-перше, фізико-механічні обмеження рецикльованих полімерів не дозволяють використовувати їх для друку великогабаритних несучих конструкцій (стін чи перекриттів), проте вони чудово витримують локальні навантаження від інженерних комунікацій. По-друге, економіка масового виробництва робить 3D-друк стандартних типових кріплень (які виготовляються мільйонними тиражами методом лиття під тиском) абсолютно нерентабельним. Головна перевага адитивних технологій розкривається саме у швидкості реакції на непередбачувані просторові колізії. Можливість спроектувати унікальну деталь та роздрукувати її безпосередньо на будмайданчику за кілька годин усуває необхідність "кустарного" зварювання чи тижневого очікування специфічних заводських елементів.

Мета дослідження. Розробка та обґрунтування замкненого технологічного циклу (у рамках циркулярної економіки) з переробки полімерних будівельних відходів у вторинний філамент для подальшого 3D-

друку кастомних (нестандартних) кріплень інженерних систем безпосередньо на будівельному майданчику на основі просторових даних BIM-моделі.

Методологія та технологічний цикл. Запропоноване рішення об'єднує методи рециклінгу, параметричного проєктування та адитивного виробництва (технологія Fused Deposition Modeling — FDM). Процес складається з чотирьох послідовних етапів.

Етап 1. Рециклінг будівельних відходів та виготовлення філаменту.

Процес починається із сортування пластикового брухту на будівельному майданчику за маркуванням полімерів (переважно PET, PP, ABS або PLA). Відібраний матеріал очищується від будівельного пилу та залишків розчинів за допомогою гідроциклонних установок. Далі чистий пластик подрібнюється у промисловому шредері до фракції гранул (3-5 мм). Критично важливим етапом є дегідратація (сушіння) гранул, оскільки більшість інженерних полімерів (особливо PETG та ABS) є гігроскопічними, і наявність вологи призводить до утворення дефектів під час екструзії. Висушені гранули завантажуються в локальний екструдер, який розплавляє матеріал і формує вторинну нитку (філамент) стандартизованого діаметра (1.75 мм або 2.85 мм) з постійним контролем товщини за допомогою лазерних мікрометрів.

На етапі сортування критично важливо відокремити хлоровмісні полімери (зокрема ПВХ, з якого виготовляють каналізаційні труби), оскільки їх термічна екструзія супроводжується виділенням токсичних газів, що робить їх непридатними для локального 3D-друку без спеціалізованого хімічного обладнання. Тому основним джерелом сировини будуть слугувати відходи PETG, PP та ABS. А ПВХ доцільно переробляти методами гарячого пресування у великогабаритні елементи благоустрою або використовувати як інертний наповнювач у будівельних сумішах

Етап 2. Аналіз BIM-моделі та параметричне проєктування вузла.

На етапі підготовки до монтажу фахівець (BIM-координатор) аналізує зведену інформаційну модель будівлі у програмі Autodesk Navisworks або аналогічній. При виявленні просторової колізії або нестандартного перетину (наприклад, необхідності обійти колону пучком кабельних лотків під кутом 37 градусів, рис.1) розраховуються базові координати точок кріплення. Ця геометрія імпортується у середовище інженерного моделювання (наприклад, Autodesk Fusion 360). Інженер створює базовий об'єм (заготовку) майбутнього кріплення, задає точки фіксації до стіни/стелі та точки спирання інженерної мережі. Далі вводяться граничні умови: вектори навантажень (вага труби з водою), напрямки вібрацій та допустимі напруження.



Рис. 1. Порівняння кріплень

Етап 3. Топологічна оптимізація (Генеративний дизайн).

Найважливішою інновацією пропонованого методу є застосування алгоритмів топологічної оптимізації. Програмне забезпечення використовує метод скінченних елементів (FEA) для аналізу напружено-деформованого стану базової моделі під заданим навантаженням. Алгоритм ітеративно видаляє матеріал з тих зон деталі, які не зазнають суттєвих навантажень, залишаючи лише ті «ребра жорсткості», які забезпечують передачу зусиль. В результаті генерується деталь складної, біонічної форми. Такий підхід дозволяє зменшити масу деталі (а отже, і витрату переробленого пластику) на 30–45% порівняно з монолітними литими аналогами, повністю зберігаючи необхідну несучу здатність та коефіцієнт запасу міцності.

Етап 4. Адитивне виробництво (3D-друк) на майданчику.

Згенерована 3D-модель конвертується у формат G-коду за допомогою слайсера (наприклад, Ultimaker Cura), де задаються параметри друку: товщина шару (зазвичай 0.2-0.3 мм для інженерних деталей), відсоток заповнення (Infill — від 50% до 100% залежно від навантаження), кількість периметрів стінок та температурні режими. Друк здійснюється на локальному 3D-принтері (настільного або промислового класу) безпосередньо в мобільному цеху на будівельному майданчику. Це дозволяє отримати готову деталь складної форми вже через кілька годин після виявлення колізії в BIM-моделі.

Результати дослідження фізико-механічних властивостей.

Для підтвердження доцільності використання вторинних полімерів було проведено аналіз їх фізико-механічних властивостей. Експериментальні дані свідчать, що використання рецикльованих пластиків є повністю виправданим для елементів інженерних систем, які працюють у нормальних умовах експлуатації (не піддаються впливу температур понад 70–80 °C та агресивних хімічних середовищ). Порівняльні характеристики найбільш поширених перероблених полімерів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

**Порівняльні характеристики рецикльованих полімерів для 3D-друку
інженерних кріплень**

Тип полімеру	Типове джерело на будмайданчику	Міцність на розтяг, МПа	Рекомендована сфера застосування в системах
rPETG (Поліетилентерефталат-гліколь)	Обрізки пластикових труб, міцне пакування, ємності	45-50	Кріплення для легких вентиляційних повітропроводів, кабельні лотки, підвіси слабкострумових мереж
rABS (Акрилонітрилбутадієнстирол)	Залишки пластикової незнімної опалубки, корпуси обладнання	40-42	Вузли фіксації труб систем холодного водопостачання, жорсткі дистанційні хомути
rPP (Поліпропілен)	Пакувальна тара, обрізки поліпропіленових труб та фітингів	25-30	Гнучкі кліпси, ізоляційні вставки, прокладки для віброізоляції труб

З таблиці видно, що вторинний PETG (rPETG) демонструє найвищі показники міцності на розтяг і високу міжшарову адгезію під час 3D-друку, що робить його універсальним матеріалом для більшості підвісних систем. Вторинний ABS (rABS) відзначається кращою ударостійкістю, проте вимагає використання 3D-принтерів із закритою термокамерою для запобігання температурним деформаціям (усадкам) під час друку.

Економічна та екологічна ефективність.

Застосування пропонованої концепції має подвійний позитивний ефект. З економічної точки зору, децентралізоване виробництво ("виробництво на місці") повністю усуває витрати на складну логістику, замовлення дрібних партій нестандартних деталей на заводах та час очікування доставки (який може сягати тижнів). Це критично важливо при реконструкції лікарень, укриттів або об'єктів критичної інфраструктури.

З екологічної точки зору, такий підхід є ідеальною ілюстрацією принципів сталого розвитку. По-перше, зменшується навантаження на сміттєві полігони. По-друге, переробка пластику та його 3D-друк вимагають значно менше енергії, ніж первинне лиття пластмас під тиском на великих підприємствах. Завдяки усуненню логістичного ланцюжка "завод - склад - будівельний майданчик", загальний вуглецевий слід (Carbon Footprint) процесу забезпечення об'єкта кріпленнями знижується на 40–60%.

Висновки.

- Інтеграція технологій ВІМ-проектування, топологічної оптимізації та будівельного 3D-друку відкриває принципово нові можливості для вирішення складних інженерних задач із монтажу мереж на нестандартних об'єктах.

- Будівельні полімерні відходи є цінним ресурсом. Переробка PETG, ABS та PP безпосередньо на місці дозволяє отримувати філамент з достатніми фізико-механічними характеристиками для виготовлення кріплень та допоміжних конструкцій.

- Топологічна оптимізація дозволяє компенсувати незначне зниження міцності вторинних пластиків (порівняно з первинними) за рахунок раціонального розподілу маси в деталі, заощаджуючи при цьому значні обсяги матеріалу.

- Подальші перспективи розвитку цього напрямку лежать у площині розробки мобільних автоматизованих комплексів (контейнерного типу), які б поєднували шредер, екструдер та промисловий 3D-принтер для швидкого розгортання на великих будівельних майданчиках. Також необхідним кроком є проведення масштабних випробувань надрукованих елементів на довговічність і вогнестійкість з метою їх майбутньої стандартизації у Державних будівельних нормах (ДБН) України.

ЛІТЕРАТУРА

1. Cruz Sanchez F. A., Boudaoud H., Camargo M., Pearce J. M. Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 257. P. 120–149.
2. Liu J., Gaynor A. T., Chen S., Kang Z., Suresh K., Takezawa A., ... & To A. C. Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2018. Vol. 57, Issue 6. P. 2457–2483.
3. Zander N. E., Gillan M., Burckhard Z., Gardea F. Recycled polymer feedstocks for 3D printing of thermoplastic materials. *Additive Manufacturing*. 2018. Vol. 21. P. 34–41.
4. Woern A. L., Byard D. J., Oakley R. B. Fused Filament Fabrication 3D Printing Using Recycled Materials. *Resources, Conservation & Recycling*. 2018. Vol. 128. P. 37–44.
5. ДСТУ ISO 14040:2013. Екологічне управління. Оцінювання життєвого циклу. Принципи та структура (ISO 14040:2006, IDT). Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 24 с.
6. European Commission. A new Circular Economy Action Plan – For a cleaner and more competitive Europe. Brussels: European Union, 2020. URL: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0017.02/DOC_1&format=PDF.

БАГАТОШАРОВІ КОНСТРУКЦІЇ ЗНИЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ КОНТРАСТІВ ДЛЯ БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ ТА ТИМЧАСОВИХ СПОРУД

Лілія Попова¹, Сергій Скочко²

¹*“The Ukrainian-British Academic Partnership” CIC*

liliya.popova.prof@gmail.com

²*БО «Міжнародний ЕкоСоціальний інноваційний Фонд» fsahi84@gmail.com*

Сучасні умови будівництва та цивільного захисту потребують розроблення адаптивних технологій маскуванню об'єктів, що зменшують їх теплову помітність у видимому та інфрачервоному спектрах. Одним із перспективних напрямів є створення багатошарових конструкцій, які забезпечують зниження теплових контрастів між об'єктом та навколишнім середовищем, а також попереджають утворення локальних теплових островів, що виникають через високий тепловий потік [1-3].

Запропонований метод може бути застосований під час монтажу, реконструкції або експлуатації будівельних об'єктів і тимчасових споруд, де проводяться роботи під маскувальними оболонками, що поєднують фізичний та цифровий рівень захисту. Такі рішення доцільно розглядати не лише як матеріально-конструктивні елементи, а й як орієнтовану частину цифрового інженерного супроводу, інтегрованого у процеси планування, моделювання та управління параметрами об'єктів.

Методика та структура багатошарової маскувальної конструкції. Багатошарова маскувальна конструкція включає три основні шари:

1. Зовнішній маскувальний шар (1) — матеріали з кольорами та текстурами, подібними до навколишнього середовища (ліс, пустеля, міська забудова), що забезпечують маскуванню у видимому спектрі.

2. Проміжний шар (2) — матеріал з низькою емісійною здатністю, що зменшує теплове випромінювання та знижує контрастність об'єкта відносно навколишнього середовища.

3. Основний робочий шар (3) — внутрішній шар, що контактує з поверхнею об'єкта або тілом особового складу, забезпечує механічну стабільність конструкції та підтримку форми.

Запропонований метод дозволяє забезпечити ефективне маскуванню як в умовах видимого спектру, так і при низьких температурах, коли різниця температур між об'єктом та середовищем підвищує ймовірність виявлення об'єкта [1; 2].

Інтеграція з цифровим інженерним середовищем

Запропонований підхід може бути інтегрований у сучасні процеси цифрового інженерного супроводу будівельних робіт, зокрема під час моделювання тимчасових укривних рішень, планування монтажу та реконструкції об'єктів. Багатошарова оболонка розглядається не лише як

фізичний елемент захисту, а й як частина узгодженого інженерного середовища, де поєднуються конструктивні, теплофізичні та експлуатаційні параметри.

У цьому контексті рішення можуть бути пов'язані з логікою цифрової інженерії, відповідної бази інженерних даних та еко-енергетичних рішень, що забезпечують систематизацію, структурування та адаптацію таких рішень у прикладному середовищі [1].

Формула теплового випромінювання та її оцінка

Теплове випромінювання об'єкта можна оцінити за законом Стефана–Больцмана[4]:

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T^4 - T_s^4) \quad (1)$$

де: Q — тепловий потік об'єкта (Вт);

ε — емісійна здатність поверхні;

$\sigma = 5.670 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$ — стала Стефана–Больцмана;

A — площа об'єкта (м^2);

T — температура об'єкта (К);

T_s — температура навколишнього середовища (К).

Застосування проміжного шару з низькою емісійною здатністю дозволяє зменшити теплове випромінювання (Q) та теплові контрасти, підвищуючи ефективність маскування залежно від емісійної здатності матеріалу проміжного шару (Табл. 1).

Таблиця 1

Зменшення теплового потоку

Матеріал проміжного шару	Емісійна здатність (ε)	Зниження теплового потоку, %
Полімерний композит	0.12	45
Фольгований тканинний шар	0.08	60
Керамічний композит	0.25	30

Візуалізація методу

На рисунку 1 схематично показано багат шарову маскувальну конструкцію, нанесену на поверхню об'єкта або елементи спорядження особового складу. Зовнішній шар (1) забезпечує видимий камуфляж, проміжний шар (2) знижує тепловий потік, а внутрішній робочий шар (3) підтримує форму та механічну стабільність.

Висновки

Використання багат шарових маскувальних конструкцій із проміжним низькоемісійним шаром дозволяє ефективно знижувати теплові контрасти між об'єктом і середовищем, попереджувати утворення локальних теплових островів та підвищувати ймовірність залишатися непоміченим у видимому та інфрачервоному спектрах. Запропонований метод доцільно застосовувати під час монтажу, реконструкції та експлуатації будівельних

об'єктів, укриттів і тимчасових споруд. Інтеграція цих рішень у цифрове інженерне середовище, базу інженерних даних та еко-енергетичні рішення, забезпечує систематизацію, інженерне структурування та подальшу адаптацію технологій у прикладному середовищі цифрової інженерної платформи.

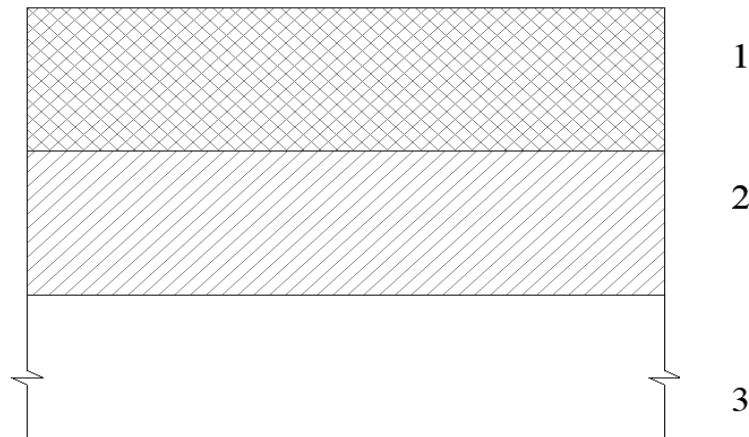


Рис. 1. Схема багатошарової конструкції: 1 — зовнішній адаптивний шар; 2 — проміжний низькоємісний шар; 3 — основний робочий шар.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Київ: Міністерство розвитку громад та територій України, 2022.
2. Іваненко О., Петренко М. Методи маскування об'єктів у видимому та інфрачервоному спектрах. Вісник військових технологій. 2022;3:45-52.
3. ДСТУ Б В.2.6-189:2013. Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. Київ: Мінрегіон України, 2014.
4. Ландау Л.Д., Ліфшиц Е.М. Теоретична фізика. Теплопередача. М.: Наука; 2019.

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ БАГАТОШАРОВІ СИСТЕМИ ТЕПЛООВОГО МАСКУВАННЯ ТА РЕГУЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ КОНТРАСТІВ У ЗЕЛЕНОМУ БУДІВНИЦТВІ ТА ЦИВІЛЬНОМУ ЗАХИСТІ

Лілія Попова¹, Сергій Скочко²

¹ “The Ukrainian-British Academic Partnership” CIC
(liliya.porova.prof@gmail.com), ² БО «Міжнародний ЕкоСоціальний
інноваційний Фонд» (fsahi84@gmail.com)

Анотація

У статті представлено комплексний інженерний підхід до регулювання теплової помітності та зниження теплових контрастів об'єктів будівництва, тимчасових споруд, укриттів та мобільних модулів. Запропоновано метод

інфрачервоного маскування, що реалізується через тришарову адаптивну оболонку з проміжним низькоемісійним шаром. Проаналізовано теплофізичні характеристики матеріалів оболонки та математично обґрунтовано їхню ефективність за законом Стефана–Больцмана. Розглянуто інтеграцію розробленого технічного рішення (оформленого у вигляді заявки на винахід) у сучасне цифрове інженерне середовище за допомогою комп'ютерної програми «Цифрова інженерна платформа». Впровадження методу дозволяє підвищити енергоефективність споруд [1], мінімізувати утворення локальних теплових островів та суттєво підвищити рівень безпеки й захищеності об'єктів у межах концепції зеленого будівництва та цивільного захисту.

Ключові слова: тепловий контраст, багатошарова конструкція, низькоемісійні матеріали, інфрачервоне маскування, цифрова інженерна платформа, зелене будівництво, цивільний захист, тимчасові споруди.

Вступ та актуальність дослідження

Сучасні умови воєнних викликів, руйнування інфраструктури та необхідність гарантування безпеки цивільного населення й особового складу потребують кардинального перегляду підходів до проєктування будівельних об'єктів та тимчасових укриттів. Традиційні інженерні підходи переважно зосереджуються на механічній міцності, довговічності та класичній теплоізоляції [2] огорожувальних конструкцій. Водночас поза увагою залишається параметр теплової помітності (контрастності) зовнішніх поверхонь об'єкта.

Високий тепловий потік та нерівномірне нагрівання поверхонь призводять до утворення локальних теплових контрастів. Це робить об'єкти легкою ціллю для сучасних засобів інфрачервоного спостереження [3] та тепловізійних пристроїв. Крім того, у контексті «зеленого будівництва» (Green Building) надлишкове теплове випромінювання та перегрів поверхонь провокують виникнення локальних теплових островів, що негативно впливає на загальну еко-енергоефективність архітектурного середовища.

Тому керування емісійними характеристиками зовнішніх оболонок споруд стає не просто елементом маскування, а важливим міждисциплінарним інженерним параметром, який об'єднує теплофізику, матеріалознавство, цивільний захист та цифрову інженерію.

Аналіз факторів формування теплового поля об'єкта

Для створення ефективного захисту необхідно враховувати, що теплове поле споруди не є статичним. Воно формується під впливом комплексу факторів:

- Зовнішні кліматичні чинники: нерівномірне нагрівання поверхонь під дією сонячної радіації, коливання температури повітря, швидкість вітру та вологість середовища.

- Внутрішні чинники: тепловіддача від внутрішніх джерел (опалення, робота обладнання, перебування особового складу або цивільного населення).

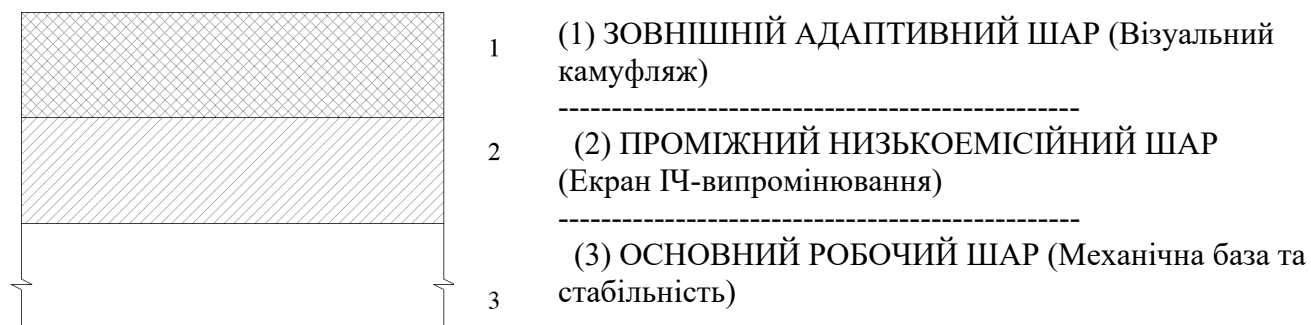
- Конструктивні особливості: наявність стиків, вузлів та містків холоду, які створюють чітко виражені температурні неоднорідності на зовнішній поверхні.

Навіть за умови використання якісного класичного утеплювача, зовнішній шар будівлі під впливом сонця та вітру створює тепловий контраст із навколишнім ландшафтом. Метою даної роботи є обґрунтування застосування адаптивної багатошарової оболонки, здатної нівелювати ці контрасти.

Структура та функціонал багатошарової адаптивної оболонки

Запропоноване авторами технічне рішення базується на використанні багатошарової системи, яка може монтуватися як накривна, екранувальна або тимчасова зовнішня оболонка на будівельні об'єкти, модульні шпитали, гуманітарні пункти чи елементи спорядження. Конструкція складається з трьох основних шарів (Рис. 1).

[НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ / ЛАНДШАФТ]



[ПОВЕРХНЯ ОБ'ЄКТА / НЕСУЧА КОНСТРУКЦІЯ]

Рис. 1. Схема принципу дії багатошарової конструкції

Кожен шар системи виконує строго визначену теплофізичну та конструктивну функцію, детальний опис яких наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Функціональні характеристики елементів системи

Елемент системи	Конструктивне призначення	Теплофізична функція	Значення для об'єктів зеленого будівництва та цивільного захисту
Зовнішній адаптивний шар	Формує зовнішню поверхню оболонки	Частково стабілізує зовнішній теплообмін,	Підвищує адаптивність споруди до умов

Елемент системи	Конструктивне призначення	Теплофізична функція	Значення для об'єктів зеленого будівництва та цивільного захисту
		забезпечує візуальну інтеграцію	ландшафту, будівельного майданчика або міського середовища
Проміжний низькоемісійний шар	Розміщується між зовнішнім і основним шарами	Зменшує емісійну здатність поверхні, знижує інтенсивність випромінювання	Знижує теплову помітність, зменшує локальні теплові контрасти, підвищує захищеність об'єкта
Основний робочий шар	Контактує з базовою конструкцією або несучою основою	Забезпечує стабільність системи та конструктивну сумісність	Дає змогу інтегрувати оболонку в укриття, тимчасові споруди, модулі та об'єкти реконструкції

Фізико-математичне обґрунтування методу

Ключову роль у зниженні теплового контрасту відіграє саме проміжний шар (2). Фізична доцільність його застосування описується законом теплового випромінювання Стефана–Больцмана для щільності теплового потоку поверхні:

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T^4 - T_s^4) \quad (2)$$

де:

Q — тепловий потік об'єкта (Вт);

ε — емісійна здатність поверхні;

$\sigma = 5.670 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$ — стала Стефана–Больцмана;

A — площа об'єкта (м^2);

T — температура об'єкта (К);

T_s — температура навколишнього середовища (К).

Аналіз формули показує: якщо ми не можемо суттєво змінити температуру об'єкта (T) або середовища (T_s), єдиним ефективним інженерним важелем впливу є зниження емісійної здатності поверхні (ε). Застосування низькоемісійних прошарків зменшує інтенсивність інфрачервоного випромінювання навіть при високих внутрішніх температурах.

В ході досліджень було оцінено ефективність різних матеріалів для формування проміжного низькоемісійного шару (Табл. 2).

Таблиця 2

Ефективність зниження теплового потоку залежно від матеріалу

Матеріал проміжного шару	Емісійна здатність (ϵ)	Зниження теплового потоку, %
Керамічний композит	0.25	30%
Полімерний композит	0.12	45%
Фольгований тканинний шар	0.08	60%

Як демонструють експериментальні дані, використання фольгованого тканинного прошарку з низьким коефіцієнтом $\epsilon = 0.08$ забезпечує екранування до 60% теплового потоку [4], що є оптимальним показником для систем захисного маскування.

Інтеграція з цифровим інженерним середовищем

Запропонована багатошарова оболонка розглядається не просто як пасивне покриття, а як високотехнологічний елемент, інтегрований у «Цифрову інженерну платформу».

У сучасній практиці проектування еко-будівель та об'єктів цивільного захисту параметри цієї оболонки вносяться у відповідну базу інженерних даних ще на етапі 3D-моделювання. Це дозволяє в реальному часі:

1. Прораховувати майбутні теплові поля об'єкта з урахуванням географії, сонячної інсоляції та вітрового навантаження.
2. Автоматично підбирати оптимальну товщину та тип низькоемісійного шару під конкретні кліматичні умови.
3. Оцінювати загальну енергоефективність споруди (мінімізацію непродуктивних тепловтрат через стіни та дах) і прогнозувати рівень її захищеності від тепловізійного моніторингу.

Висновки

1. Впровадження багатошарових адаптивних оболонок із проміжним низькоемісійним шаром є перспективним і високоефективним напрямом розвитку інженерних рішень для цивільного захисту, будівництва укриттів та збереження критичної інфраструктури.

2. Завдяки використанню низькоемісійних матеріалів (зокрема, фольгованих тканинних шарів) вдається знизити щільність теплового потоку об'єкта на величину до 60%, що практично повністю нівелює локальні теплові контрасти у тепловізійному спектрі.

3. З позицій «зеленого будівництва» адаптивні оболонки стабілізують поверхневий теплообмін споруд, ліквідують ефект «теплових островів» та зменшують енерговитрати на кондиціонування й опалення.

4. Інтеграція фізичних параметрів конструкції у комп'ютерну програму «Цифрова інженерна платформа» забезпечує автоматизацію розрахунків, систематизацію даних та швидку адаптацію захисних технологій до реальних об'єктів реконструкції та відновлення.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Київ: Міністерство розвитку громад та територій України, 2022.
2. ДСТУ Б В.2.6-189:2013. Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. Київ: Мінрегіон України, 2014.
3. Іваненко О., Петренко М. Методи маскування об'єктів у видимому та інфрачервоному спектрах. Вісник військових технологій. 2022; 3:45-52.
4. Ландау Л.Д., Ліфшиц Е.М. Теоретична фізика. Теплопередача. М.: Наука; 2019.

ПРИШВИДШЕННЯ ВИПРОБУВАННЯ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ОБ'ЄКТІВ ПІДВИЩЕНОЇ НЕБЕЗПЕКИ МЕТОДОМ АБСОЛЮТНОГО ТИСКУ

Сергій Цибитовський¹, Тетяна Ткаченко¹

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
serhii.uaror@gmail.com, tkachenkoknuba@gmail.com*

Безпека атомної енергетики є пріоритетним завданням в області декарбонізування та екологічного переходу енергетичної галузі. Одним з питань ядерної безпеки є герметичність системи герметичного огороження (СГО) ядерної установки. Випробування [1] виконують методом абсолютного тиску. До СГО нагнітають повітря до тиску 169 кПа. Далі герметичність оцінюють за падінням тиску з часом. Основною проблемою випробувань є висока тривалість нагнітання повітря до СГО – до 25 годин. Для пришвидшення процесу в роботі [1] запропоновано використання ежектора. Розрахунки виконано в роботі [2].

У даній роботі вдосконалено математичну модель установки з ежектором. Спочатку характеристику продуктивності G , кг/с, – тиск p , бар, компресора було апроксимовано. До 4,73 кПа компресор ЦК135/8 має практично лінійну характеристику $G = 3,44669 - 0,04554 \cdot p$, кг/с. Далі розглянуто режим без ежектора. Диференціальне рівняння процесу заповнення разом з рівнянням Клапейрона та характеристикою компресора дозволяють розрахувати час заповнення СГО – 3,965 год.

Далі розроблено математичну модель ежектора (рис. 1 а). На відміну від традиційних підходів [3], оптимізуватимемо не ККД ежектора, який є змінною величиною при зміні тиску, а час заповнення СГО. Математична модель передбачає рівняння нерозривності, збереження моменту імпульсу та рівність тисків у потоку з сопла та потоку ежектованого повітря на вході до камери змішування.

При авторських розрахунках прийнято адіабатність процесів і враховано стисливість повітря, адже швидкість на виході зі сопла

надзвукова. При розрахунку характеристики ежектора задають коефіцієнт ежекції u та обчислюють ступінь стиснення ε . Однак, при такій послідовності розрахунку важко визначити максимальне значення коефіцієнта ежекції, що суттєво знижує точність розрахунку часу заповнення СГО. У даній роботі вдосконалено методику розрахунку та запропоновано задавати коефіцієнт стиснення ε й обчислювати коефіцієнт ежекції. У цьому разі збіжність результатів значно поліпшується.

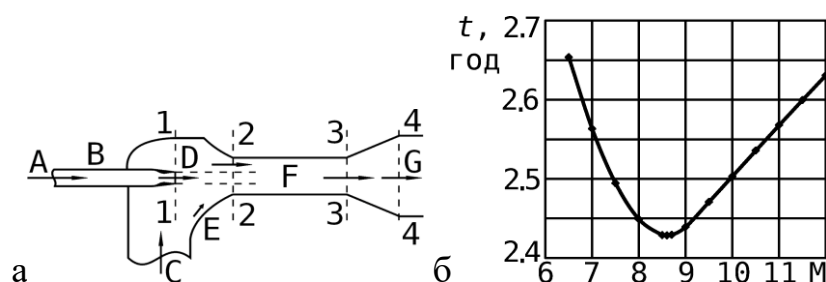


Рис. 1. Ежектор: а – схема; б – залежність часу t заповнення СГО від модуля ежектора M : А – потік від компресора; В – сопло; С – вхід ежектованого повітря; D – потік на виході з сопла; Е – потік ежектованого повітря; F – камера змішування; G – вихід до СГО

У результаті (рис. 2) виявлено, що залежність часу заповнення СГО t , год, від модуля ежектора M (відношення площі перерізу камери змішування до найвужчого перерізу сопла) має мінімум при $M = 8,6$, що є оптимальним значенням для проектування.

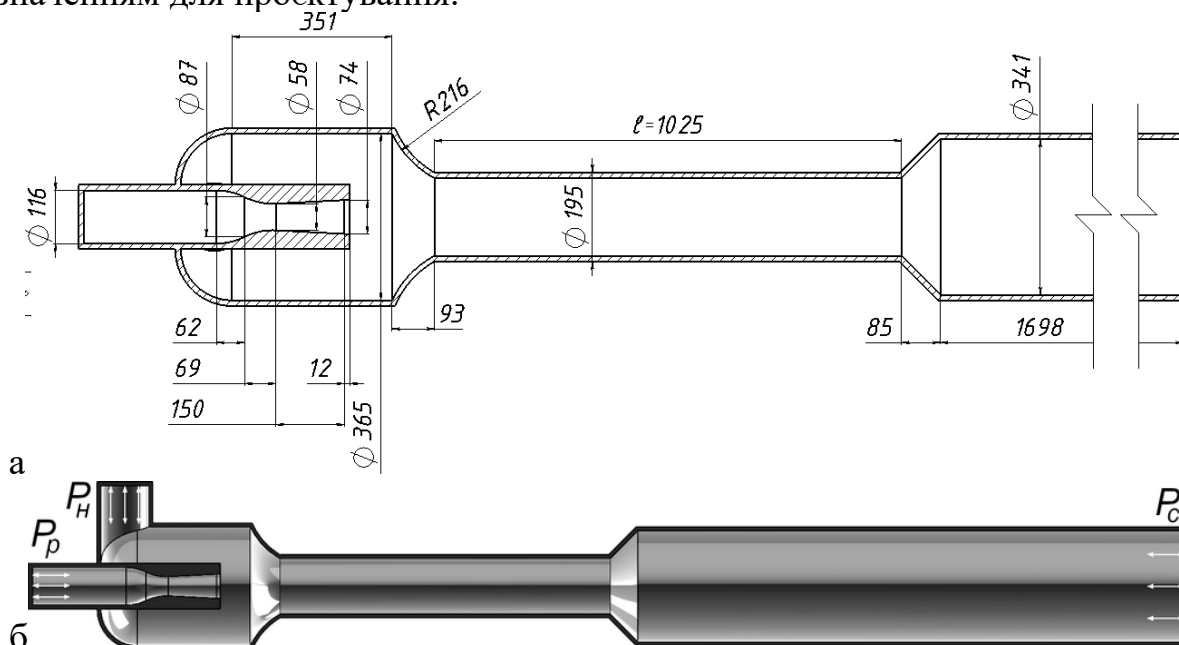


Рис. 2. Модель ежектора: а – креслення; б – загальний вигляд з граничними умовами тиску:

$$P_p = 500000 \text{ Па (абс.)}; P_n = 101325 \text{ Па (абс.)}; P_c = 136325 \text{ Па (абс.)}$$

Через неможливість урахування всіх ефектів виконано CFD-моделювання за k-ε моделлю. Розрахунок закачування виконуватиметься дуже довго, тому змодельовано протитиск 0,35 бар. Побудовано тривимірну модель (рис. 2) та оптимізовано геометричну форму, що підтвердило $M = 8,6$. Надалі модуль ежектора змінювався двома способами – масштабуванням камери змішування або збільшенням її діаметра без зміни довжини. Рис. 3 підтверджує оптимальне значення модуля $M = 8,6$.

Більш детально з результатами можна ознайомитися в публікації [4].

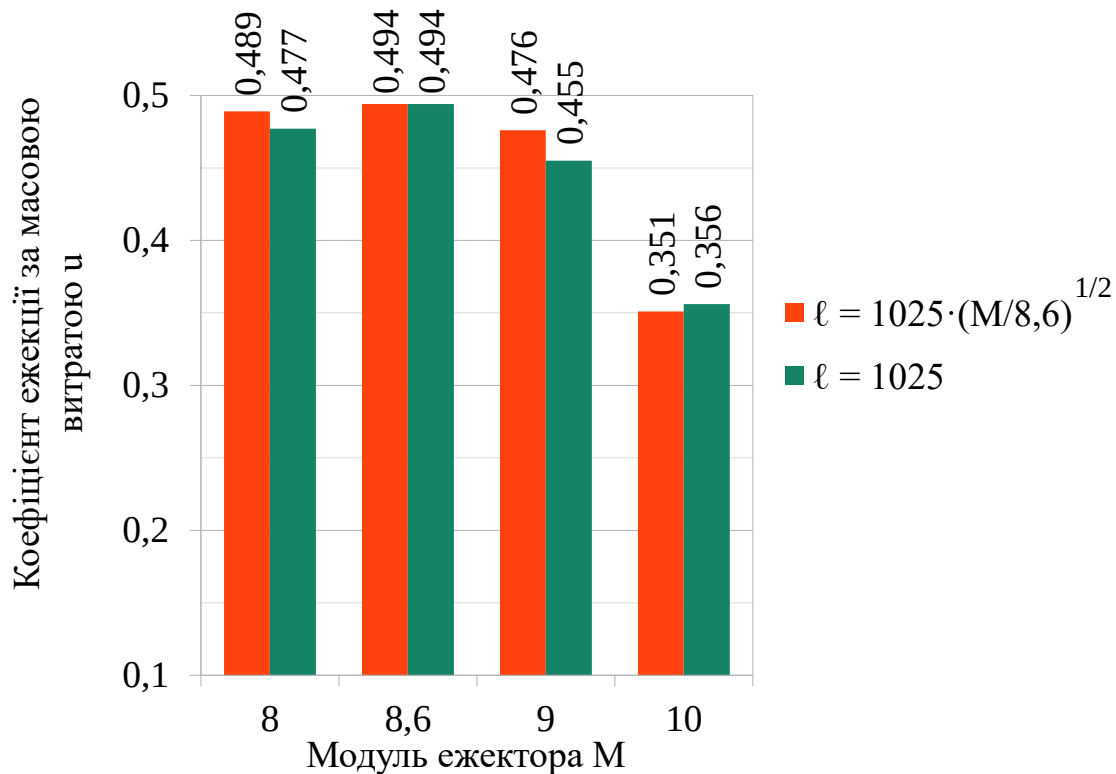


Рис. 3. Залежність коефіцієнта ежекції u від модуля ежектора M

ЛІТЕРАТУРА

1. Kravchenko, V., A. Vlasov, A. Golovchenko, A. Mazurenko, V. Dubkovskiy, O. Chulkin. "State and Prospects of Containment Tightness Tests for VVER-1000 Reactor Installations." Nuclear and Radiation Safety, no. 2(98), June 2023, pp. 53–60. [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2\(98\).05..](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2(98).05..)
2. Kravchenko V., Vlasov A., Andryushchenko A., Vlasov D., Golovchenko A., Gavrilov P., "Reduced air injection time during containment testing due to the use of an ejector." Odes'kyi Politechnichniy Universytet Pratsi, vol. 1, no. 65, 2022, pp. 62–69. <https://doi.org/10.15276/opu.1.65.2022.07.>
3. Butenko, O., S. Smyk. "Improvement of the central ejector efficiency under nonoptimal operating modes." Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychnoho Universytetu [Dnipropetrovsk], vol. 2, 2015, pp. 57–61, <https://nvngu.in.ua/index.php/en/archive/on-the-issues/1072-2015/contents-no-2-2015/geotechnical-and-mining-mechanical-engineering-machine-building>

4. Tsybytovskiy S. Simulation of the ejector in the system for testing the tightness of high-risk facilities. Ventilation, Illumination and Heat-Gas Supply. 2026. Vol. 56. P. 131-152. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.56.131-152>.

МАСКУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ТА ЛЮДЕЙ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД ТЕПЛОВІЗІЙНИХ ПРИСТРОЇВ У КОНТЕКСТІ ЗЕЛЕНОГО БУДІВНИЦТВА

Лілія Попова¹, Сергій Скочко²

¹*“The Ukrainian-British Academic Partnership” CIC*

liliya.popova.prof@gmail.com

²*БО «Міжнародний ЕкоСоціальний інноваційний Фонд» fsahi84@gmail.com*

Сучасні умови функціонування будівельної, гуманітарної та захисної інфраструктури потребують розробки рішень, що поєднують безпеку, енергоефективність, адаптивність, конструктивну сумісність та екологічну доцільність. Особливо це актуально для укриттів, тимчасових споруд, мобільних модулів, допоміжних інженерних конструкцій та елементів оснащення, які експлуатуються або монтуються за підвищених ризиків.

Традиційно у проектуванні таких об'єктів увага зосереджується на міцності, довговічності, теплоізоляційних характеристиках і функціональній придатності. Водночас недостатньо враховується теплова помітність зовнішніх поверхонь, що формується через різницю температур об'єкта і навколишнього середовища, високу емісійність матеріалів, нерівномірний нагрів та конструктивні вузли, які створюють локальні теплові контрасти [1–3].

У зеленому будівництві це питання має міждисциплінарний характер, поєднуючи теплофізику огорожувальних конструкцій, адаптивне проектування, низькоемісійні матеріали та стабілізацію зовнішнього теплообміну. Зниження теплової помітності слід розглядати не лише як захисну функцію, а як елемент комплексної інженерної стратегії підвищення функціональної стійкості об'єкта.

Необхідно враховувати нерівномірне нагрівання зовнішніх поверхонь під впливом сонячної радіації, вітру, вологості, тепловіддачі від внутрішніх джерел та особливостей конструктивних вузлів. Навіть прості конструкції формують виражені температурні неоднорідності, що впливають на енергоефективність і теплове поле. Тому керування емісійними та поверхневими характеристиками оболонки є важливим інженерним параметром для адаптивних захисних рішень.

Метою роботи є обґрунтування можливості застосування багатошарової адаптивної оболонки для зниження теплової помітності будівельних об'єктів, укриттів, тимчасових споруд та елементів оснащення

як складової сучасного зеленого будівництва та інженерного захисту.

Запропонований підхід базується на багатошаровій маскувальній конструкції, яку можна застосовувати як зовнішню накривну, екранувальну або монтажну оболонку для об'єктів, тимчасових споруд, модульних систем і мобільних пунктів. Така система поєднує візуальні, теплофізичні та функціонально-захисні властивості (рис. 1).

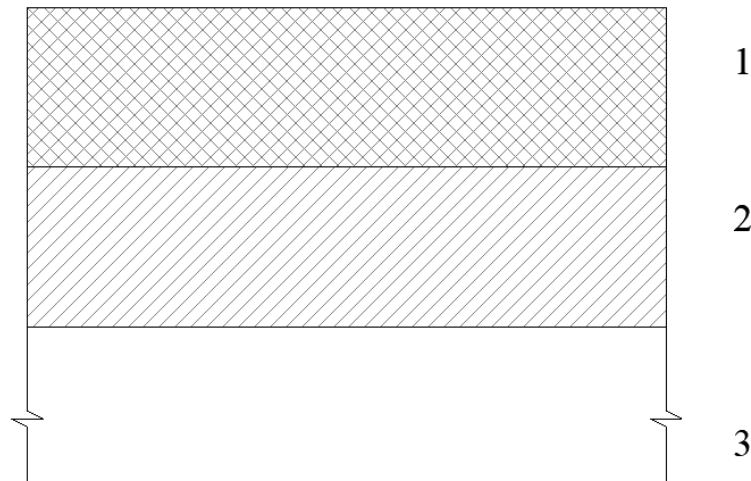


Рис. 1. Схема багатошарової маскувальної конструкції

Конструкція включає три основні шари:

1. Зовнішній адаптивний шар — формує поверхню, забезпечує візуальну інтеграцію та частково стабілізує теплообмін.

2. Проміжний низькоемісійний шар — зменшує інтенсивність інфрачервоного випромінювання, вирівнює поверхневе температурне поле.

3. Основний робочий шар — контактує з базовою конструкцією, забезпечує механічну стабільність і монтажну сумісність.

Ефективність такої багатошарової оболонки у значній мірі визначається теплофізичними характеристиками її матеріалів. Зокрема, проміжний низькоемісійний шар грає ключову роль у зниженні теплової помітності, адже саме фізичні властивості цього шару контролюють інтенсивність теплового випромінювання. Фізичну доцільність застосування проміжного шару пояснює закон Стефана–Больцмана, який описує залежність теплового потоку від емісійної здатності поверхні та її температури (формула. 1) [4]:

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T^4 - T_s^4)$$

де:

Q — тепловий потік об'єкта (Вт);

ε — емісійна здатність поверхні;

$\sigma = 5.670 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$ — стала Стефана–Больцмана;

A — площа об'єкта (м^2);

T — температура об'єкта (К);

T_s — температура навколишнього середовища (К).

З наведеного співвідношення випливає, що зменшення ϵ безпосередньо знижує тепловий потік від поверхні, вирівнює локальні температурні контрасти та підвищує ефективність маскування об'єкта. Водночас досягнення оптимального захисного ефекту забезпечується узгодженою роботою всіх шарів оболонки (табл. 1).

Таблиця 1

Функціональні характеристики основних елементів системи

Елемент системи	Конструктивне призначення	Теплофізична функція	Значення для об'єктів зеленого будівництва та цивільного захисту
Зовнішній адаптивний шар	Формує зовнішню поверхню оболонки	Частково стабілізує зовнішній теплообмін, забезпечує візуальну інтеграцію	Підвищує адаптивність споруди до умов ландшафту, будівельного майданчика або міського середовища
Проміжний низькоемісійний шар	Розміщується між зовнішнім і основним шарами	Зменшує емісійну здатність поверхні, знижує інтенсивність випромінювання	Знижує теплову помітність, зменшує локальні теплові контрасти, підвищує захищеність об'єкта
Основний робочий шар	Контактує з базовою конструкцією або несучою основою	Забезпечує стабільність системи та конструктивну сумісність	Дає змогу інтегрувати оболонку в укриття, тимчасові споруди, модулі та об'єкти реконструкції

Такий комплексний підхід дозволяє поєднувати фізичні властивості матеріалів із конструктивною адаптивністю оболонки, забезпечуючи стабільність та узгодженість функціонування зовнішнього, проміжного та основного шарів. Як результат, багатошарова оболонка не лише ефективно зменшує теплову помітність, а й підвищує стійкість об'єкта до змінних умов зовнішнього середовища.

Особлива цінність підходу проявляється під час монтажу, ремонту або реконструкції, коли об'єкт потребує тимчасового захисту та зниження контрастності зовнішніх поверхонь.

У контексті зеленого будівництва такі оболонки стабілізують температуру зовнішніх поверхонь, зменшують локальний перегрів і

підвищують стійкість до кліматичних та кризових впливів [1–3].

Використання багатошарових адаптивних оболонок із проміжним низькоемісійним шаром є перспективним напрямом розвитку інженерних рішень для укриттів, тимчасових споруд та мобільних модулів. Системи знижують локальні теплові контрасти, інтенсивність інфрачервоного випромінювання та розширюють функціональні можливості захисної інфраструктури.

У поєднанні з цифровими інструментами інженерного супроводу та базами інженерних даних підхід забезпечує цілісне врахування конструктивних, теплофізичних та еко-енергетичних параметрів при проектуванні і функціональній адаптації об'єктів.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Київ: Міністерство розвитку громад та територій України, 2022.
2. Іваненко О., Петренко М. Методи маскування об'єктів у видимому та інфрачервоному спектрах. Вісник військових технологій. 2022;3:45-52.
3. ДСТУ Б В.2.6-189:2013. Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. Київ: Мінрегіон України, 2014.
4. Ландау Л.Д., Ліфшиц Е.М. Теоретична фізика. Теплопередача. М.: Наука; 2019.

ФОНОВИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРІНГ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО ЗЕЛЕНОГО БУДІВНИЦТВА

Христина Дяченко¹, Юлія Березницька¹

¹Київський національний університет будівництва і архітектури

Вступ

Сучасні міста розвиваються дуже швидко, і будівництво відіграє в цьому ключову роль. Однак разом із розвитком зростає і навантаження на довкілля: погіршується якість повітря, збільшується рівень шуму, змінюється мікроклімат територій. У відповідь на ці виклики з'явилась концепція зеленого будівництва, яка передбачає створення будівель з мінімальним впливом на навколишнє середовище. Але для того, щоб будівля дійсно була “зеленою”, недостатньо лише використовувати сучасні матеріали або енергоефективні технології. Важливо враховувати початковий стан території.

Саме тут важливу роль відіграє фоновий екологічний моніторинг. Він дозволяє визначити базові показники довкілля до початку будівництва і надалі оцінити, чи покращилась ситуація, чи навпаки.

Метою роботи є показати, як фоновий моніторинг впливає на якість зеленого будівництва та чому його необхідно інтегрувати у сучасні

будівельні проєкти.

Теоретичні аспекти фонового екологічного моніторингу

Екологічний моніторинг - це система спостереження за станом довкілля. Його головна задача - виявляти зміни та оцінювати вплив різних факторів.

Фоновий моніторинг є важливою частиною цієї системи. Він дозволяє визначити стан довкілля до початку будь-якої діяльності, наприклад будівництва.

Його особливість полягає в тому, що він дає “відправну точку”, з якою можна порівнювати всі подальші зміни.

Під час моніторингу оцінюються наступні параметри:

- ✓ якість повітря;
- ✓ рівень шуму;
- ✓ стан ґрунтів;
- ✓ водні ресурси;
- ✓ мікроклімат.

Такий підхід надає можливість комплексно оцінити досліджувану територію [1].

Роль моніторингу у зеленому будівництві

Фоновий екологічний моніторинг є одним із ключових елементів зеленого будівництва. Він формує основу для прийняття обґрунтованих екологічних рішень на всіх етапах реалізації будівельного проєкту. Застосування фонового моніторингу дозволяє більш точно оцінити придатність території для забудови, своєчасно виявити можливі екологічні ризики та врахувати їх у процесі проєктування. Це дає можливість адаптувати будівельні рішення до конкретних умов середовища та зменшити негативний вплив на довкілля. Наприклад, у разі підвищеного рівня шуму або забруднення атмосферного повітря на території ці фактори повинні враховуватися ще на етапі проєктування шляхом застосування відповідних архітектурних і технічних рішень.

Таким чином, зелене будівництво слід розглядати не лише як впровадження сучасних технологій, але і як процес, що базується на глибокому аналізі стану довкілля та його особливостей [2].

Ключові екологічні показники фонового моніторингу

В таблиці 1 [5] наведено основні показники фонового моніторингу довкілля, за якими здійснюється контроль.

Таблиця 1

Основні показники моніторингу

Показник	Що оцінюється	Значення для будівництва
Повітря	PM2.5, CO ₂	Вплив на здоров'я
Шум	дБ	Комфорт проживання
Ґрунт	забруднення	Безпечність території

Показник	Що оцінюється	Значення для будівництва
Вода	якість	Екологічна стабільність
Мікроклімат	температура	Енергоефективність

Сучасні технології та smart-підхід

У сучасних умовах екологічний моніторинг виходить на новий рівень розвитку завдяки впровадженню інноваційних технологій. Активно застосовуються датчики якості повітря, системи контролю концентрації CO₂, автоматизовані системи вентиляції, а також IoT-рішення, що забезпечують збір і обробку даних у режимі реального часу.

Особливого поширення набуває концепція «розумних будівель», у яких параметри внутрішнього середовища регулюються автоматично залежно від поточного стану довкілля. Такі системи дозволяють оперативно реагувати на зміни екологічних показників і підтримувати оптимальні умови для перебування людини.

Використання сучасних технологій у сфері екологічного моніторингу сприяє зменшенню енергоспоживання, підвищенню рівня комфорту та покращенню якості життя населення. Крім того, це забезпечує більш ефективне управління ресурсами та знижує негативний вплив будівель на навколишнє середовище [3-5].

Порівняння екологічного моніторингу в Україні та ЄС

Було проведено порівняльний аналіз підходів до екологічного моніторингу, який наведено в таблиці 2.

Було встановлено, що в країнах ЄС екологічний моніторинг є обов'язковим елементом будівництва та здійснюється з використанням сучасних технологій. В Україні ця система потребує подальшого розвитку, зокрема у напрямі цифровізації та інтеграції у процес проектування.

Важливою особливістю є широке застосування автоматизованих систем моніторингу, які забезпечують безперервний контроль основних екологічних показників, таких як якість атмосферного повітря, рівень шуму, температурні умови та вологість. Використання таких технологій дозволяє оперативно виявляти відхилення від нормативних значень і своєчасно впроваджувати заходи з їх усунення.

Таблиця 2

Порівняння екологічного моніторингу

Показник	Україна	ЄС
Фоновий моніторинг	використовується частково, має розгалужену багатокomпонентну структуру, функціонування та результативність якої складно відслідкувати	обов'язковий

Показник	Україна	ЄС
Технології	частково обмежені через недостатність державного фінансування	сучасні (smart)
Контроль за виконанням	періодичний	постійний
Сертифікація	на даний момент не системна, для будівель житлового та виробничого фонду з довгим терміном експлуатації використовується рідко	активно використовується для будівель всіх термінів експлуатації

Крім того, у країнах ЄС значну роль відіграють системи екологічної сертифікації будівель, зокрема LEED та BREEAM, які встановлюють чіткі вимоги до врахування екологічних показників на всіх етапах реалізації будівельних проєктів. Це сприяє підвищенню рівня екологічної відповідальності забудовників і забезпечує комплексний підхід до оцінки впливу будівництва на довкілля.

В Україні система екологічного моніторингу перебуває на стадії розвитку та характеризується недостатнім рівнем інтеграції у процес проєктування і будівництва. У більшості випадків моніторинг має епізодичний характер і не забезпечує безперервного контролю екологічних параметрів, що знижує ефективність природоохоронних заходів.

Таким чином, для підвищення рівня сталості будівельної галузі в Україні доцільним є впровадження сучасних цифрових технологій моніторингу, розвиток автоматизованих систем контролю та розширення застосування міжнародних стандартів екологічної сертифікації [3-4].

Висновки

У ході дослідження встановлено, що фоновий екологічний моніторинг є важливим інструментом оцінки стану довкілля та забезпечення екологічної безпеки будівництва. Його використання дозволяє обґрунтовано приймати проєктні рішення та мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище. Порівняння з країнами ЄС показало вищий рівень інтеграції моніторингу у будівельну практику, що досягається завдяки використанню сучасних технологій і систем сертифікації.

Таким чином, впровадження комплексного екологічного моніторингу є необхідною умовою розвитку зеленого будівництва в Україні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бобровський О.О. Екологічний моніторинг навколишнього середовища. - Київ: Либідь, 2020.
2. European Commission. Level(s): A common EU framework for sustainable buildings. - Brussels, 2022.

3. World Green Building Council. Global Status Report for Buildings and Construction. - 2023.
4. European Environment Agency. Air Quality in Europe Report. - 2023.
5. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція будівель

ЗАХОДИ З ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА БІОСФЕРНОЇ СУМІСНОСТІ ВНУТРІШНЬОБУДИНКОВИХ СИСТЕМ ГАЗОПОСТАЧАННЯ

Костянтин Предун¹, Віталій Ейсмонт¹

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
predun.km@knuba.edu.ua, eismont_vs-2024@knuba.edu.ua*

Теорія «сталого розвитку» [1] вважається однією з найперспективніших ідеологій ХХІ століття. Ідеї сталого розвитку були офіційно проголошені на Міжнародній конференції з довкілля і розвитку в Ріо-де-Жанейро (Саміт Землі) у 1992 р. [2]. На ній вперше навколишнє середовище і соціально-економічний розвиток були розглянуті як взаємопов'язані та взаємозалежні області.

Концепція сталого розвитку нараховує 17 Глобальних цілей, затверджених на Саміті ООН зі сталого розвитку, який відбувся у рамках 70-ї сесії ООН у Нью-Йорку в 2015 р. [1]. Серед них можна відмітити такі:

- Ціль 7 «Доступна та чиста енергія», мета якої полягає у забезпеченні доступу людства до прийнятних за ціною, надійних, сталих і сучасних, екологічно чистих, джерел енергії;
- Ціль 12 «Відповідальне споживання та виробництво» має забезпечити перехід до раціональних моделей споживання і виробництва;
- Ціль 13 «Пом'якшення наслідків зміни клімату» передбачає створення та вжиття невідкладних заходів щодо боротьби зі зміною клімату та її наслідками.

Україна, уклавши Угоду про асоціацію з Європейським Союзом [3], прийняла історичне рішення щодо пріоритетів свого розвитку. Дане рішення зумовлює не тільки появу низки зобов'язань, які мають бути у повній мірі відображені у пріоритетах соціально-економічного розвитку країни, а зумовлює необхідність зміни підходів до формування нашої державою своєї енергетичної політики, яка покликана забезпечити потреби суспільства та економіки в паливно-енергетичних ресурсах у технічно надійний та безпечний, економічно ефективний, екологічно прийнятний спосіб для гарантування поліпшення умов життєдіяльності своїх громадян.

Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» [4] встановив пріоритетність заходів щодо забезпечення енергетичної ефективності будівель:

- 1) підвищення теплотехнічних показників огорожувальних конструкцій

будівель;

2) встановлення засобів обліку та регулювання споживання енергетичних ресурсів;

3) впровадження автоматизованих систем моніторингу і управління;

4) модернізації систем опалення, вентиляції, гарячого водопостачання та освітлення;

5) використання відновлюваних та/або альтернативних джерел енергії та/або видів палива (з використанням інженерного обладнання, яке розміщене в межах будівлі, прибудованих до неї приміщеннях та на прибудинковій території);

6) встановлення систем акумуляційного електронагріву;

7) здійснення інших заходів із підвищення енергоефективності будівель.

Для підвищення енергоефективності та біосферної сумісності внутрішньобудинкових систем газопостачання як одного із ключових елементів інженерної енергетичної інфраструктури населених пунктів можна запропонувати наступний інструментарій:

1. Додаткова теплоізоляція зовнішніх огорожень будівлі з метою підвищення опору теплоізоляції існуючих будівельних зовнішніх огорожень до рівня вимог ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель» [5] – гарантуватиме зменшення теплової потужності теплогенеруючих установок, які встановлені для забезпечення нормованих параметрів повітряного середовища у приміщеннях будівель і споруд різного призначення в холодний період року, а отже і витрати природного газу для потреб теплопостачання.

Аналіз результатів, вказаних у табл.1, засвідчує що за останні 35 років в Україні за рахунок вдосконалення нормативних документів щодо вимог до теплоізоляційних властивостей зовнішніх огорожень втрати теплоти можуть бути зменшені в межах 1,56-5,94 раз, що значно перевищує аналогічну динаміку змін у Фінляндії. При чому, основне збільшення припало на зовнішні стіни (у 5,33 рази) як найбільший за площею структурний елемент зовнішньої оболонки будь-якої будівлі, а також на горищні перекриття (у 5,94 раз) як на огорожувальну конструкцію з найбільшими емісійними тепловтратами.

Таблиця 1

Динаміка змін теплозахисних властивостей зовнішніх огорожень в Україні (на прикладі І температурної зони)

Вид зовнішнього огороження	Значення коефіцієнтів опорів теплопередачі, $\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$ у році:				Динаміка змін
	1990	2006	2016	2022	
Зовнішні стіни	0,75	2,80	3,30	4,00	5,33

Вид зовнішнього огородження	Значення коефіцієнтів опорів теплопередачі, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ у році:				Динаміка змін
	1990	2006	2016	2022	
Світлові прорізи	0,34	0,60	0,75	0,90	2,65
Горищне перекриття	1,01	4,95	4,95	6,00	5,94
Перекриття підвальне	1,68	2,80	3,75	5,00	2,98
Двері	0,45	0,60	0,6	0,70	1,56

2. Встановлення інтелектуальних лічильників для обліку кількості спожитого палива в одиницях енергії, що виключає будь-яке стороннє втручання щодо збору, передачі даних (відпадає необхідність у щомісячному коригуванні показів шляхом введення коефіцієнтів, величина яких залежить від середньомісячної температури зовнішнього повітря), тобто забезпечується достовірність показів. Пропоновані лічильники легко можуть бути інтегровані в системи обліку природного газу загалом в населеному пункті [6].

3. Заміна існуючих опалювальних котлів/апаратів на сучасні, за рахунок чого підвищується коефіцієнт використання природного газу (підвищується енергоефективність), зменшуються викиди продуктів згорання (забруднюючих речовин – оксидів вуглецю і азоту, парникових газів – діоксиду азоту, метану, діазоту оксиду) в атмосферне повітря (система енергопостачання більш біосферосумісною).

Використання альтернативних палив – відходів підприємств агропромислового комплексу, деревообробних підприємств тощо – можливе, але потребує відповідного обґрунтування (відбувається заміна централізованої системи газопостачання населеного пункту на автономну/індивідуальну з нетрадиційними паливами) для використання у кожному будинку [7]. Така заміна актуальна для підприємств комунальної теплоенергетики, сільськогосподарських тощо.

4. Заміна існуючих побутових газових плит (коефіцієнт корисної дії – к.к.д. – не перевищує 60 %), встановлених для задоволення господарсько-побутових потреб мешканців, індукційними електричними (к.к.д. – не менше 90 %). Перевагами останніх є зменшення приблизно у 2 рази споживання енергії, котра використовується безпосередньо для нагрівання страви, а не збільшує температуру навколишнього середовища – приміщення кухні), а отже і забруднення довкілля. Особливо, якщо генерується енергія з альтернативних джерел [8]. Окрім того, електричні плити (ПЕ) значно екологічніші – вони не спалюють кисень (для спалювання 1 м^3 природного газу орієнтовно потрібно не менше 9 м^3

зовнішнього повітря [9]).

Автовимкнення ПЕ робить користування безпечним та заощаджує енергію. Ця функція автоматично вимикає варильну робочу поверхню, коли її не використовують протягом певного періоду часу, що дозволяє уникнути можливих неприємностей тощо, а також надмірного споживання енергії. Аналогічну функцію у побутових газових плит забезпечує наявність автоматики типу «газ-контроль».

Автоматична періодичність роботи індукційної електроплити (на відміну від газової), використовуючи акумулюючу здатність посуду, робочої поверхні тощо, сприяє також зменшенню енергоспоживання приблизно у 2 рази.

5. Заміна (при відповідному обґрунтуванні) існуючої системи водяного опалення, як правило, з природною циркуляцією теплоносія і металоємними опалювальними приладами – чавунними секційними радіаторами на газову з встановленням у кожному приміщенні газових конвекторів з герметичною топкою для згоряння палива підвищує коефіцієнт використання енергії, сприяє кращому регулюванню теплопродуктивності, підтримує роботоздатність і експлуатаційну надійність системи теплозабезпечення.

Таким чином, реалізація запропонованих заходів дозволить підвищити експлуатаційну надійність, економічність і екологічну безпечність внутрішньо будинкових систем газопостачання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сталий розвиток. URL:https://uk.wikipedia.org/wiki/Сталий_розвиток (дата звернення 08.05.2026).
2. Цілі сталого розвитку. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Цілі_сталого_розвитку (дата звернення 08.05.2026).
3. Угода про Асоціацію між Україною та Європейським союзом. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Угода_про_асоціацію_між_Україною_та_Європейським_Союзом (дата звернення 08.05.2026).
4. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України. – 2118-VII. – Київ: ВВР, 2017, №3, с.5, стаття 359.
5. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. – Київ: Мінрегіон України, 2022. – 23 с.
6. Predun K., Obodyanska O., Franchuk U. Principal content and methodology modernization of organizational and engineering design and exploitation regulations for locality GDS / K. Predun, O. Obodyanska, U. Franchuk // Paradigm of Knowledge. Multidisciplinary Scientific Journal. – No. 2 (34), 2019. – p.74-92.
7. Предун К.М. Інноваційні технології проектування та експлуатації систем енергопостачання в контексті світових екологічних проблем / К.М. Предун // Екологічні науки: наук.-практ. журнал. – Київ, 2019. – №3(26). – С. 125-131.

8. Про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії: Закон України. – Відомості Верховної Ради (ВВР), 2019, №23, ст. 89.

9. Ткаченко В.А., Скляренко О.М. Газопостачання: підручник. – Київ: ІВНВКП «Укреліотех», 2012. – 588 с.

ЗАХОДИ З ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА БІОСФЕРНОЇ СУМІСНОСТІ ГАЗОРОЗПОДІЛЬНИХ СИСТЕМ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ

Костянтин Предун¹, Ольга Почка¹

¹Київський національний університет будівництва і архітектури,

¹predun.km@knuba.edu.ua, pochka.ob@knuba.edu.ua

Протягом усього часу існування людства його взаємодія з навколишнім середовищем характеризується використанням природних ресурсів і, відповідно, як наслідок, забрудненням довкілля. Відносини суспільства і природи – це постійний процес вирішення дилеми щодо необхідності зберігати природні ресурси та їх споживати задля продовження свого існування. Раціональне природокористування покликано забезпечити розвиток сучасного суспільства за умови збереження високої якості середовища проживання людини [1].

Системи газопостачання [2] є важливою складовою інженерної інфраструктури населених пунктів. Значна частина існуючих газорозподільних мереж потребує модернізації у зв'язку з фізичним та моральним зносом обладнання. Водночас актуальним є зменшення негативного впливу зазначених систем на навколишнє природне середовище [3].

Для підвищення енергоефективності та біосферної сумісності газорозподільних систем населених пунктів, розташованих у сільській місцевості, можна запропонувати наступні рішення:

1. Заміна матеріалу газопроводів

Існуюча газорозподільна система [2], як правило, двоступенева: газопроводи середнього і низького тисків газу з використанням сталевих електрозварних прямошовних труб. Основний спосіб прокладання територією населеного пункту – підземний – потребує захисту мереж і споруд на них від корозії як пасивного (нанесення захисного покриття), так і активного (формування приладовими способами напрямку руху електричного струму). Заміна сталевих труб на поліетиленові (ПЕ) дозволяє відмовитись від цих заходів. Як наслідок, гарантійний термін служби газорозподільних мереж, виконаних із поліетиленових труб, – 50 років – приблизно у 2 рази перевищує аналогічний показник для сталевих –

становить 20-25 років до капітального ремонту.

Окрім того, еквівалентна абсолютна шорсткість стінки ПЕ труби $n_{ПЕ}=0,002$ см є меншою приблизно у 5 раз порівняно зі сталевими трубами: $n_{СТ}=0,01$ см [4]. З плином часу величина шорсткості стінки ПЕ труби зменшується, а сталевій – зростає. Таким чином, пропускна здатність ПЕ труби порівняно зі сталевією аналогічного діаметру є дещо вищою (до 10 %) при усіх інших однакових умовах – перепаді тисків на вході/виході із труби, довжині відрізка тощо.

Аналіз техніко-економічних показників труб для прокладання зовнішніх газорозподільних мереж показав, що система із поліетиленових труб діаметром до 100 мм є дешевшою за аналогічну із сталевих (враховано вартість матеріалів, виконання будівельно-монтажних робіт).

2. Відмова від двоступеневої газорозподільної системи і заміна на одноступеневу середнього тиску газу із встановленням будинкових регуляторів тиску газу [2].

У сільській місцевості при проектуванні газорозподільних систем мережного природного газу характерні невеликі значення максимально-годинних витрат палива на розрахункових ділянках при достатньо значній довжині. Максимальний діаметр газопроводів, як правило, за результатами виконаних гідравлічних розрахунків з використанням пакету прикладних програм «HYDRA» не перевищує 100 мм як для систем низького тиску газу, так і середнього. Відповідно, заміна двоступеневої газорозподільної системи одноступеневою дозволить практично у 2 рази зменшити її матеріалоємність. Експлуатаційні витрати також зменшуються. А з виготовленням матеріалів і обладнання нерозривно пов'язані і витрати енергії на виробництво і, відповідно, забруднення навколишнього природного середовища.

3. Використання альтернативних палив

Гази біологічного походження (біогази) відомі людству ще з давніх часів. Їх використовували і продовжують наразі використовувати переважно в густонаселених країнах з теплом кліматом, зокрема в Китаї та Індії. А останнім часом – і у державах Європейського Союзу. Біогаз відноситься до поновлюваних джерел енергії, тому з вичерпанням природних органічних палив – природного газу, нафти, вугілля тощо виробництво і використання горючих газів штучного походження є актуальною проблемою сьогодення.

В Україні згідно з даними статистичних спостережень [5] із понад щорічних приблизно 13,5 млн. т утворених сільськогосподарських відходів наймасовішими є:

- 1) відходи рослинного походження (7742 тис. т або 57 %);
- 2) тваринні екскременти, сечовина і гній (4938 тис. т або 37 %);
- 3) відходи тваринного походження та змішані харчові відходи (897 тис. т або 6 %).

Якщо порівняти фізико-хімічні властивості біогазу з вимогами до якості природних газів, встановлених, наприклад, Кодексом газотранспортної системи [6], то без додаткового очищення біогазу непридатні як до транспортування існуючими мережами, так і використання традиційним газовим обладнанням. У світовій практиці відомі різні способи застосування таких біогазів, починаючи від елементарного факельного спалювання безпосередньо на місці генерації без утилізації теплоти продуктів спалювання до суттєвого очищення з доведенням вмісту метану до 90-95 % (т. зв. біометан) або виробництва товарної вуглекислоти [7]. Наразі, в Україні в умовах часткового знищення газової інфраструктури використання біогазів, доочищених до рівня біометану, дозволить уникнути аварійної зупинки газотранспортної і газорозподільної систем, забезпечить кінцевих споживачів блакитним паливом.

В Україні електроенергію з біогазу виробляють наразі 73 установки сумарною потужністю 124 МВт (за даними Біоенергетичної асоціації України [8]). Відпускна ціна електроенергії (за «зеленим» тарифом) – близько 12,4 євроценти за кВт-год. Від початку повномасштабної війни з російською федерацією держава не у повній мірі виплачує виробникам кошти – лише приблизно 40 % тарифу за довоєнним курсом. Отриманих грошей не вистачає, щоб покривати витрати на сировину, виплачувати кредити тощо. Відповідно, єдиний вихід – якомога швидше перейти на виробництво біометану. На відміну від електроенергії, отриманої з біогазу, ціна біометану не регулюється державою, а дорівнює ціні природного газу, яка на рекордно високому рівні.

За даними біоенергетичної асоціації України вартість нового заводу потужністю 10 млн. м³біометану на рік становить до €16 млн. Вартість дооснащення діючої біогазової станції аналогічної потужності модулем із виробництва біометану значно менша – приблизно €5 млн.

Загалом потенціал України з виробництва біометану становить близько 10 млрд. м³/рік. Це третина довоєнного споживання газу в Україні. Найбільш перспективні Вінницька, Київська, Черкаська, Полтавська, Дніпропетровська та Донецька області. Україна зможе реалізувати цей потенціал, але в довгостроковій перспективі, не раніше 2030 р. [8].

По закінченню війни аналітики прогнозують бум будівництва нових потужностей із виробництва біометану, який зараз спостерігається в Європі. Наприклад, у Франції щотижня здається в експлуатацію новий біометановий завод.

За підсумками 2025 р. сумарно в Україні вироблено приблизно 0,1 млрд. м³ біометану. Використання отриманого таким чином палива дозволяє при відповідному обґрунтуванні повністю або частково закрити потреби у мережному природному газі, наприклад, у теплий період року окремих категорій споживачів. Окрім того, біометанові заводи – це децентралізація

джерел постачання палива. Відповідно, це підвищує експлуатаційну надійність енергопостачання як населених пунктів, так і окремих об'єктів [9].

Наразі Україна, незважаючи на повномасштабну агресію російської федерації, реалізує свій стратегічний курс – набуття повноправного членства у Європейському Союзі, що окрім іншого передбачає декарбонізацію економіки (підвищення енергоефективності, утилізація накопичених відходів, розвиток відновлюваних джерел енергії й циркулярної економіки та синхронізацію із ініціативою «Європейський Зелений Курс»). Задекларувавши відданість принципам сталого розвитку Україна визнала, що освоєння відновлюваних джерел енергії, зменшення споживання традиційних органічних палив тощо є важливими факторами підвищення рівня енергетичної безпеки та зниження антропогенного впливу економіки на навколишнє природне середовище.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сталий розвиток. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Сталий_розвиток (дата звернення 20.04.2026).
2. Єнін П.М., Шишко Г.Г., Предун К.М. Газопостачання населених пунктів і об'єктів природним газом: навч. посібник. – Київ: Логос, 2002. – 198 с.
3. Погані новини. Більшість кліматологів прогнозують, що темпи глобального потепління перевищать цілі Паризької угоди. URL: <https://techno.nv.ua/ukr/popscience/u-nayblizhchi-20-rokiv-70-naselennya-planeti-vidchuye-na-sobi-zmini-klimatu-50451143.html> (дата звернення 12.04.2026).
4. ДБН В.2.5-20-2018. Газопостачання (з урахуванням зміни №1) / Мінрегіон України. – Київ: Мінрегіон України, 2019. – 113 с. – Чинні з 01.07.2019.
5. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року: схвалено розпорядженням КМУ від 8 листопада 2017 р. № 820-р. – Редакція від 17.09.2020, підстава – 826-2020-п. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80/print> (дата звернення: 10.04.2026).
6. Кодекс газотранспортної системи. Документ z1378-15, чинний, поточна редакція. – Редакція від 15.09.2025, підстава - v1182874-25. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1378-15#Text> (дата звернення: 20.11.2025 р.).
7. П'ятничко О.І., Жук Г.В., Гриценко А.В. та інш. Досвід утилізації звалищного газу в енергетичних установках в Україні: Монографія. – Київ: Аграр Медіа Груп, 2015. – 126 с.
8. Заміна природному газу. Хто і як будують біометанові заводи в Україні і чи варто інвестувати цей бізнес. URL: <https://forbes.ua/money/v-ukraini-zyavlyayutsya-pershi-biometanovi-zavodi-chi-varto-investuvati-v-tsey-biznes-i-skilki-mozhna-zarobiti-30092022-8713> (дата звернення: 20.03.2026).

9. Kostiantyn Predun, Svitlana Rubtsova, Olha Pochka, Vitalii Eismont
Increasing the reliability of energy supply in Ukraine. Вентиляція, освітлення
та теплогазопостачання. – 2025. – Вип. 55. – С. 66-78. DOI:
<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.55>.

РЕЦИКЛІНГ КЕРАМІЧНИХ БУДІВЕЛЬНИХ ВИРОБІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ОСНОВНИХ ПРИНЦИПІВ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ

*Катерина Пушкарьова¹, Марина Кочевих¹, Ольга Гончар¹, Іван
Семенюк¹*

*¹Київський національний університет будівництва та архітектури
pushkarova.kk@knuba.edu.ua, kochevykh.mo@knuba.edu.ua,
gonchar.oa@knuba.edu.ua, semeneuk_io-2025@knuba.edu.ua*

Відновлення України – це не лише відбудова зруйнованого, а й можливість створення нової інфраструктури, що базується на принципах сталості, інновацій та відповідального ставлення до ресурсів [1]. Станом на початок 2025 року в Україні зруйновано або пошкоджено понад 200 млн м² житлової та цивільної нерухомості. Це величезний обсяг будівельного сміття, який у мирних умовах формувався б протягом десятиліть. Внаслідок масштабних руйнувань інфраструктури під час війни Україна зіткнулася з гострою проблемою утилізації та використання будівельного сміття, обсяг якого постійно збільшується, що зумовлює істотне погіршення стану довкілля та умов проживання населення [2]. Керамічні продукти руйнування будівель є потенційної вторинною сировиною, що може бути використана для нових інфраструктурних проєктів, а їх переробка є важливим елементом екологічного управління в будівельній галузі [3].

Циркулярна економіка - альтернативна модель розвитку, спрямована на усунення відходів, відновлення природи та підтримання цінності матеріалів і продуктів у безперервному циклі. Циркулярна економіка базується на виключенні відходів і забруднень, максимальному використанні ресурсів за рахунок повторного використання і переробки та відновленні природи [4].

Вторинна керамічна сировина представлена переважно боєм цегли і каміння, облицювальних виробів для стін та підлог глазурованих та неглазурованих, а також санітарно-технічної продукції. Серед керамічних продуктів руйнування переважає бій цегли, який за належної обробки можна віднести до сипких зернистих матеріалів із розміром зерен понад 5 мм. Підготовка керамічного бою до використання передбачає очищення вихідного матеріалу від непотрібних включень, включаючи ґрунт, двох стадійного подрібнення і розсіву на фракції: крупну – 40...100 мм, середню – від 20 до 40 мм та дрібну – менше 20 мм. Додатково отримують продукти відсівання з розміром зерен 0...10 мм, а також суміш фракцій розміром

0...100 мм або 0...300 мм.

Такий вторинний матеріал має технічні та експлуатаційні властивості первинного матеріалу і в сипкому стані характеризується достатньо високою міцністю, гарними тепло- та звукоізоляційні властивостями, стійкістю до перепадів температур. Вторинний продукт характеризується достатньою пористістю (водопоглинання 8...16%), що забезпечує коефіцієнт теплопровідності 0,29...0,35 Вт/(м·К) (у випадку, якщо первинним продуктом є поризована цегла або камінь з середньою густиною до 1400 кг/м³). Він також забезпечує гарні показники шумопоглинання. Це визначає можливість його використання як звуко- і теплоізоляційної засипки для міжповерхових перекриттів та горищ, в тому числі дерев'яних, в тришарових конструкція стін (як альтернативу керамзиту), для створення вирівнювального теплоізоляційного шару (суха стяжка) перед укладанням фінішного покриття підлоги. Подрібнений матеріал фракції 0...20 мм або 20...40 мм використовують для заповнення порожнин у колодязній кладці або гіпсокартонних конструкціях стін та перегородок для покращення акустичного комфорту.

Залежно від вихідних виробів (повнотіла цегла або великоформатний камінь), вторинний щебінь витримує навантаження, які еквівалентні міцності виробу від 7,5 до 10 МПа. Морозостійкість становить 15 циклів. Насипна густина залежно від фракції та виду вихідного матеріалу становить 700...1300 кг/м³, що зменшує масу конструкції і навантаження на фундамент. Вторинний продукт як й вихідний матеріал, здатний витримувати дію високих температур (до 1000°C) під час пожежі без руйнування та виділення токсичних речовин.

Проте цей матеріал має низку суттєвих обмежень та недоліків: низьку морозостійкість – внаслідок наявності відкритої пористості матеріал достатньо швидко руйнується при багаторазовому заморожуванні та відтаванні, а бетон на основі вторинного керамічного заповнювача характеризується підвищеним водопоглинанням [5]. Такий щебінь має підвищену крихкість і не витримує високих навантажень, тому його не можна використовувати для відповідальних конструкцій. Треба враховувати, що рециклінговий щебінь часто містить залишки гіпсу, штукатурки, бетону, які можуть викликати хімічні реакції, які руйнують цементний камінь. Тому такий заповнювач не використовують для фундаментів, а найчастіше - для ненавантажених бетонних елементів та стяжок, також застосовується для заповнення пазух фундаменту, траншей та підсипки під бетонну стяжку.

Для отримання якісного щебеню з керамічного бою необхідні технологічні процеси сортування, чищення, подрібнення. В Україні, попри наявність потенціалу та потребу у відновленні, існує дефіцит спеціалізованих потужностей для переробки будівельних відходів у промислових масштабах [2]. Тому на цей час слід розглядати доцільні галузі застосування вторинного керамічного продукту з мінімальними витратами

на процес його переробки [4].

Нефракціонований керамічний бій доцільно застосовувати для влаштування шарів основи та покриття дорожнього одягу, у вигляді базового (чорнового) шару для підсипки доріг, під'їзних шляхів та стоянок, а також для укріплення ґрунтових і лісових доріг, підняття ділянки, як матеріал для влаштування дренажних систем у заболочених районах. Фракціонований бій (фракції 40...70 мм) завдяки високій міцності застосовують для створення нижніх шарів дорожнього полотна, тимчасових під'їзних шляхів та зміцнення слабких ґрунтів.

Дрібні та середні фракції (5...40 мм) вторинного продукту використовуються як бюджетний дренажний шар для відведення ґрунтових вод, при створенні пристінного дренажу фундаменту та земельної ділянки – для зсипання траншей, а також при створенні дренажних шарів навколо перфорованих зливових труб. Матеріал можна застосовувати як водопроникну основу для садових доріжок, яка запобігає спученню ґрунту. Слід звернути увагу на обмеження застосування в умовах суворого клімату – внаслідок достатньо високої відкритої пористості керамічного матеріалу і невисокої морозостійкості відбувається поступове його руйнування і втрата форми. Цегляний бій може підвищувати рН ґрунту (робити його лужним), що може негативно впливати на деякі рослини. Для влаштування якісного дренажу слід використовувати вторинний продукт розмірами 20...40 мм, очищений від залишків цементного розчину і будівельного сміття, також дренажний шар слід обгортати геотекстилем з оптимальною щільністю 150...200 г/м².

Застосовують керамічні продукти руйнування для декоративних засипок у ландшафтному дизайні, для облаштування садових доріжок, оформлення клумб, штучних водойм, для заповнення габіонних конструкцій різного призначення [6]. Завдяки яскравому кольору, цегляний бій застосовується для оформлення фасадів будівель (як основа мозаїки, декоративних панно), як мульчуючий матеріал (для захисту від пересихання, перегріву та покращення структури ґрунту) при створенні квітників, альпійських гірок, а також при формуванні габіонів для зонування ландшафту.

Габіонні конструкції коробчастої форми, які складаються з металевої або полімерної сітки і заповнені каменем, є поширеним способом утилізації будівельних відходів та створення декоративних і функціональних елементів ландшафтного дизайну. Заповнювач конструкції у вигляді бою цегли забезпечує необхідну для стійкості масу та структуру габіону, є альтернативою дорогому природному каменю, особливо при створенні невисоких огорож, декоративних стін із забезпеченням нестандартного колірного акценту у ландшафті. Зазвичай цегляний бій використовують у поєднанні з іншими матеріалами або як основний наповнювач у декоративних габіонах. Для запобігання усадці та

деформації конструкції, особливо при використанні дрібного бою, рекомендується застосовувати геотекстиль. Застосування бою цегли (цегляного щебеню) в габйонних конструкціях допускається переважно для декоративних цілей, ландшафтного дизайну, підпірних стін невеликої висоти або як заповнювач внутрішньої частини габйону (ядро), тоді як зовнішній шар формується з міцнішого каменю. Використання цегли вимагає суворого дотримання вимог щодо міцності та розміру, щоб уникнути руйнування конструкції. Міцність вихідного випаленого керамічного матеріалу має бути не менше 7,5 МПа, він має бути водостійким та очищеним від залишків розчину, ґрунту та пилу. Оптимальним є розмір шматків 100...250 мм, мінімальним – в 1,3...1,5 разів більше ніж розмір комірки сітки. Дрібніші уламки (менше 80 мм) використовують для заповнення пустот у середині, але не більше 10-15% від загального обсягу, щоб уникнути просідання. Для габйонів найкраще підходять плоскі уламки цегли, оскільки вони утворюють більш щільну кладку, ніж округлі шматки. Рекомендується використовувати для створення декоративних парканів, підпірних стін (висотою до 1...1,5 м), зміцнення ґрунту, а також для зонування території. Не слід використовувати бій цегли для габйонів, що працюють у воді (берегоукріплення), оскільки цегла має обмежений термін служби при постійному контакті з водою.

Бій керамічної плитки, що за походженням відноситься до будівельного (демонтажного) і представлений шматками плитки з цементно-піщаним розчином та клеєм може бути не тільки будівельним відходом, але й одночасно специфічним матеріалом для декору [7]. Залежно від виду первинного продукту він може бути представлений керамогранітом (низьке водопоглинання – менше 0,5%, висока густина, морозостійкість, міцність) та білою або червоною глазурованою плиткою, що має пористість 10-16%. У разі повторного використання бою керамічної плитки враховуються такі параметри як розмір шматків - дрібна фракція підходить для художньої мозаїки, велика — для мощення доріжок; клас зносостійкості (залежить від вихідного матеріалу) - керамограніт зберігає стійкість до стирання – PEI від I до V. Водопоглинання та морозостійкість є важливими для зовнішніх робіт. Наявність глазури не тільки визначає колірну гаму, але й стійкість поверхні до хімічних речовин та ультрафіолету.

При декоруванні та дизайні, бій керамічної плитки залежно від характеристик знаходить наступне застосування: шматочки пошкодженої плитки використовують для створення мозаїки на стінах, для часткового ремонту або створення акцентних зон на стінах вологих приміщеннях, оформлення кухонних фартухів, стільниць, підвіконь, в ландшафті створюють садові доріжки, клумби, облицьовують бетонні вазони, фонтани або садові лавки. Прикладом вдалого використання уламків керамічної плитки є створення мозаїчних зображень в техніці «ламане мистецтво» або «picassiette» з використанням замість традиційних ідеально рівних тесерів

уламків плитки різних форм і розмірів, які можна укласти й на поверхню складної конфігурації.

Використання бою плитки суттєво зменшує бюджет на оздоблення, дозволяє створювати неповторні візерунки, орнаменти та художні панно, матеріал має широкий спектр застосування для декорування стін та деталей інтер'єру, оформлення елементів ландшафту. Облицьовані поверхні успадковують всі базові переваги вихідної плитки: вологостійкість, гігієнічність, довговічність та легкість у догляді. Використання бою керамічної плитки — це основа циркулярної економіки (zero waste), яка дозволяє зменшити витрати на закупівлю матеріалів до 15...20 грн за квадратний метр (на відміну від 500...1000 грн за цілу плитку) та зменшити обсяги будівельного сміття на полігонах. Використання бою (залишків та обрізків) керамічної плитки — це екологічний та бюджетний підхід, який дозволяє отримати унікальні дизайнерські рішення, заощадити кошти на матеріалах і мінімізувати будівельні відходи.

Таким чином, вторинне використання продуктів руйнування керамічних будівельних виробів не тільки зменшує кількість відходів, що потрапляють на смітник, та підтримує концепцію розумного споживання. Ефективність отримання такого продукту визначається мінімізацією витрат на їх переробку, а особливості раціонального використання — властивостями вихідного продукту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Антонюк Н.А., Костюк В.Р. Рециклінг будівельних відходів під час війни в Україні Актуальні проблеми економіки, № 7 (277), 2024. С. 130-142. DOI: 10.32752/1993-6788-2024-1-277-130-142
2. Сафранов Т., Приходько В., Корбут М. Особливості поводження з відходами будівництва і зносу в регіонах України. Науковий вісник Вінницької академії безперервної освіти. Серія «Екологія. Публічне управління та адміністрування», Вип. 2, 2024. С. 75-84. <https://doi.org/10.32782/2786-5681-2024-2.09>
3. Про управління відходами. Закон України від 20 червня 2022 року № 2320-ІХ. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#n802>
4. Циркулярна економіка: навчальний посібник /Шевченко Т. І., Шуптар-Пориваєва Н. Й., Губанова О. Р. та ін. Суми: Університетська книга, 2022. 220 с.
5. Sandeep, N. Utilization of recycled form of concrete, E-wastes, glass, quarry rock dust and waste marble powder as reliable construction materials. Materials Today: Proceedings, vol. 45, part 2, 2021, pp. 3231–3234. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.3816>
6. ГБН В.2.3-37641918-558:2016 Автомобільні дороги. Габіонні конструкції. Проектування та будівництво. Чинний від 01.07.2016

7. Abyzov V., Pushkarova K, Kochevykh M., Jurus J. Materials science for designers of architectural environment Politechnika Swietokrzyska Kielce, 2020. p.369-409.

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ЦЕЛЮЛОЗОВМІСНИХ ВІДХОДІВ ТА ВІДХОДІВ СКЛОБОЮ ЯК КОМПОНЕНТІВ СУМІШЕЙ ДЛЯ 3D-ДРУКУ БЕТОНОМ

*Марина Суханевич¹, Ольга Бондаренко¹, Дмитро Самченко¹, Олесь
Ластівка¹, Олексій Цанко¹, Володимир Чахоян¹*

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
sukhanevych.mv@knuba.edu.ua*

Будівельна галузь є одним із найбільших генераторів відходів: тільки в Україні щорічно утворюються мільйони тон будівельних і промислових відходів, значну частину яких складають органічні сільськогосподарські залишки (стебла зернових, льону, кукурудзи) і відходи переробки скла [1].

Технологія 3D-друку бетоном (3ДДБ) надає унікальну можливість інтегрувати ці відходи безпосередньо у виробничий ланцюг: відходи стають функціональними компонентами суміші, знижуючи вартість матеріалів і вуглецевий слід будівництва [2,3].

Целюлозовмісні матеріали (дискретні волокна, мікро- та наноцелюлоза) впливають на реологію і структуроутворення цементних систем через мікроармування, тиксотропію і нуклеаційний ефект [4,5]. Склобій після подрібнення набуває пуцоланових властивостей (порошок < 0,14 мм) або може слугувати заповнювачем (пісок 0,14–4 мм) [6,7,8]. Комбіноване використання обох груп відходів у 3ДДБ досі залишається маловивченим, що визначає актуальність цього дослідження.

Досліджено три форми целюлозовмісних відходів (табл.1) для застосування у 3ДДБ:

– дискретні натуральні волокна кукурудзи (ВК) та льону (ВЛ) — первинно подрібнені до 10–15 мм, висушені, вводились у кількості 1,5% понад 100% маси компонентів;

– органосольвентна мікроцелюлоза — отримана із стебел пшениці, льону та кукурудзи шляхом делігніфікації ізобутиловим спиртом та КОН в автоклаві (160°C / 240 хв або 180°C / 90 хв) з наступним термохімічним очищенням $\text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2\text{O}_2$ (70:30) при 97°C;

– наноцелюлоза — отримана з очищеної мікроцелюлози кислотним гідролізом 64% H_2SO_4 (ж:т = 44:1, 20–60°C, 60 хв) з центрифугуванням 8000 об/хв і ультразвуковою гомогенізацією при 24 кГц (УЗДН-1200М); продукт — стійкий гель 1%.

Відходи склобою утворюються при виробництві скловиробів, при будівельних демонтажних роботах і у побуті. Скло практично не

розкладається в природі, тому його рецикл у будівельній галузі є пріоритетним напрямом циркулярної економіки. Переробка включає: збір та сортування за кольором і типом, видалення металевих і керамічних включень, миття, подрібнення та фракціонування.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика органосольвентної мікроцелюлози та наноцелюлози із рослинних відходів

Параметр	Органосольвентна целюлоза	Наноцелюлоза (кислотний гідроліз)
Сировина	Пшениця, льон, кукурудза (стебла, 2-5 мм)	Попередньо очищена целюлоза
Делігніфікація	Ізобутиловий спирт + КОН; автоклав 160C/240 хв (гідразин) або 180C/90 хв (антрахінон)	64% H ₂ SO ₄ ; ж:т=44:1; 20–60C, 60 хв; зупинка: 10-кратний V(H ₂ O)
Очищення	5% КОН (30 хв) + гаряча вода; CH ₃ COOH+H ₂ O ₂ (70:30) при 97C, 120 хв	Центрифугування 8000 об/хв (10 хв); ультразвук 24 кГц (УЗДН-1200М); гель 1%
Розмір частинок	мкм (мікрОВОлокна)	нм (нанокристали/нанОВОлокна)
Ефект у 3DCP	Мікроармування, рання міцність, водоутримання	Тиксотропія, нанозміцнення CSH-матриці
Екологічність	Висока (без сульфатів; регенерація щолоку)	Потребує нейтралізації H ₂ SO ₄

Для застосування у 3ДДБ склОбій (таблиця 2) доцільно використовувати у двох фракційних формах:

– скляний порошок (< 0,14 мм) — отримують тонким помелом у кульових або вібраційних млинах. Аморфна структура SiO₂ надає матеріалу пуцоланову активність: SiO₂(скло) + Ca(OH)₂ + H₂O → C-S-H. Ступінь пуцоланової активності наближається до золи-виносу класу F, але залежить від дисперсності: при питомій поверхні > 400 м²/кг ефект порівнянний з метакаоліном.

– скляний пісок (0,14–4 мм) — отримують подрібненням і грохоченням. Застосовується як частковий замітник природного піску у 3ДДБ-сумішах до 20% без суттєвого погіршення реології. Забезпечує декоративний ефект і знижує витрату природних ресурсів.

Лужно-кремнеземна реакція (ACR). Головним ризиком при введенні скла у цементний бетон є реакція між аморфним SiO₂ скла і лугами цементного каменю (Na₂O, K₂O), що може призводити до утворення гелю, який при поглинанні вологи розширюється і викликає тріщини конструкції.

Заходи запобігання протіканню реакції передбачають наступні кроки:

– застосування активних мінеральних добавок, які зв'язують

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ і знижують рН порового розчину (мікрокремнезем, метакаолін, зола-виносу);

- тонкий помел скла ($< 0,14$ мм), при якому SiO_2 переходить у пуцоланову реакцію (реакція корисна), а не ACR;
- контроль вмісту лугів у цементі ($< 0,6\%$ Na_2O -екв.).

Таблиця 2

Класифікація відходів склобою за формою переробки та потенціалом у 3ДБ

Вид відходів скла	Розмір після подрібнення	Заміщення у 3ДБ	Основний ефект	Ризик ACR
Тонкомелений скляний порошок ($< 0,14$ мм)	$< 0,14$ мм	5-15% цементу	Пуцоланова активність, ↓ проникність	Низький
Скляний пісок (0,14–4 мм)	0,14–4 мм	10-20% заміна природного піску	↓ витрата піску, декоративний ефект	Помірний
Скляний дрібняк (4–8 мм)	4–8 мм	5-10% декоративний	Декоративна поверхня, блиск	Помірний
Скловолокну рубане ($< 0,14$ мм, $L=6-20$ мм)	$< 0,14$ мм (d)	0,5-1,5% армуючий	↑ тріщиностійкість, ↑ ударна в'язкість	Низький

Механізм впливу рослинних волокон на процеси гідратації портландцементної матриці полягають у наступному:

1. мікроармування — блокування мікротріщин у ранній стадії;
2. нуклеаційний ефект — поверхня волокон розглядається як центр кристалізації C-S-H;
3. водоутримування — уповільнення дифузії вільної води.

Органосольвентна мікроцелюлоза є перспективним наступним кроком: її волокниста структура підвищує тиксотропію суміші — здатність бути рідкою при прокачуванні і тверднути у спокої (граничне напруження зсуву $t_0 = 0,5-2,5$ кПа).

Наноцелюлоза (1% гель) потенційно підвищить щільність C-S-H-фаз (аналогічно нанокремнезему) і є екологічною альтернативою синтетичним загусникам.

Відходи склобою є перспективним ресурсом для 3ДБ у двох ролях. По-перше, як пуцоланова мінеральна добавка: тонкомелений скляний порошок ($< 0,14$ мм, питома поверхня $400-600$ м²/кг) вступає у пуцоланову реакцію з $\text{Ca}(\text{OH})_2$ цементного каменю, утворюючи додаткові C-S-H-гелі, які ущільнюють мікроструктуру, знижують проникність і підвищують хімічну стійкість бетону. Введення 5–15% скляного порошку замість цементу може знизити CO_2 -слід в'язучого на 5–15%.

По-друге, як дрібний заповнювач: скляний пісок (0,14–4 мм) за гранулометриєю наближається до вимог 3ДДБ (максимальна фракція не більше 4 мм). Заміщення 10–20% природного піску скляним знижує витрату природних ресурсів і дає декоративний ефект (прозорість, блиск поверхні шарів). Для уникнення АСР рекомендується поєднання скляного піску з мікрокремнеземом (5–10%) або метакаоліном (5–10%).

Важливою перевагою скляного порошку для 3ДДБ є його стабільний хімічний склад (на відміну від промислових відходів на зразок золи-виносу), що спрощує прогнозування властивостей суміші і є суттєвим для автоматизованого виробництва. Додаткова вигода — можливість регулювання кольору поверхні 3ДДБ -конструкції через колір скляного заповнювача.

Ефективна реалізація потенціалу обох груп відходів вимагає їхнього органічного поєднання у виробничому циклі 3ДДБ. Запропонована *інтеграційна модель* наведена в таблиці 3.

Таблиця 3

Інтеграційна модель одночасного використання целюлозовмісних відходів і відходів склобою у циклі 3ДДБ

Ланка	Целюлозовмісні відходи	Відходи склобою
1. Збір і підготовка	Стебла пшениці, льону, кукурудзи; подрібнення 2-5 мм	Сортування за кольором; видалення металів; миття
2. Переробка	Органосольвентна делігніфікація → мікроцелюлоза; кислотний гідроліз → наноцелюлоза (гель 1%)	Подрібнення → грохочення: порошок < 0,14 мм (пуцолан) або пісок 0,14–4 мм
3. Контроль якості	Ступінь полімеризації, рН, концентрація гелю, в'язкість суспензії	Гранулометрія, лужно-кремнеземна реакція (АСР), вміст домішок
4. Введення у 3ДДБ	ВК/ВЛ 1,5% + наноцелюлоза 0,5-1% → рання міцність + тиксотропія	Скляний порошок 5-15% як заміна цементу або пісок 10-20%
5. Ефект	R1 +11,4%, R7 +6,5%; тиксотропія; CO ₂ -слід матеріалів -5-10%	Утилізація склобою; ↓ витрата цементу або піску; пуцоланова активність

Очікувані ефекти від використання відходів полягає у наступному:

- рання міцність зросте на 8–12% від введення ВК;
- тиксотропія суміші покращиться за рахунок вмісту наноцелюлози;
- пуцоланова активність від скляного порошку прискориться, що призведе до зменшення викидів вуглецевого газу CO₂ на 5%;
- відбудеться утилізація до 15–20% відходів у складі 1 м³ суміші.

Валідація цього складу є предметом наступного етапу досліджень.

Оцінка *екологічного ефекту* для типового будинку площею 200 м²

досягається за рахунок утилізації 50–70 кг целюлозовмісних відходів (0,3–0,5 га сільгоспугідь) і 80–120 кг склобою; зниження CO₂-сліду матеріалів на 10–18%; та зменшення вартості заповнювача і в'язучого на 15–25% завдяки частковій заміні первинних матеріалів відходами.

Висновки. Органосольвентна целюлоза (ізобутиловий спирт + КОН, 160–180С, двостадійне очищення CH₃COOH/H₂O₂) є перспективним мікроармуючим і тиксотропним компонентом 3DCP-сумішей. Наноцелюлоза (64% H₂SO₄, ж:т=44:1, ультразвук 24 кГц, гель 1%) — перспективна нанодобавка для нанозміцнення CSH-матриці та тиксотропії.

Тонкомелений скляний порошок (< 0,14 мм, питома поверхня 400–600 м²/кг) виявляє пуцоланову активність і може заміщати 5–15% цементу у 3ДДБ без погіршення технологічних властивостей. Ключовою умовою є контроль АСР: поєднання з мікрокремнеземом або метакаоліном (5–10%) і помел нижче 0,14 мм.

Скляний пісок (0,14–4 мм) придатний для заміщення 10–20% природного дрібного заповнювача у 3ДДБ і є декоративним елементом поверхні конструкції. Стабільний хімічний склад скла спрощує прогнозування реологічних властивостей суміші.

Запропонована інтеграційна модель поєднання целюлозовмісних відходів і склобою у виробничому циклі 3ДДБ дозволяє утилізувати до 15–20% відходів у складі 1 м³ суміші при очікуваному зниженні CO₂-сліду на 10–18% і вартості матеріалів на 15–25%. Валідація комбінованого складу є предметом подальших досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мінрегіон України (2023). Оцінка обсягів будівельних відходів внаслідок руйнування об'єктів будівництва. Київ: Мінрегіон.
2. Buswell R.A. et al. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*, 112, 37–49.
3. Rahul A.V. et al. (2019). 3D printable concrete: Mixture design and fresh properties. *Cement and Concrete Composites*, 97, 13–23.
4. Nechyporchuk O. et al. (2016). Production of cellulose nanofibrils: A review. *Industrial Crops and Products*, 93, 2–25.
5. Pickering K.L. et al. (2016). A review of natural fibre composites. *Composites Part A*, 83, 98–112.
6. Shao Y., Lefort T., Moras S., Rodriguez D. (2000). Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research*, 30, 91–100.
7. Wang H.Y. (2011). The properties of high-strength concrete using ground waste glass as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 25, 4286–4290.
8. Islam G.M.S., Rahman M.H., Kazi N. (2017). Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6, 37–44.

ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ РУЙНУВАННЯ БУДІВЕЛЬ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА НОВОГО ЖИТЛА ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ 3D-ДРУКУ

Марина Суханевич¹, Ольга Бондаренко¹, Олесь Ластівка¹, Дмитро Самченко¹, Олексій Цанко¹, Артем Смоглій¹

¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
sukhanevych.mv@knuba.edu.ua

Однак стандартні суміші для 3ДДБ висувають специфічні Масштабне руйнування будівель внаслідок збройної агресії зумовлює утворення сотень мільйонів тон будівельних відходів в Україні[1]. Одночасно зростаюча потреба у швидкому та доступному відновленні житла актуалізує застосування прогресивних будівельних технологій, зокрема 3D-друку бетоном (3ДДБ) [2, 3, 4]. Технологія дозволяє скоротити трудовитрати на 50–80%, відходи матеріалів на 40–60% і час будівництва на 50–65% [5]. Поєднання рециклінгу відходів руйнування будівель (ВРБ) як заміника заповнювача у 3ДДБ відкриває концепцію замкнутого ресурсного циклу, що відповідає принципам циркулярної економіки [6].

реологічні вимоги (відкритий час, рання міцність, тиксотропія), що ускладнює пряме використання відходів руйнування бетону (ВРБ) [7].

Мета роботи — дослідити вплив двох видів рециклінгованих відходів бетону (ДВ та БВ) та суперпластифікаторів на властивості цементних систем для 3ДСР і визначити оптимальний склад суміші.

У якості в'язучої речовини використовували портландцемент СЕМ ІІ/В-S 42,5 R. Заповнювачем служив Дніпровський пісок з модулем крупності $M_k = 1,3$.

Відходи рециклінгу бетону отримано зі зруйнованих будівель та споруд за двома технологіями, що відрізняються видом палива при помелі:

- ДВ — відходи, отримані з використанням дизпалива при помелі;
- БВ — відходи, отримані з використанням біопалива при помелі.

Ключова відмінність: фракція $< 0,14$ мм становить 18,0% у ДВ та 22,8% у БВ, що свідчить про дрібніший гранулометричний склад БВ.

В якості відходів сільськогосподарської промисловості використано:

- волокна відходів кукурудзи (ВК)
- волокна відходів льону (ВЛ)

Хімічними модифікаторами-пластифікаторами сумішей слугували суперпластифікатори Sika ViscoCrete-225 P (полікарбоксилатний ефір) та Sika Plast 2410W у кількості 0,5–1,5% від маси цементу.

Дослідження проводились у два етапи. На першому вивчали вплив ДВ та БВ (10–30% заміни піску) і волокон ВК та ВЛ (1,5%) на властивості модельних систем «цемент–пісок–відход» при заданому розпливі розчину 140 мм. На другому — оптимізували 8 складів на основі БВ з суперпластифікаторами. Контролювали: водопотребу, розплив розчину

(мм), занурення конуса (мм — одразу, через 30 і 60 хв), строки тужавлення (хв), міцність на стиск R1, R7, R28 (МПа).

Результати досліджень модельних систем наведено в таблиці 1. Контрольним є склад №1 (цемент 25% + пісок 75%, вода 12,5%, R1 = 12,3 МПа, R7 = 36,8 МПа).

Таблиця 1

Склади та результати модельних систем «цемент – пісок – відход»

№	Вміст компонентів, мас.%							Розплив в конуса, мм	Міцність на стиск, у віці, МПа		
	Цемент	Пісок	ДВ,	БВ,	БК,	ВЛ,	Вода,		1 доба	7 діб	28 діб
1	25	75	—	—	—	—	12,5	140	12,3	36,8	56,6
2	25	65	10	—	—	—	13,5	140	11,1	35,2	54,2
3	25	55	20	—	—	—	14,25	140	9,8	34,1	52,5
4	25	45	30	—	—	—	15,0	140	8,0	32,6	50,2
5	25	55	—	20	—	—	13,0	140	10,9	34,9	53,7
6	25	45	—	30	—	—	14,0	140	9,7	33,8	52,0
7	25	75	—	—	1,5	—	12,5	140	13,7	39,2	60,3
8	25	75	—	—	—	1,5	12,5	140	12,9	38,5	59,2

Введення відходів бетону (ДВ) провокує зростання водопотреби: при 10% — до 13,5%, при 20% — до 14,25%, при 30% — до 15,0%. Це призводить до зниження ранньої міцності: R1 знижується з 12,3 до 8,0 МПа (–35%), R7 — з 36,8 до 32,6 МПа (–11%). Механізм — підвищена пористість залишкового цементного каменю на поверхні частинок ДВ поглинає вільну воду з суміші, збільшуючи ефективне В/Ц.

Відходи бетону (БВ), які мають дрібніший гранулометричний склад (22,8% прохід через 0,14 мм проти 18,0%), демонструють значно менший негативний ефект. При 20% БВ водопотреба становить лише 13,0% (проти 14,25% для ДВ), R1 = 10,9 МПа, R7 = 34,9 МПа — зниження лише на 5,2% та 5,2% відповідно. При 30% БВ: водопотреба 14,0%, R7 = 33,8 МПа — зниження R7 всього 8,2% проти 11,4% для ДВ.

Введення рослинних волокон курурудзи (БК) у кількості 1,5% не змінює водопотребу (12,5%) і при цьому підвищує ранню міцність: R1 = 13,7 МПа (+11,4% до контролю), R7 = 39,2 МПа (+6,5%). Ефект впливу волокон льону (ВЛ) на властивості суміші дещо менший: R1 = 12,9 МПа (+4,9%), R7 = 38,5 МПа (+4,6%). Зростання ранньої міцності є критично важливим для бетонних сумішей для 3Д друку — воно підвищує здатність шарів до самопідтримування.

За результатами I етапу досліджень для подальшої оптимізації обрано відходи бетону БВ і волокна кукурудзи ВК як найбільш перспективні. Досліджено вісім складів з різним вмістом компонентів та суперпластифікаторами. Результати наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Склади та результати оптимізованих бетонних сумішей для 3D-друку з суперпластифікаторами

№	Вміст компонентів, мас. %						Розплив конуса через , мм		Початок тужавлення, хв	Міцність на стиск R28, МПа
	Цемент	Пісок	Відходи бетону БВ	Волокна кукурудзи ВК	Пластиф. V-225P, %	Пластиф. P-2410W, %	0 хв	60 хв		
1	25	45	20	1,5	—	—	65	—	105	45,1
2	25	45	30	1,5	—	—	50	—	120	42,0
3	25	45	20	1,5	0,5	—	70	10	115	47,2
4*	25	45	30	1,5	1,0	—	80	50	125	49,5
5	25	55	30	1,5	1,5	—	90	90	150	47,4
6	25	45	20	1,5	—	0,5	65	—	100	45,9
7	25	75	30	1,5	—	1,0	70	—	110	46,6
8	25	75	30	1,5	—	1,5	80	30	120	44,2

*- оптимальний склад

Суміш №1 (20% БВ) забезпечує занурення конуса 65 мм, але через 30 хв рухливість падає до 20 мм — суміш втрачає придатність для екструзії. Збільшення БВ до 30% (склад №2) знижує рухливість до 50 мм та міцність R28 до 42,0 МПа. Без пластифікатора обидва склади не відповідають вимогам 3ДБ щодо збереження рухливості.

Введення 0,5% суперпластифікатора ViscoCrete-225 P (склад №3) підвищує рухливість до 70 мм з незначним збереженням (10 мм через 60 хв). Оптимальне дозування 1,0% (склад №4, 30% БВ) забезпечує рухливість 80 мм з її збереженням до 50 мм через 60 хв, строки тужавлення 125 хв та найвищу R28 = 49,5 МПа серед усіх досліджених складів. Дозування 1,5% (склад №5) призводить до надмірної рухливості (90 мм) і її повного збереження — суміш не набуває потрібної тиксотропії для самопідтримання шарів.

При дозуванні суперпластифікатор *Sika Plast 2410W* у кількості 0,5% (склад №6) рухливість 65 мм без збереження — недостатньо для 3ДБ. Найкращий результат у серії — склад №7 (1,0%, 30% БВ): 70 мм з відсутністю збереження через 60 хв, тужавлення 110 хв, R28 = 46,6 МПа. Ця добавка поступається ViscoCrete-225 P за ефективністю при однаковому

дозуванні та вмісті відходів.

Таким чином, оптимальним є склад №4: цемент СЕМ II/B-S 42,5R — 25%, пісок ($M_k = 1,3$) — 45%, БВ — 30%, БК — 1,5%, Sika ViscoCrete-225 P — 1,0%. Цей склад відповідає всім технологічним вимогам 3ДБ: рухливість ≥ 70 мм, збереження рухливості через 60 хв ≥ 30 –50 мм, строки тужавлення > 90 хв, $R_{28} > 40$ МПа, при цьому містить 30% рециклінгованих відходів та натуральні волокна.

На підставі отриманих результатів розроблено **концептуальну модель замкнутого ресурсного циклу** «Знесення → Рециклінг (БВ) → 3Д-будівництво», що інтегрує обидва етапи досліджень (рис.1).

Відмінністю від загальних підходів є включення операції помелу ВРБ із застосуванням біопалива (замість традиційного дизпалива) — що формує кращий гранулометричний склад заповнювача (більша частка фракції $< 0,14$ мм) і підвищує сумісність із цементною системою.

Цикл охоплює:

- (1) знесення з роздільним збором фракцій;
- (2) мобільне дроблення + помел із біопаливом;
- (3) контроль якості (гранулометрія, Cl^- , SO_4^{2-});
- (4) приготування суміші оптимального складу;
- (5) 3Д-друк на майданчику;
- (6) цифровий паспорт матеріалу.

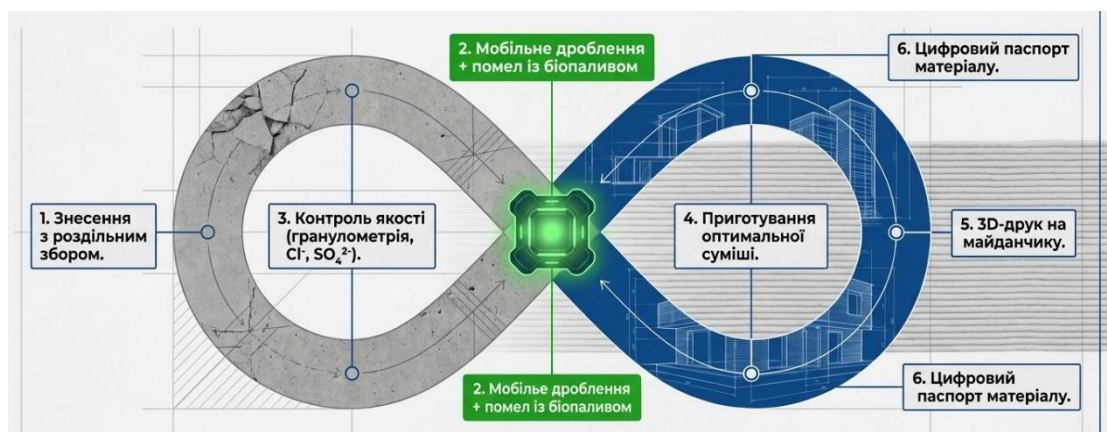


Рис.1. Концептуальна модель замкнутого ресурсного циклу отримання 3Д бетону з відходів руйнування будівель

Оцінка для типового будинку 200 м²: відвернення 40–45 т ВРБ від сміттєзвалища; зниження CO₂-сліду матеріалів на 12–18%; зниження вартості заповнювача на 30–40%.

Отже, відходи БВ (помел із біопаливом) переважають ДВ для 3Д - бетонних сумішей завдяки дрібнішому гранулометричному складу (22,8% vs 18,0% прохід через 0,14 мм): при 30% заміщенні піску водопотреба на 1,0% нижча, а зниження R7 — 8,2% проти 11,4% для ДВ.

Суперпластифікатор Sika ViscoCrete-225 P ефективніший за Sika Plast 2410W при роботі з відходами: при дозуванні 1,0% забезпечує збереження рухливості 50 мм через 60 хв та найвищу $R_{28} = 49,5$ МПа серед досліджених складів.

Оптимальний склад №4 (цемент 25% + пісок 45% + БВ 30% + ВК 1,5% + ViscoCrete-225 P 1,0%): рухливість 80 мм, строки тужавлення 125 хв, $R_{28} = 49,5$ МПа — відповідає технологічним вимогам 3Д-бетонів і включає 30% рециклінгованих відходів.

Запропонована концептуальна модель замкненого циклу із помелом ВРБ із біопаливом є технологічно обґрунтованою та придатною для реалізації в умовах повоєнного відновлення інфраструктури України.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мінрегіон України (2023). Оцінка обсягів будівельних відходів внаслідок руйнування об'єктів будівництва. Київ: Мінрегіон. 48 с.
2. Buswell R. A., Leal de Silva W. R., Jones S. Z., Dirrenberger J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*, 112, 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>
3. Rahul A. V., Santhanam M., Meena H., Ghani Z. (2019). 3D printable concrete: Mixture design and fresh properties. *Cement and Concrete Composites*, 97, 13–23.
4. Silva R. V., de Brito J., Dhir R. K. (2019). Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 183, 1–13.
5. Chen Y., Romero Rodriguez C., Li Z., Chen B., Copuroglu O., Schlangen E. (2021). Effect of different grade levels of calcined clays on fresh and hardened properties of limestone calcined clay cement mortar. *Cement and Concrete Composites*, 115, 103862.
6. Wang L., Tian Z., Ma G., Zhang M. (2020). Interlayer bonding improvement of 3D printed concrete with polymer modified mortar. *Cement and Concrete Composites*, 110, 103571.
7. European Environment Agency (2022). Construction and demolition waste: challenges and opportunities in a circular economy. EEA Report No 2/2022.

НОВИЙ ПІДХІД ДО ОРГАНІЗУВАННЯ ВИТІСНЯЮЧОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМФОРТУ Й ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ З КОРИСНИМ ВИКОРИСТАННЯМ ВИДІЛЕНОГО ВУГЛЕЦЮ

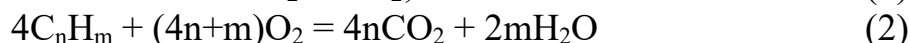
*Вадим Корбут¹, Тетяна Ткаченко¹, Віктор Мілейковський¹, Сергій
Морковник¹*

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
korbut.vp@knuba.edu.ua, tkachenko.tm@knuba.edu.ua,
mileikovskiy.vo@knuba.edu.ua, s.morkovnyk@gmail.com*

На сьогодні для України, де через бойові дії втрачено значний обсяг будівельного фонду (в окремих містах до 90 %) та відбувається екоцид, проблема декарбонізування стає вкрай гострою. Відбудова «як є» можлива лише для нещодавно збудованих об'єктів. А переважна більшість будівель не відповідає ані мінімальним вимогам до комфорту ані до енергоефективності та вуглецевого сліду. Асоціація з ЄС пов'язана з запровадженням відповідних екологічних стандартів. Проте попри війну Україна взяла на себе й додаткові зобов'язання, наприклад, декарбонізувати спорт у рамках ініціативи Організації Об'єднаних Націй «Sports for Climate Action». Постає питання, які засоби слід уживати. На минулих конференціях піднімалося питання можливості декарбонізування будівель шляхом поєднання витісняючої вентиляції задля максимальної концентрації діоксиду вуглецю у витяжному повітрі та вбудованих споруд захищеного ґрунту як біореакторів. Проте місце цього рішення в системі декарбонізаційних заходів не розглядалося. Тому спочатку проаналізуємо окремі альтернативи.

На сьогодні існує технологія [1], що претендує на рятівну роль для планети щодо парникових газів – захоплення та захоронення вуглецю (Carbon Capture and Storage – CCS). Це – великі комплекси з реакторами для абсорбування діоксиду вуглецю, системами його стиснення, транспортування та закачування у гірські породи. Основними проблемами впровадження є висока вартість. Окремі екологічні організації вважають це рішення обманом і навіть виводять людей на протести. При цьому наукова аргументація недостатня для обґрунтування такого спротиву.

Розглянемо узагальнений принцип роботи технології. З надр видобувається викопне паливо у формі вуглецю (у вугіллі) або вуглеводнів (нафта, газ). В енергетичних установках і двигунах відбуваються реакції виду



Хоча водяна пара є парниковим газом, її не вловлюють. Тому в рівнянні

(2) розглядатимемо лише виділену частину, яка бере участь у формуванні вуглекислого газу. У ній співвідношення кількості атомів вуглецю та кисню таке ж, які в рівнянні (1), а саме 1:2. Якщо врахувати атомні маси цих елементів, відповідно, 12,011 і 15,9994, то в захороненому діоксиді вуглецю CO_2 на кожен тонну вуглецю буде захоронено $2 \cdot 15,9994 / 12,011 = 2,664$ т кисню. В атмосфері міститься лише 0,064 % (152 % рівня до промислової революції – 0,042 %) діоксиду вуглецю [2] та 23,139 % кисню [3] за масою. Для зниження масової концентрації вуглецю на $0,064 - 0,042 = 0,022$ %, то разом з ним уміст кисню знизиться лише на 0,0083 %. Тобто якщо перейти на циркулярну економіку та припинити непомірні викиди парникових газів CCS матиме можливість відновити атмосферу без шкоди. В атмосфері орієнтовно $5,15 \cdot 10^{15}$ тонн повітря, тобто $0,23139 \cdot 5,15 \cdot 10^{15} = 1,192 \cdot 10^{15}$ тонн кисню. Зниження вмісту кисню на 0,1 % відповідатиме його захороненню обсягом $5,15 \cdot 10^{12}$ тонн. При цьому буде захоронено $5,15 \cdot 10^{12} / 2,664 = 1,933 \cdot 10^{12}$ т вуглецю. У разі продовження обсягу викидів вуглецю [2] $1,02 \cdot 10^{10}$ т/рік з повним компенсуванням CCS питання збіднення атмосфери киснем постане в достатньо близькій перспективі – через $1,933 \cdot 10^{12} / 1,02 \cdot 10^{10} = 189$ р. У рамках споживацького суспільства ця оцінка є підтвердженням можливості нарощування обсягів споживання. Однак, згідно з концепцією сталого розвитку з турботою про майбутні покоління ця оцінка викликає занепокоєння. А оскільки тенденція збільшення річного викиду триватиме, то оцінка є значно завищеною.

Альтернативою CCS є технології з корисним використанням уловленого вуглецю – захоплення, корисне використання та захоронення вуглецю (Carbon Capture, Utilisation and Storage – CCUS). На сьогодні цей підхід асоціюють із високими технологіями – графеном для процесорів і батарей, виробництвом пластиків тощо, де потреби у вуглеці відносно малі. Насправді він є найстарішим на землі завдяки природній (біологічній) секвестрації. Рослини та фотосинтетичні бактерії утворюють великий біореактор, що захоплює вуглекислий газ, розкладає його на кисень і вуглець під дією відновлюваної енергії сонячного випромінювання, а далі запускає отриманий вуглець у трофічні цикли з подальшим повільним захороненням у формі нафти та вугілля.

Людство спочатку значно скоротило строки від уловлення до тривалого утримування вуглецю шляхом будівництва дерев'яних будівель та виготовлення дерев'яних предметів із тривалим життєвим циклом, проте обмеженим процесами гниття й пожежами через недосконалі технології. Сьогодні технології, зокрема й розроблені в КНУБА [5], дозволяють значно продовжити життєвий цикл споруд, опорядження та виробів з дерева, тканин або сільськогосподарських відходів без шкоди довкіллю, тобто широко запроваджувати цей економічно ефективний CCUS-метод. Єдина умова – деревина має бути відновлювана, тобто без знеліснення.

Виникає питання доцільності використання різних технологій. На це

питання відповідає [6] діаграма Маккінзі (рис. 1), на якій уздовж осі абсцис відкладено ефект пом'якшення вуглецю в т/рік, а на осі ординат – вартість заходу пом'якшення в грошових одиницях на тонну вуглецю.

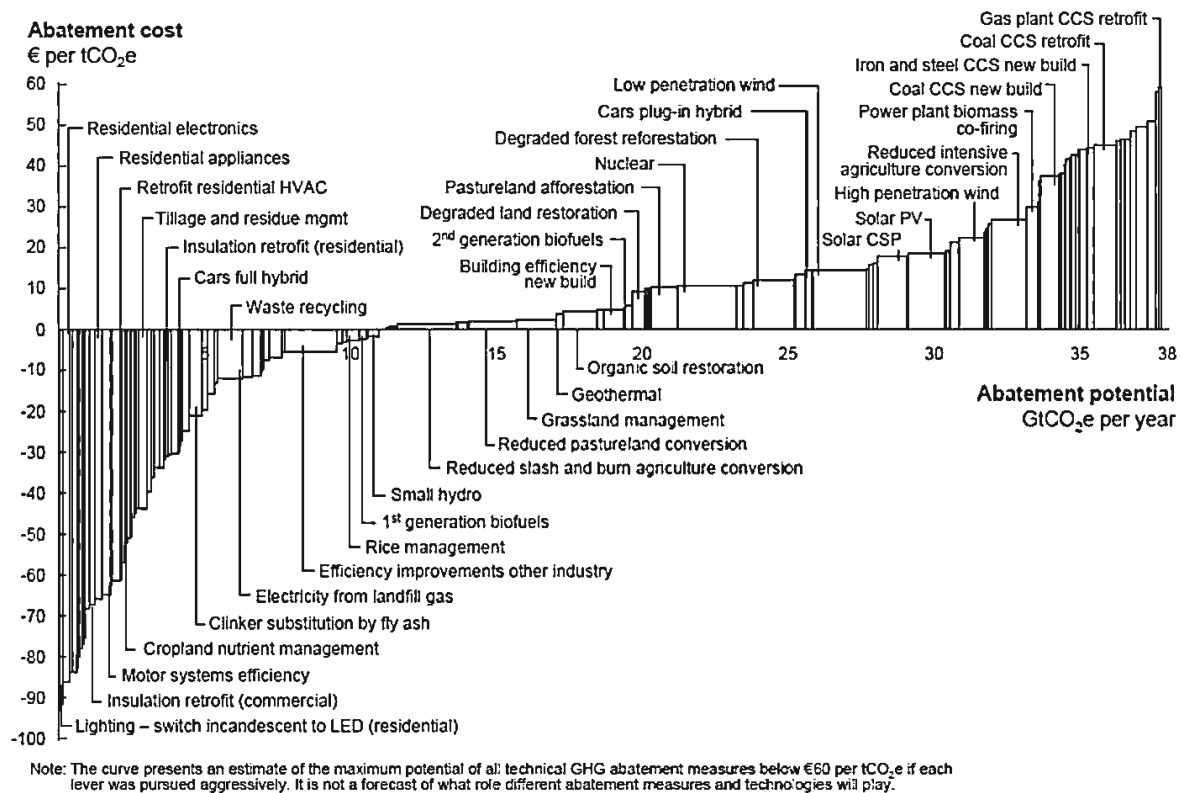


Рис. 1. Діаграма Маккінзі [6]

На цій діаграмі видно, що заходи з негативною вартістю пом'якшення мають мінімальний ефект, а найбільш дорогі заходи – максимальний. Критики [6] зазначають можливі неточності підрахунку ефекту, зокрема, запобігання знеліснення. Проте є більш вагома проблема інтерпретування результатів, а саме появи висновку щодо недоцільності заходів з негативною або низькою вартістю пом'якшення. Основною перевагою зазначених заходів є поширення. Справді, очікувати від світлодіодної лампи помітного ефекту не варто. Проте перехід людства від ламп розжарювання ефективністю 10 лм/Вт на світлодіодні 80...160 лм/Вт означає сумарний ефект від мільярдів ламп, який суттєво декарбонізує енергетику напряму та опосередковано завдяки розвантаженню мереж і обладнання, тобто продовженню їхнього життєвого циклу. Таким чином, дуже важливо не лише розробляти технології з максимальним ефектом, але й оцінювати потенціал впровадження, щоб оптимізувати їхній добуток. Крім того, варто шукати комплексні рішення, які мають додаткові позитивні ефекти, що додатково стимулюватиме якомога більше поширення навіть у споживацьких суспільствах. Наприклад, ті ж світлодіодні лампи дозволяють не лише зменшити платежі за електроенергію, але й зменшити забруднення

внутрішнього повітря від підгорілого пилу, перегрітих частин абажура та патрона світильників.

Приміщення зі скупченням людей є джерелом вуглекислого газу і має перспективи для його вловлення, зокрема, спорудою захищеного ґрунту зі збільшенням урожайності, приросту рослин та/або декоративності. Проте основні проблеми – розосередженість джерел і невелика концентрація вуглекислого газу у витяжному повітрі. Постає завдання досягти максимуму градієнта параметрів повітря без порушення комфорту. Таку можливість дає витісняюча вентиляція з подаванням повітря до робочої зони. Існує думка, що ця вентиляція завжди більш ефективна ніж змішувальна. Проте як було показано в попередній роботі [7], у багатьох громадських будівлях через малий робочий перепад температури між припливним і внутрішнім повітрям. Довідник [8] REHVA з витісняючої вентиляції (рис. 2) дає області ефективності різних методів організації повітрообміну, причому традиційна витісняюча вентиляція енергоефективна лише в зеленій області.

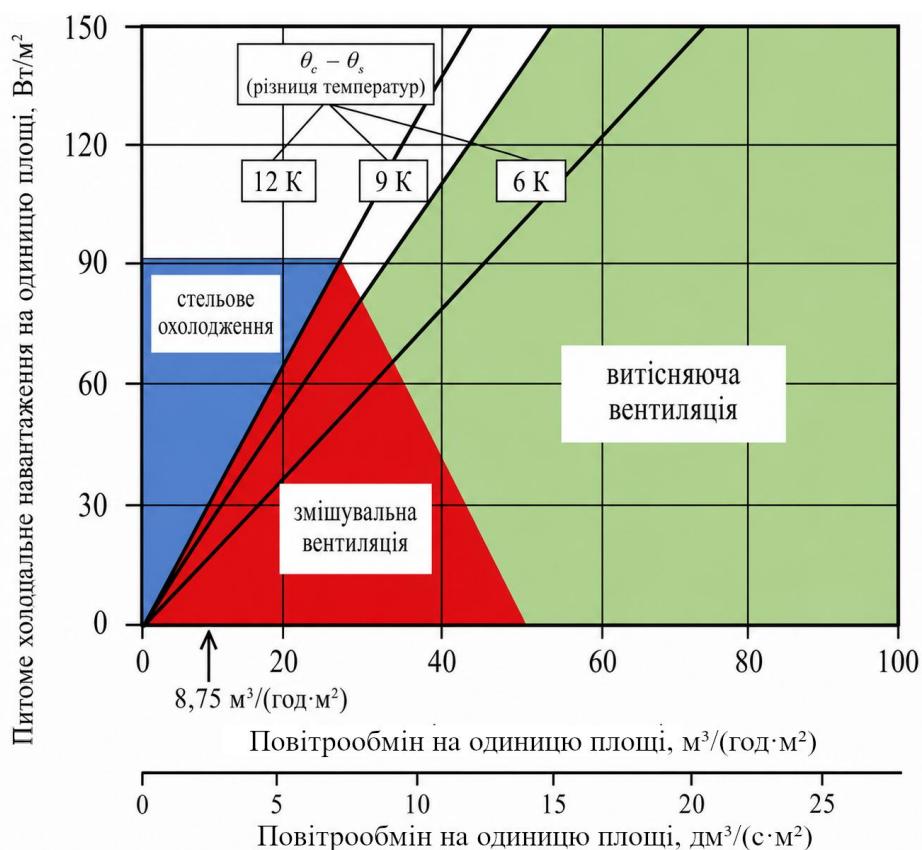


Рис. 2. Области ефективності різних способів формування мікроклімату

Задачу ефективності витісняючої вентиляції поза межами зеленої області рис. 2 можна вирішити періодичним подаванням повітря в робочу зону з завищеним за модулем робочим перепадом температури, тобто різницею температури між припливним повітрям і повітрям робочої зони [9,10]. Тепловий комфорт людини – це стан, за якого людина спроможна

розсіяти вироблену теплоту без напруження системи терморегулювання. Тому головною умовою є відповідність тепловіддачі людини в заданому режимі та за оптимальних мікрокліматичних умов. При короткочасному подаванні повітря вирішується проблема ефекту Ганни Клименко – підсмоктування повітря з верхньої зони в зони розрідження між потоками повітря від повітророзподільників. На відміну від [11], розглядатиметься не набігання компактної струмینی, а потік повітря, що повністю оточує людину.

У попередніх роботах [9,10] було детально розглянуто режими почергового періодичного подавання та повного вимкнення потоку повітря з повітророзподільних тумб. Проте основною проблемою такої системи є висока вартість клапанів, що повинні забезпечувати щільне прилягання елементів та інтенсивно зношуються. Розглянемо можливість неповного перекриття потоків повітря. Це вочевидь призведе до появи ефекту Ганни Клименко. Але швидкість підтікання повітря до струмін прямо пропорційна швидкості повітря в струміні. Тому якщо повне подавання повітря триватиме частку часу κ , а в перервах повітророзподільники подаватимуть частку витрати ε , то очікуване підсмоктування повітря з верхньої зони теж буде не більше $\varepsilon \cdot (1 - \kappa)$ від значення при неперервному подаванні, адже під час повного подавання підсмоктування до струмینی припиняється. Звичайно, при неповному перекриванні виникнуть певні втрати ефективності. Але через здешевлення клапанів у кілька разів очікуване розповсюдження технології зросте в рази – і загальний ефект буде позитивним.

Розглядаємо людину безпосередньо біля повітророзподільної тумби. Уведемо два спрощення. По-перше, замінимо людину [10] еліптичним циліндром розмірами $500 \times 250 \times H$ мм з температурою поверхні $\tau = 309,75$ К ($36,6$ °С), а по-друге, при повному подаванні повітря та під час паузи конвекція приймемо вимушеною. Число Нусельта в режимах повного подавання, паузи та нормативної швидкості при відповідному коефіцієнті тепловіддачі $\alpha_{f,p,n}$, Вт/(м²·К), характерному розмірі D , м, коефіцієнті теплопровідності повітря λ , Вт/(м²·К) приймемо за [10]

$$Nu_{f,p,norm} = \alpha_{f,p,norm} \cdot D / \lambda = 0,452 Re_{f,p,norm}^{0,571}; \quad (3)$$

число Рейнольдса при коефіцієнті кінематичної в'язкості повітря ν , м²/с, та швидкості повітря при повному подаванні v , м/с, при паузі $\xi \cdot v$, м/с, а також за нормами v_{norm} , м/с:

$$Re_f = v \cdot D / \nu; Re_p = \xi \cdot v \cdot D / \nu; Re_n = v_{norm} \cdot D / \nu. \quad (4)$$

Умова однакової тепловіддачі за періодичного подавання повітря та оптимальних умов

$$\kappa \cdot \alpha_f (\tau - \theta_{sup}) + (1 - \kappa) \cdot \alpha_p (\tau - \theta_{sup}) = \kappa \cdot \alpha_{norm} (\tau - \theta_{sup}) \quad (5)$$

У разі якщо рівняння (3), (4) та (5) дають більший робочий перепад температури, аніж за природної конвекції, слід приймати дані для природної. Результати розрахунку (рис. 3 а) для $\xi = 0,1$ показують, що лише при $\kappa = 0,2$

відбувається погіршення робочого перепаду температури. В інших випадках дані для природної конвекції лишаються правильними. Тобто якщо залишити 10 % подавання повітря не відбуватиметься помітного зниження ефективності, а вартість рішень і тривалість життєвого циклу клапанів значно покращаться. Рис. 3 б дає суттєву, але прийнятну для багатьох випадків втрату робочого перепаду температури при $\xi = 0,2$.

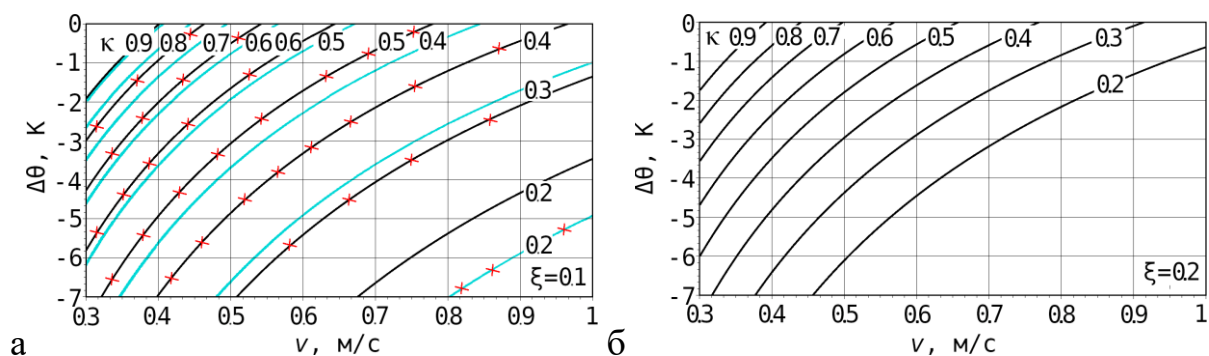


Рис. 3. Оцінковий графік граничних значень робочого перепаду температури: а – $\xi = 0,1$ з накладенням даних [10] для $\xi = 0$ (блакитний колір) та закресленням непотрібних ліній (червоний колір); б – $\xi = 0,2$

Висновок. Комплекс «Витісняюча вентиляція» – вбудовані споруди захищеного ґрунту є ефективним заходом декарбонізування будівель, що містять приміщення з масовим перебуванням людей. Рішення витісняючої вентиляції з періодичним неповним перекриттям потоків дозволяє знизити вартість, подовжити життєвий цикл клапанів і підвищити розповсюдженість зазначеного рішення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Carbon Capture and Storage. Ver. 16 May 2026 03:44 https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_capture_and_storage
2. WMO greenhouse gas bulletin. No 21. 16 October 2025. https://wmo.int/sites/default/files/2025-10/GHG-21_en.pdf
3. Cox A.N. Allen's Astrophysical Quantities. New York: Springer New York, 2002. XVIII, 721 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1186-0>
4. Lide D.R. (Ed.). Handbook of Chemistry and Physics. 77th ed. Boca Raton: CRC Press 1996.
5. Tsapko Y., Tsapko A., Berdnyk O., Bondarenko O., Kavaryn K. (2025) Research on the mechanism of wood protection with eco-friendly paint and varnish coatings. Technology audit and production reserves. 2025, Vol. 3, No 3(83), P. 6–11. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.329713>
6. Rhett Butler (Ed.) Leading model undervalues true cost of reducing deforestation, says report. Mongabay, 25 Nov. 2010. <https://news.mongabay.com/2010/11/leading-model-undervalues-true-cost-of-reducing-deforestation-says-report/>

7. Корбут, В., Ткаченко, Т., Мілейковський, В., Вахула, В., Цюрюпа, Ю. «Оцінювання ефективності організації повітрообміну для формування біобезпечного та комфортного середовища приміщень з масовим перебуванням людей». V Міжнародна науково-практична конференція «Енергія. Ресурси. Екологія», Київ: КНУБА, 2024, с. 71–72. Available at: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/12/ere-2024-ua.pdf>
8. Neuhaus E., Pernot C., van Aarle M., Schellen H. Displacement ventilation in the museum environment: a case study. 10th Clima World Congress Sustainable Energy use in Buildings. 10-12 May 2010, Antalya Turkey. URL: https://www.researchgate.net/publication/254850533_Displacement_ventilation_in_the_museum_environment_a_case_study
9. Korbut, V., Tkachenko, T., Mileikovskyi, V., Morkovnyk, S. and Klymenko, H. Modeling the organization of displacement ventilation with ensuring thermal and noise comfort. Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply. 2025, Iss. 55, P. 6–32. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.55.6-32>
10. Korbut V., Tkachenko T., Mileikovskyi V., Popov V., Hlushchenko R., Tryhub O. Natural approaches to organizing displacement ventilation ensuring thermal and noise comfort. Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply. 2025. Vol. 54. P. 6–18. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.54.6-18>
11. Korbut V., Rybachov, S. Features of interaction between supply jets and convective flow in heated vertical surfaces of technological equipment. Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply, Iss. 53, 2025. P. 80–89. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.53.80-89>

ЛІХЕНОІНДИКАЦІЯ ЯК ЗАСІБ ОЦІНЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

***Тетяна Ткаченко¹, Віктор Мілейковський¹, Аліса Чжан¹,
Юрій Цюрюпа¹***

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
tkachenko.tm@knuba.edu.ua, mileikovskyi.vo@knuba.edu.ua, chzhan_al-2025@knuba.edu.ua, tsiuriupa_yv@knuba.edu.ua*

Лишайники — це живі індикатори, які чутливо реагують на склад довкілля (особливо на наявність двооксиду сірки та важких металів у повітрі). За їхнім видовим складом визначають так званий «індекс чистоти повітря» (ліхеноіндикація).

Ліхеноіндикація як метод оцінки стану довкілля за лишайниками зародилася у 1866 році. Тоді фінський ботанік Вільям Нюландер вперше звернув увагу на те, що масове зникнення лишайників у Парижі пов'язане із забрудненням повітря, і запропонував називати їх «гігієнометрами» [1].

Загалом реакцію лишайників на зміну якості повітря можна розділити на кілька часових етапів:

1. Фізіологічна реакція (від кількох годин до кількох днів). Це найшвидший етап. Його неможливо помітити неозброєним оком. При високих концентраціях SO_2 або NO_x порушується процес фотосинтезу та дихання. Руйнується хлорофіл у водоростях (симбіонтах лишайника), що можна виявити за допомогою аналізів (наприклад, за зміною флуоресценції хлорофілу).

2. Морфологічні зміни (від кількох тижнів до кількох місяців). Якщо забруднення є хронічним, з'являються видимі ознаки пошкодження: зміна кольору (білястий, бурий, жовтуватий), що свідчить про хлороз та некроз; деформація, коли краї слані починають скручуватися, вона стає крихкою і втрачає зчеплення з корою дерева чи каменем.

3. Популяційна реакція та деградація (від 1 до 5 років). Це етап, який зазвичай фіксують під час екологічного моніторингу: зникнення видів, зміна структури [2].

Специфіка та актуальність методу. В умовах збройного конфлікту традиційний інструментальний моніторинг повітря часто є неможливим через руйнування інфраструктури та ризики для персоналу.

Лишайники, як організми, що довго живуть, з адсорбтивним типом живлення, виступають природними накопичувачами (кумуляторами) забруднювачів. Вони дозволяють проводити ретроспективний аналіз екологічного стану територій, зокрема фіксувати наслідки обстрілів та пожеж навіть через значний проміжок часу [2-7].

Реакція ліхенобіоти на воєнне забруднення. Викиди від детонації боєприпасів та згоряння ракетного палива створюють специфічний хімічний стрес.

Приклад: Високі концентрації оксидів азоту (NO_x) призводять до зникнення чутливих кущистих видів, таких як *Usnea hirta* (Уснея шорстка). Натомість нітрофільні види, зокрема *Xanthoria parietina* (Ксанторія настінна), у зонах вибухів можуть демонструвати аномальне розростання таломів (гіпертрофію), що слугує маркером азотного перенасичення.

Морфологічні зміни як швидкі індикатори. Пожежі на об'єктах критичної інфраструктури (нафтобази, заводи) супроводжуються викидами сажі та аерозолів, що спричиняють механічне блокування дихальних пор лишайників.

Приклад: Під впливом діоксиду сірки (SO_2) у лишайників роду *Physcia* (Фісція) спостерігається крайовий некроз лопатей та депігментація (побіління) талому, що свідчить про руйнування хлорофілу та деградацію фотобіонта під дією токсичного туману.

Важкі метали як маркери застосування озброєння. Лишайники ефективно акумулюють метали, що входять до складу боєприпасів (свинець, сурма, мідь, кадмій).

Приклад: Аналіз лишайника *Parmelia sulcata* (Пармелія борозенчаста), зібраного в зонах активних бойових дій, часто показує кратне перевищення

фонових значень хрому (Cr) та нікелю (Ni), що є прямим наслідком руйнування металевих конструкцій та розриву снарядів [2-7].

Висновок. Використання Індексу чистоти атмосфери (IAP) та картографування «лишайникових пустель» навколо епіцентрів воєнних дій дозволяє об'єктивно оцінити масштаби екоциду. Ліхенологічні дані є вагомим доказовим інструментом для оцінювання довготривалих екологічних збитків та планування подальшої рекультивації територій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Енциклопедія сучасної України. – Електронний ресурс. – URL: <https://esu.com.ua/article-55887>
2. Бойко Т., Виноградова О. Антропогенна трансформація ліхенофлори під впливом військових дій: кейси зі Східної України. Український ботанічний журнал. 2023. Т. 80, № 2. С. 112–125.
3. Гаркот С., Кондратюк С. Ліхеноіндикація якості повітря в умовах повоєнного відновлення: моніторинг урбаністичних екосистем України. Міжнародний журнал екологічних досліджень. 2024. № 12. С. 45–58.
4. Димитрова Л. Біомоніторинг атмосферного осадження важких металів за допомогою епіфітних лишайників як інструмент оцінки екологічної шкоди під час збройних конфліктів. Екологічне забруднення та менеджмент. 2023. Вип. 15. С. 201–214.
5. Кашубіна Ю., Соколов В. Післяпожежне відновлення лишайників та хімічне дактилоскопіювання територій, забруднених сажею. Журнал прикладної екології та охорони природи. 2025. № 7. С. 88–102.
6. Малишева Н. В. Сучасні методи ліхеноіндикації в умовах комплексного техногенного та воєнного стресу: навч. посіб. Київ: Видавництво КНУБА, 2025. 160 с.
7. Методичні рекомендації щодо визначення збитків довкіллю, завданих військовою агресією, з використанням біоіндикаторів / Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Київ, 2024. 42 с.

ЕКОЛОГІЧНІ ТА ГЕОПОЛІТИЧНІ ВИКЛИКИ ФОРМУВАННЯ ВЕЛИКОЇ ТИХООКЕАНСЬКОЇ СМІТТЄВОЇ ПЛЯМИ

**Тетяна Ткаченко¹, Віктор Мілейковський¹, Юрій Цюрюпа¹,
Софія Мороз¹**

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
tkachenko.tm@knuba.edu.ua, mileikovskiyi.vo@knuba.edu.ua,
tsiuriupa_yv@knuba.edu.ua, moroz_sv-2025@knuba.edu.ua*

Вступ. Проблема забруднення Світового океану пластиковими відходами набула критичного значення у XXI столітті. Найбільш

масштабним проявом цієї кризи є Велика тихоокеанська сміттєва пляма (Great Pacific Garbage Patch — GPGP), розташована між 135°–155° західної довготи та 35°–42° північної широти. Це явище не є суцільним островом у звичному розумінні, а утворює зону надвисокої концентрації мікро- та макропластику, утримувану Північнотихоокеанською системою течій. Актуальність дослідження зумовлена транскордонним характером проблеми та відсутністю ефективних правових механізмів її ліквідування.

1. Гідродинамічні чинники формування Великої тихоокеанської сміттєвої плями

Формування плями безпосередньо пов'язане з океанічними циркуляційними системами (вирами). Північнотихоокеанський субтропічний вир утворює зону конвергенції, де швидкість течій сповільнюється, що сприяє акумулюванню плавучих відходів. Математично концентрація сміття в центрі виру може бути описана через баланс сил адвекції та дифузії. Основну роль відіграє сила Коріоліса, яка спрямовує відходи до центру системи.

За останніми даними, маса пластику в GPGP оцінюється у 80,000 тонн, що складається з приблизно 1.8 трильйонів фрагментів. Важливо зазначити, що динаміка плями не є статичною: сезонні коливання течій можуть призводити до тимчасового зміщення меж забруднення, що ускладнює моніторинг за допомогою супутникових систем. Океанічні вири діють як гігантські центрифуги, концентруючи пластик у відносно стабільному центрі.

2. Структурний склад та морфологія пластикових відходів

Дослідження експедицій проєкту *The Ocean Cleanup* показали, що структура забруднення неоднорідна. Близько 92% маси складають об'єкти розміром понад 0,5 см, проте за кількістю частинок домінує мікропластик (< 5 мм). Значну частку (до 46%) складають так звані «сітки-привиди» — залишки

рибальського спорядження, виготовлені з синтетичних полімерів (нейлон, поліпропілен).

Процес деградації пластику в океанічних умовах відбувається переважно шляхом фотодеградації під впливом ультрафіолетового випромінювання. Це призводить до фрагментації великих об'єктів на мікрочастинки, які адсорбують на своїй поверхні стійкі органічні забруднювачі (COЗ). Таким чином, кожна частинка пластику перетворюється на високотоксичну «бомбу сповільненої дії» для морських екосистем. Хімічний аналіз показує наявність поліетилену високої щільності (HDPE) та поліпропілену як основних компонентів.

3. Екологічні наслідки та біологічна інвазія

Вплив GPGP на морську біоту класифікується за трьома напрямками: механічне пошкодження (заплутування), інгестія (поїдання) та хімічне отруєння. Морські птахи, зокрема альбатроси, помилково сприймають

яскраві фрагменти пластику за їжу, що призводить до фізичного блокування шлунково-кишкового тракту. Це викликає хронічне недоїдання та загибель цілих популяцій.

Особливий науковий інтерес викликає явище «пластисфери» — нової екосистеми, що формується на поверхні пластику. Пластик слугує субстратом для мікроорганізмів та дрібних безхребетних, дозволяючи їм долати тисячі кілометрів. Це створює загрозу біологічної інвазії: види, притаманні прибережним водам одного континенту, потрапляють до берегів іншого, що радикально порушує локальну біологічну рівновагу та біорізноманіття.

4. Правові та технологічні аспекти очищення

Основна проблема ліквідації плями полягає в її правовому статусі. Оскільки GPGP розташована у відкритому морі (High Seas), згідно з Конвенцією ООН з морського права (UNCLOS), жодна держава не несе прямої відповідальності за її очищення. Це створює «трагедію спільного надбання», де витрати на очищення є загальними, а вигоди — дифузними. Жоден міжнародний фонд наразі не має достатніх повноважень для фінансування повномасштабної операції.

Технологічно найбільш перспективною є пасивна система збирання, що базується на використанні енергії океанічних течій для концентрування пластику в спеціальних пастках. Проте, критичною залишається проблема вилучення мікропластику, оскільки методи фільтрування великих об'ємів води неминуче призводять до вилову мезопланктону, що може мати катастрофічні наслідки для харчового ланцюга океану. Сучасні дослідження зосереджені на розроблянні селективних мембран, спроможних виокремити шкідливі частинки.

Висновки

Велика тихоокеанська сміттєва пляма є маркером антропоцену та свідченням неефективності сучасної моделі використання пластику. Вирішення цієї проблеми потребує не лише технологічних інновацій у сфері очищення, а й глобальної реформи управління відходами (циркулярна економіка) та посилення міжнародного морського права. Пріоритетним напрямком має стати запобігання потраплянню пластику в океан через річкові артерії.

Тільки комплексний підхід, що поєднує інженерні рішення з політичною волею, дозволить зберегти цілісність океанічних екосистем для майбутніх поколінь.

ЛІТЕРАТУРА

1. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic / L. Lebreton, B. Slat, F. Ferrari та ін. Scientific Reports. 2018. Vol. 8, No. 1. P. 4666. DOI: 10.1038/s41598-018-22939-w.
2. Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic

Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea at One Time / M. Eriksen, L. C. Lebreton, H. S. Carson та ін. PLOS ONE. 2014. Vol. 9, No. 12. P. e111913. DOI: 10.1371/journal.pone.0111913.

3. Jambeck J. R., Geyer R., Wilcox C. Plastic waste inputs from land into the ocean. Science. 2015. Vol. 347, No. 6223. P. 768–771. DOI: 10.1126/science.1260352.

4. Geyer R., Jambeck J. R., Law K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances. 2017. Vol. 3, No. 7. P. e1700782. DOI: 10.1126/sciadv.1700782.

5. Law K. L., Thompson R. C. Microplastics in the seas. Science. 2014. Vol. 345, No. 6193. P. 144–145. DOI: 10.1126/science.1254052.

6. Moore C. J. Synthetic polymers in the marine environment: A rapidly expanding common responsibility. Environmental Research. 2008. Vol. 108, No. 2. P. 131–139. DOI: 10.1016/j.envres.2008.07.025.

7. Plastic ingestion by planktivorous fishes in the North Pacific Central Gyre / C. M. Boerger, G. L. Lattin, S. L. Moore, C. J. Moore. Marine Pollution Bulletin. 2010. Vol. 60, No. 12. P. 2275–2278. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2010.08.007.

8. Kaiser J. The Dirt on Ocean Garbage Patches. Science. 2010. Vol. 328, No. 5985. P. 1506–1506. DOI: 10.1126/science.328.5985.1506.

ВПЛИВ НАНОПЛАСТИКУ НА ВОДНІ ЕКОСИСТЕМИ: ОЦІНЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ТА ВИКЛИКИ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

***Вадим Ходаковський¹, Юрій Цюрюпа¹, Тетяна Ткаченко¹,
Віктор Мілейковський¹***

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури
khodakovskyy_vo-2025@knuba.edu.ua, tsiuriupa_yv@knuba.edu.ua,
tkachenko.tm@knuba.edu.ua, mileikovskiy.vo@knuba.edu.ua*

На сьогодні забруднення гідросфери синтетичними полімерами досягло глобальних масштабів, перетворившись із суто естетичної проблеми на системну загрозу.

Особливу небезпеку для екологічної безпеки становить нанопластик — гетерогенна група частинок розміром від 1 до 100 нм. Вони утворюються переважно внаслідок вторинної фрагментації макро- та мікропластику (поліетилену високої та низької щільності, полістиролу, поліпропілену) під дією сонячної радіації (УФ-А та УФ-В діапазонів) і гідродинамічного та механічного стирання в прибережній зоні. Через колоїдну поведінку, екстремально малі розміри та експоненціально високу питому площу поверхні (10^2 - 10^3 м²/г), ці частинки набувають унікальних кінетичних властивостей, що зумовлює їхню аномальну біодоступність та виражену

цитотоксичність для гідробіонтів.

Механізми впливу на водну біоту та клітинні мішені. На відміну від мікропластику, який здебільшого викликає механічні ушкодження травного тракту, наночастинки здатні долати найстійкіші захисні бар'єри організмів, зокрема епітелій зябер, гематоенцефалічний бар'єр та плазматичні мембрани клітин шляхом ендоцитозу.

На рівні первинних продуцентів (фітопланктон), експерименти на модельних об'єктах *Chlorella vulgaris* та *Scenedesmus obliquus* показують, що наночастинки полістиролу за рахунок електростатичної взаємодії адсорбуються на клітинних стінках водоростей. Це викликає механічне затінення, що знижує ефективність фотосинтезу на 25-40 %, ініціює пероксидне окиснення ліпідів (ПОЛ) мембран та призводить до витікання електролітів.

На рівні консументів першого порядку (зоопланктон), у класичного тест-об'єкта *Daphnia magna* дія нанопластику призводить до іммобілізації фільтраційного апарату, різкого зниження ферментативної активності кишківника та ембріотоксичності (зменшення плодючості у 2–3 рази).

Ефект «Троянського коня» (ко-транспорт токсикантів) полягає в тому, що завдяки високій гідрофобності поверхні, нанопластик виступає як ефективний вектор (носіє) у водному середовищі для персистентних органічних забруднювачів (ПОЗ), як-от поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПРАВ), дихлордифенілтрихлоретан (ДДТ), а також іонів важких металів Cd^{2+} , Pb^{2+} , Cu^{2+}). Накопичуючись на пластиковій матриці, ці екотоксиканти потрапляють усередину клітин у концентраціях, що в десятки разів перевищують їхній розчинений фоновий рівень у воді.

Нанопластик активно залучається до трофічних ланцюгів. Він демонструє високий потенціал до біомагніфікації вздовж ланцюга: «мікрowodорості - зоопланктон (*Daphnia*) – дрібні консументи (*Danio rerio*) – хижі риби».

При дослідженні риб (на прикладі *Danio rerio* та *Carassius auratus*) виявлено акумулювання наночастинок у тканинах печінки, зябер та головного мозку. Наслідком цього є виражена нейротоксичність: інгібування активності ферменту ацетилхолінестерази (АХЕ), що викликає системні порушення поведінкових реакцій, зниження швидкості плавання та дезорієнтацію у просторі.

Це суттєво послаблює адаптаційні можливості популяцій і створює загрозу висхідного перенесення пластифікаторів (фталатів, бісфенолу А) до людини як кінцевого споживача морепродуктів.

Забезпечення екологічної безпеки гідросфери наразі блокується двома критичними чинниками:

1. Аналітичний тупик детекції. Виділення нанофракції з реальних природних матриць (морська та прісна вода, мули, тканини гідробіонтів) є надскладним завданням. Традиційні методи (FTIR- та Раман-спектроскопія),

ефективні для мікропластику, мають фізичну межу роздільної здатності близько 1 мкм. Ідентифікація наночастинок потребує наддорогих і складних у підготовленні методів: просвічувальної електронної мікроскопії (ТЕМ), сканувальної електронної мікроскопії (SEM), мас-спектрометрії з індуктивно-зв'язаною плазмою у режимі аналізу окремих частинок (sp-ICP-MS) та піролітичної газової хроматографії-мас-спектрометрії (Py-GC-MS).

2. Законодавчий вакуум. Ні в українському правовому полі (Водний кодекс, екологічні нормативи), ні в директивах ЄС (зокрема, Рамковій директиві про водну стратегію) наразі немає затверджених гранично допустимих концентрацій (ГДК) для нанопластику. Оскільки немає нормативу — відсутній і офіційний державний моніторинг цієї загрози.

Висновки

Нанопластик є прихованим, але надзвичайно агресивним чинником деградації водних екосистем. Для мінімізування екологічних ризиків та формування дієвої стратегії екологічної безпеки необхідне негайне об'єднання зусиль фундаментальної науки та регуляторних органів. Пріоритетними кроками мають стати: розроблення та уніфікування міждержавних експрес-методик детектування нанопластику, проведення довгострокових хронічних токсикологічних тестів low-dose (малих доз) та законодавче закріплення нормативів умісту штучних наночастинок у природних та питних водах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гнатюк Н. В., Ковальчук О. В. Екологічні ризики забруднення водних екосистем мікро- та нанопластиком. Екологічна безпека та збалансоване природокористування. 2024. № 2 (30). С. 45–52.
2. Ткаченко Т. М. Сучасні виклики для екологічної безпеки гідросфери в умовах техногенного навантаження. Науковий вісник будівництва. 2025. Т. 114, № 3. С. 112–118.
3. Alimi O. S., Farner Budarz J., Chae Y. et al. Microplastics and Nanoplastics in Aquatic Environments: Aggregation, Deposition, and Enhanced Contaminant Transport. *Environmental Science & Technology*. 2022. Vol. 56, No. 11. P. 7441–7455.
4. Chae Y., An Y. J. Current research trends on plastic pollution and ecological impacts on the soil ecosystem: A review. *Environmental Pollution*. 2023. Vol. 284. Art. 117451.
5. Kögel T., Büsser O., Monteleone A. et al. Micro- and nanoplastics in aquatic organisms: Toxicity, tissue distribution, and trophic transfer. *Environmental Sciences Europe*. 2024. Vol. 36, No. 1. P. 12–29.
6. Mitrano D. M., Wohlleben W. Microplastic and nanoplastic in the environment: Research challenges and milestone analytical developments. *Communications Earth & Environment*. 2025. Vol. 6, No. 2. Art. 89.

ТЕОРІЯ ПРОВАДЖЕННЯ ЗЕЛЕНОГО БУДІВНИЦТВА В ПРИРОДНО-ЗАПОВІДНИЙ ФОНД УКРАЇНИ

Юлія Березницька¹, Олександр Литовченко¹

¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
bereznytska.iuo@knuba.edu.ua.

1. Вступ. На сьогодні в розрізі Світу загалом, та України зокрема особливо актуальним є питання збереження природних та природно-техногенних комплексів та теперішніх та майбутніх поколінь. Перспективним та ефективним напрямом сталого розвитку держави є не лише підтримка існуючих природно-заповідних територій та об'єктів, але і проектування, реалізація та ефективне використання новітніх технологій, одним з напрямків яких є технології зеленого будівництва.

Метою роботи є аналіз ефективності впровадження технологій зеленого будівництва в природно-заповідний фонд України, а також виявлення критичних точок сповільнення цього процесу.

2. Теоретичні засади зеленого будівництва та основні його технології для впровадження на територіях і об'єктах природно-заповідного фонду

Згідно [1] зелене будівництво являє собою комплекс робіт щодо створення нових міських зелених насаджень і реконструкції наявних. Проте на сьогоднішній день цей термін містить в собі набагато більш широкий та змістовний перелік проектувальних, будівельних та реконструкційних рішень, які значно покращують вплив будівель на довкілля, мікроклімат в самих приміщеннях та створюють біологічно різноманітні урбоекоценози, які також покращують естетичний вигляд будівель.

В таблиці 1 наведено основні завдання, які ставлять перед собою технології зеленого будівництва в розрізі об'єктів природно-заповідного фонду.

Таблиця 1

Основні завдання, які ставлять перед собою технології зеленого будівництва в розрізі об'єктів природно-заповідного фонду

№ п/п	Завдання	Шляхи вирішення завдань	Назва території природно-заповідного фонду для впровадження
1	2	3	4
1	Підвищення ефективності використання природних та відновлювальних	Встановлення сонячних електростанцій, теплових насосів, автономних систем енергозабезпечення	Особливо актуально для впровадження на територіях з великою площею та функціональним

1	2	3	4
	ресурсів (сонячної та вітрової енергії, водних ресурсів)		зонуванням (біосферні заповідники, національні природні парки)
2	Зменшення негативного впливу на природні екосистеми під час будівництва та облаштування будівель для функціонування об'єкту як установи	Використання екологічно безпечних будівельних матеріалів, мінімізація порушення ґрунтового покриву, обмеження площ забудови	Заказники, пам'ятки природи, парки-пам'ятки садово-паркового мистецтва
3	Підвищення енергоефективності адміністративних та рекреаційних будівель	Застосування теплоізоляційних матеріалів, енергоощадного освітлення, автоматизованих систем керування енергоспоживанням	Заказники, ботанічні сади, дендрологічні парки, зоологічні парки
4	Раціональне використання водних ресурсів	Встановлення систем збору та повторного використання дощової води, водозберігаючого обладнання	Гідрологічні заказники, території з великою площею та значним поверхневим стоком
5	Скорочення утворення будівельних відходів	Використання модульних конструкцій, повторне використання матеріалів, сортування та перероблення відходів	Актуально для всіх територій
6	Створення безбар'єрного екологічного середовища	Облаштування інклюзивних екологічних маршрутів, енергоефективних візит-центрів, екологічних зон відпочинку	Актуально для всіх територій
7	Адаптація інфраструктури до змін клімату	Використання кліматостійких будівельних матеріалів, природоорієнтованих рішень, озеленення територій, зелених дахів	Актуально для всіх територій
8	Екологічна освіта та популяризація сталого розвитку	Створення сучасних еколого-освітніх центрів із використанням принципів зеленого будівництва	Актуально для всіх територій
9	Досягнення вуглецевої нейтральності об'єктів природно-заповідного фонду	Використання будівель із низьким вуглецевим слідом, природних матеріалів, компенсаційне озеленення та енергоефективні технології	Актуально для всіх територій

Таким чином, можемо стверджувати, що існуючі території природно-заповідного фонду мають значний потенціал щодо впровадження широкого спектру технологій зеленого будівництва під час виконання своїх функцій.

3. Основні проблеми впровадження технологій зеленого будівництва на територіях природно-заповідного фонду та шляхи їх рішення

До основних проблем впровадження можна віднести заборону будь-якого виду господарської діяльності на територіях природно-заповідного фонду окрім видів діяльності передбачених виконанням покладених на них функцій [4]. Інші проблеми впровадження технологій зеленого будівництва на територіях природно-заповідного фонду та шляхи їх вирішення наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Проблеми впровадження технологій зеленого будівництва на територіях природно-заповідного фонду та шляхи їх вирішення

№ п/п	Проблема	Причини виникнення	Шляхи вирішення
1	2	3	4
1	Недосконалість нормативно-правової бази	Відсутність спеціальних вимог щодо застосування технологій зеленого будівництва на територіях ПЗФ	Розроблення галузевих нормативних документів, гармонізація законодавства з європейськими стандартами
2	Обмежене фінансування природоохоронних установ	Недостатнє бюджетне фінансування, висока вартість екотехнологій	Залучення грантів, державно-приватного партнерства та екологічних фондів
3	Відсутність комплексного планування	Недостатня інтеграція екологічних, економічних і соціальних аспектів	Використання принципів сталого розвитку, ВІМ та просторового планування
4	Недостатнє використання ВДЕ	Висока вартість обладнання	Впровадження сонячних електростанцій, теплових насосів
5	Ризик порушення екосистем	Неврахування природних особливостей територій	ОВД, природоорієнтовані рішення та екологічне проєктування
6	Недостатня екологічна компетентність	Брак підготовлених фахівців	Підвищення кваліфікації, навчання та тренінги
7	Відсутність екологічного моніторингу	Недостатній контроль за станом довкілля	Автоматизовані системи моніторингу, GIS та IoT
8	Високий вуглецевий слід матеріалів	Використання традиційних матеріалів	Застосування низьковуглецевих і вторинних матеріалів

1	2	3	4
9	Недостатній розвиток екоінфраструктури	Відсутність сучасних візит-центрів та маршрутів	Будівництво енергоефективних екологічних об'єктів
10	Вплив кліматичних змін	Зростання температури та екстремальні погодні явища	Кліматична адаптація, Nature-based Solutions, підвищення стійкості інфраструктури

4. Висновки

У ході дослідження встановлено, що технології зеленого будівництва є важливим інструментом покращення загального стану природно-заповідних територій. Зокрема за умови використання сучасних технологій можна зменшити негативний вплив на довкілля від господарських будівель під час їхнього будівництва та експлуатації. Зелені технології мають широкий потенціал втілення на заповідних територіях. Впровадження зеленого будівництва має ряд перепон на шляху до втілення, і тому дане питання потребує подальшого глибокого вивчення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Про затвердження Правил утримання зелених насаджень у населених пунктах України : наказ Міністерства будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України від 10.04.2006 № 105 (зі змінами). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0880-06>.

2. Green building as a direction of sustainable development: essence, tasks, principles, benefits, prospects / V. Bilotil. Збалансоване природокористування. 2021. № 2. С. 64 -71. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zp_2021_2_10.

3. Кривомаз Т.І., Савченко А.М. Зниження впливу будівельної галузі на кліматичні зміни шляхом впровадження принципів зеленого будівництва. Екологічна безпека та природокористування. 2021. No 1(37). С. 55–68. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.1.55-68> URL: <http://es-journal.in.ua/article/view/228419> (дата звернення: 26.05.2021).

4. Звіт про стратегічну екологічну оцінку проекту Плану заходів з реалізації Оновленого Національно визначеного внеску України до Паризької угоди до 2030 року [Електронний ресурс]. Київ: Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, 2023. 216 с. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/Zvit-pro-strategichnu-ekologichnu-otsinku.pdf>.

5. Теорія та методологія "зеленого будівництва" / С. О. Мащенко, М. С. Вовк, Р. А. Алієв. Економічний простір. 2016. № 113. С. 220-230. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecpros_2016_113_23.

6. Ткаченко Т., Мілейковський В. Перші українські стандарти зеленого будівництва. Матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф. «Green Construction» (Київ, 13–14 травня 2025). Київ: КНУБА, 2025. С. 297–302. URL:

ЗАГАЛЬНИЙ ОГЛЯД МОЖЛИВОСТЕЙ ВПРОВАДЖЕННЯ ESG-ПІДХОДУ В УПРАВЛІННЯ ОХОРОНОЮ ПРАЦІ В ЗЕЛЕНОМУ БУДІВНИЦТВІ

Юлія Березницька

*Київський національний університет будівництва і архітектури,
bereznytska.iuo@knuba.edu.ua*

1. Вступ

Впровадження принципів ESG, як сукупності екологічних, соціальних та державних гілок управління, у діяльність української будівельної галузі є важливим кроком на шляху до сталого розвитку суспільства та підвищення рівня управління охороною праці в будівельному секторі. Насьогодні ESG-принципи сягають рівня глобального стандарту для багатьох сфер бізнесу та економіки, зокрема для будівельної галузі, збільшуючи соціальну відповідальність, а також сприяючи зростанню фінансової та екологічної відповідальності будівельних компаній.

Проте, незважаючи на глобальні напрямки розвитку, будівельний сектор України тільки опановую та знайомиться з впровадженням системи ESG, особливо в розрізі системи управління охороною праці. Недостатня увага з боку держави та відсутність спеціалізованих інструментів для оцінювання й моніторингу ризиків, пов'язаних зі сталим розвитком, ускладнюють інтеграцію цих принципів. До того ж специфіка будівельного сектору, зокрема залежність від приватного інвестування та державного фінансування програм розвитку в Україні, а також обмежена частка будівельних компаній, які працюють з зеленими технологіями, створює додаткові обмеження на шляху до впровадження ESG-підходу в систему управління охороною праці.

Отже, виникає потреба дослідження, яким чином світові тенденції щодо інтеграції ESG-принципів можна впровадити в систему управління охороною праці в зеленому будівництві, а також виявити особливо цінні фактори сприятливого впливу для соціальної та екологічної безпеки.

Метою роботи є загальний огляд можливостей ESG-підходу в покращенні системи управління охороною праці в зеленому будівництві, що призвело б до успішно модернізації сектору зеленого будівництва, сприяло б стабілізації державної економіки за рахунок зменшення соціальних виплат та підвищенню рівня екологічної безпеки за рахунок використання принципів раціонального природокористування.

2. Сутність ESG-підходу та його можливості в секторі зеленого будівництва

Структура ESG-підходу полягає в оцінці будівельної компанії або сектору не лише з позиції фінансових показників витрат та прибутків, але й за впливом на параметри навколишнього середовища, суспільство або соціальне середовище та якість корпоративного управління.

Такий принцип є основою сталого розвитку суспільства, який може допомогти українському будівельному сектору ризику, зокрема в управлінні охороною праці, та створювати довгострокову цінність для суспільства.

На рис. 1 наведена загальна схема екологічної складової ESG для зеленого будівництва з врахування цілей сталого розвитку та екологічних факторів, які можуть їх забезпечити.

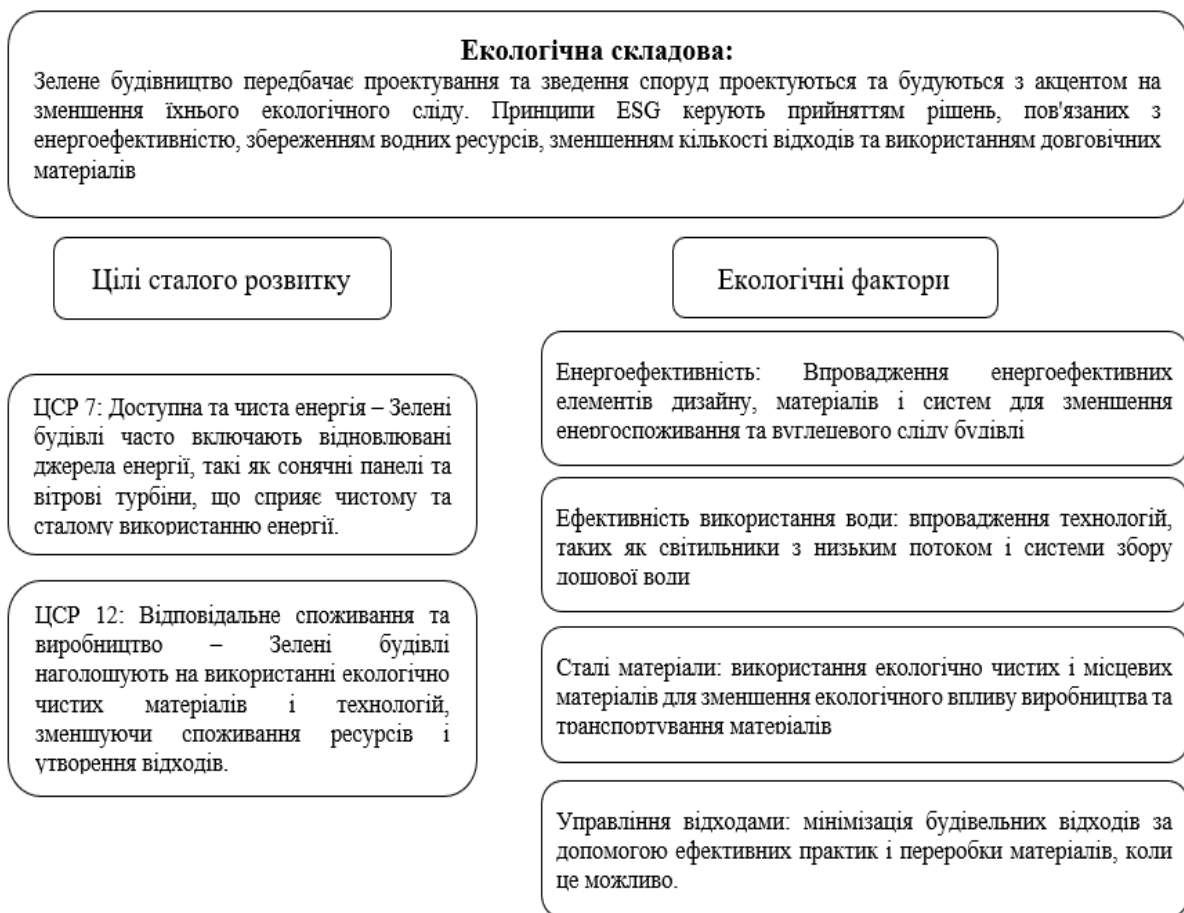


Рис. 1. Загальна схема екологічної складової ESG для зеленого будівництва
Сформовано автором на основі [3]

На рис. 2 наведена загальна схема соціальної складової ESG для зеленого будівництва з врахування цілей сталого розвитку та соціальних інструментів, які можуть забезпечити їхнє досягнення..

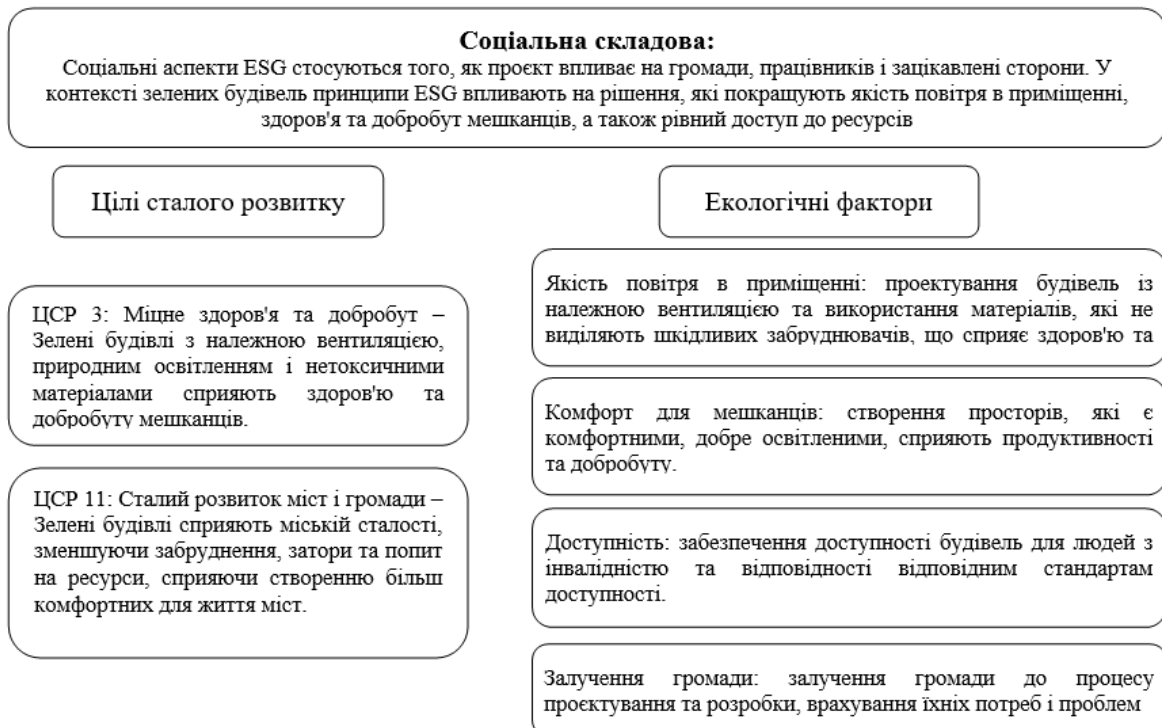


Рис 2. Загальна схема соціальної складової ESG для зеленого будівництва
Сформовано автором на основі [3]



Рис. 3. Загальна схема управлінської складової ESG для зеленого будівництва
Сформовано автором на основі [3]

Загальна схема управлінської складової ESG для зеленого будівництва з врахування цілей сталого розвитку та інструментів управління, які можуть забезпечити їхнє досягнення наведена на рис. 3.

Таким чином, можна стверджувати, що сфері зеленого будівництва широкий діапазон екологічних, соціальних та управлінських факторів, які можуть слугувати потужним та перспективним інструментом досягнення багатьох цілей сталого розвитку.

В той же час в державній системі управління охороною праці в будівельному секторі відсутній єдиний механізм оцінки екологічних, соціальних та управлінських рішень для забезпечення життя, здоров'я та умов праці робітників.

На нашу думку, система управління будь-якої будівельної організації повинна включати в себе не тільки затверджені державні норми та стандарти, але і також постійно розвиватися, шукати нові перспективи реалізації для досягнення цілей сталого розвитку суспільства.

3. Висновки

У ході проведеного дослідження встановлено, що ESG критерії є ефективним інструментом досягнення багатьох цілей сталого розвитку. ESG-підхід має ряд можливостей впровадження за допомогою екологічних, соціальних та управлінських факторів в зеленому будівництві. Можливості впровадження такого всебічного підходу до системи управління охороною праці будівельного сектору потребують подальшого детального вивчення з метою виявлення перспектив, критичних точок впровадження та реалізації такого сучасного підходу, що не тільки покращить умови праці працівників, але і надасть майбутній плацдарм залучення інвестицій зацікавлених сторін та міжнародного партнерства у будівельному секторі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Опальчук, Р., Чорновол, А., & Поплюйко, Я. (2025). Інтеграція esg-принципів у діяльність українських страхових компаній: глобальні тренди та місцеві особливості. Економіка та суспільство, (72). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-72-113>.

2. Кривомаз ТІ, Чалий ІГ, Гамоцький РО, Ільченко ІС, Циба АМ Критерії ESG у зеленій відбудові України. Екологічна безпека та природокористування. 2023. Вип. 4. С. 5-20. URL: <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001465328>.

3. ESG in the Design, Construction, and Operation of Green Buildings, and the Relation to SDGs [Електронний ресурс] / Trium Limited Consulting Engineers. 2023. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/esg-design-construction-operation-green-buildings/>.