

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**КРЮКОВСЬКА ЛЕСЯ ІВАНІВНА**

УДК 504.62:625.8+669:67.08

**ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ  
У ДОРОЖНЬОМУ БУДІВНИЦТВІ  
ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ ШЛАКІВ**

Спеціальність: 21.06.01 – екологічна безпека

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ — 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Національному транспортному університеті Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, доцент  
**Хрутьба Вікторія Олександрівна,**  
Національний транспортний університет,  
завідувач кафедри екології та безпеки життєдіяльності

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Радовенчик Вячеслав Михайлович,**  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
професор кафедри екології та технології рослинних полімерів,  
м. Київ

кандидат технічних наук, доцент  
**Коцюба Ірина Григорівна,**  
Житомирський державний технологічний університет,  
завідувач кафедри екології,  
м. Житомир

Захист відбудеться «23» травня 2019 року о 13<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.09 у Національному авіаційному університеті за адресою: проспект Космонавта Комарова, 1, корпус 12, ауд. 211, м. Київ, Україна, 03058.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: проспект Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058 і на сайті: [www.nau.edu.ua](http://www.nau.edu.ua).

Автореферат розісланий «22» квітня 2019 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 26.062.09, к.т.н., доцент



Л.М. Черняк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Дорожнє будівництво є галуззю, що забезпечує транспортну систему необхідною мережею автомобільних доріг. Техніко-експлуатаційні властивості автомобільних доріг повинні відповідати сучасним вимогам з точки зору їх якості, безпеки та впливу на навколишнє середовище (НС). Конструкції дорожнього одягу (КДО) і будівельні технології передбачають використання великих об'ємів природних кам'яних матеріалів, що має негативні наслідки для природних екосистем і є чинником екологічної небезпеки.

Зменшити об'єми використання природних будівельних матеріалів можна шляхом їх заміни альтернативними, зокрема шлаковими матеріалами, які є відходами металургійного виробництва. Металургійні шлаки (МШ) зберігаються у відвалах, які, своєю чергою, є суттєвим чинником екологічної небезпеки через забруднення атмосферного повітря, ґрунтів, поверхневих і підземних вод. Тому утилізація МШ через їх використання як альтернативних дорожньо-будівельних матеріалів (ДБМ) призведе до подвійного (синергетичного) екологічного ефекту в зменшенні техногенного навантаження на навколишнє середовище з вирішенням важливих завдань дорожнього будівництва щодо забезпечення заданих техніко-експлуатаційних характеристик КДО.

Це і визначило актуальність дисертаційної роботи, спрямованої на підвищення рівня екологічної безпеки використання МШ в дорожньому будівництві та оцінку рівня екологічної безпеки за різних сценаріїв використання МШ як альтернативних ДБМ.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота пов'язана з виконанням держбюджетних і госпдоговірних науково-дослідних робіт (НДР): «Розроблення і впровадження технології будівництва та реконструкції автомобільних доріг з використанням металургійних доменних і сталеплавильних шлаків як замінників традиційних дорожньо-будівельних кам'яних матеріалів» (2002–2005, номер державної реєстрації 0103U005338), «Розробка технологій поводження з відходами в транспортно-дорожньому комплексі» (2009–2010, номер державної реєстрації 0107U009610), «Підвищення довговічності дорожнього одягу нежорсткого типу автомобільних доріг з шарами основи із доменних шлаків» (2011–2012, номер державної реєстрації 0111U000092), НДР кафедри екології та безпеки життєдіяльності Національного транспортного університету «Удосконалення та розробка методів екологічної безпеки та безпеки життєдіяльності» (2013–2014, номер державної реєстрації 0112U004448; 2015–2016, номер державної реєстрації 0115U006782; 2017–2018, номер державної реєстрації 0118U001109).

**Мета та завдання дослідження.** Метою дослідження є підвищення рівня екологічної безпеки в дорожньому будівництві шляхом використання МШ для зменшення шкідливого впливу шлакових відвалів на НС та збереження природних кам'яних матеріалів за умови забезпечення заданих міцнісних характеристик КДО.

Для досягнення мети було поставлено такі **завдання**:

- обґрунтувати можливості підвищення рівня екологічної безпеки в дорожньому будівництві за рахунок використання відходів металургійних виробництв як альтернативних ДБМ;

- розробити методика оцінювання екологічної безпеки використання МШ як заміника природного матеріалу в дорожньому будівництві;

- провести експериментальні дослідження якісних характеристик МШ в окремих фазах життєвого циклу для визначення вимог до шлаків як ДБМ та вимог до КДО на основі шлаків;

- визначити можливі обсяги заміни природних матеріалів металургійними шлаками з урахуванням особливостей КДО доріг різної категорії;

- провести порівняльне оцінювання техніко-експлуатаційних властивостей КДО різних категорій доріг з використанням природних та альтернативних матеріалів;

- провести оцінювання рівня екологічної безпеки та еколого-економічної ефективності за різних сценаріїв використання МШ як ДБМ.

*Об'єктом дослідження* в дисертаційній роботі є процеси забезпечення екологічної безпеки в дорожньому будівництві під час використання МШ як альтернативних ДБМ.

*Предметом дослідження* є оцінювання рівня екологічної безпеки в окремих фазах життєвого циклу перетворення МШ в елементи КДО з урахуванням зміни впливу на НС металургійних шлаків як відходів виробництва та збереження природних матеріалів за умови забезпечення заданих міцнісних характеристик КДО.

**Методи дослідження.** Основні положення роботи, результати та висновки базуються на узагальненні результатів теоретичних та експериментальних досліджень. Під час виконання досліджень застосовувались документальні, натурні методи моделювання із застосуванням апробованих та науково обґрунтованих методик розрахунку КДО. Для побудови системної моделі оцінювання екологічної безпеки використання МШ у дорожньому будівництві застосовувались методи системного аналізу та кореляційно-регресійний аналіз. Експериментальні дослідження проводились із застосуванням методів планування експерименту і статистичного оброблення отриманих результатів.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у тому, що:

- уперше розроблено системну модель оцінювання екологічної безпеки використання МШ як заміника природного матеріалу в дорожньому будівництві, яка включає підсистеми поводження з відходами та будівництва доріг, описує основні процеси життєвого циклу перетворення МШ у ланцюзі «відходи – сировина – матеріал – елемент конструкції», вхідні, вихідні параметри процесів і зворотні зв'язки та дозволяє аналізувати всі фази життєвого циклу МШ, визначити основні вимоги до нього як сировини та ДБМ, а також вимоги до КДО на основі шлаків;

- уперше розроблено метод визначення можливих обсягів заміни природних матеріалів МШ на основі формування морфологічних структур дорожнього одягу з використанням МШ для доріг різних категорій із заданими техніко-експлуатаційними характеристиками;

– запропоновано комплекс критеріїв оцінювання функціональних, технологічних, економічних та екологічних властивостей КДО із заданими обсягами використання МШ, а також критеріїв прогнозування рівня екологічної безпеки за різних сценаріїв використання МШ в дорожньому будівництві;

– знайшли подальший розвиток закономірності впливу хімічного складу МШ на їх механічні характеристики як ДБМ, які ґрунтуються на результатах кореляційно-регресійного аналізу експериментальних досліджень МШ різного походження, що дає змогу прогнозувати механічні властивості шлаків як ДБМ з урахуванням їх хімічного складу.

**Практичне значення одержаних результатів** складають:

– методика оцінювання рівня екологічної безпеки в дорожньому будівництві під час заміни природних кам'яних матеріалів МШ;

– вимоги до шлаків різних металургійних комбінатів як ДБМ та вимоги до КДО на основі шлаків, що знайшли відображення в нормативних документах, розроблених за участю автора;

– регресійні залежності модулів пружності шлаків від їх активності, що є вихідними величинами для визначення товщини шару основи ДО і дозволяють визначити необхідні обсяги заміни природного кам'яного матеріалу МШ;

– морфологічні структури дорожнього одягу для доріг різної категорії та геометричні розміри елементів конструкції, що можуть бути реалізовані з використанням металургійних шлаків;

– числові значення функціональних, технологічних, економічних та екологічних критеріїв КДО з використанням природних та альтернативних матеріалів.

Результати дисертаційної роботи взяті до використання в Державному підприємстві «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М. П. Шульгіна», м. Київ (Довідка № 20.1-1/1-630 від 27.12.2012 р.) та Управлінні з питань екології, енергоменеджменту та охорони праці Маріупольської міської ради, м. Маріуполь (Довідка № 32/28988 від 24.09.2018 р.).

Матеріали роботи застосовуються в навчальному процесі Національного транспортного університету під час викладання дисциплін «Екологія», «Управління поводження з відходами», «Стратегія сталого розвитку», «Екологічна безпека», «Управління соціальною та екологічною безпекою», що включають у себе курси лекцій, практичні і лабораторні заняття, курсові роботи (Довідка № 2436/01 від 22.10.2018 р.).

**Особистий внесок здобувача** полягає у: розробленні моделі життєвого циклу МШ [1, 7, 8]; аналізуванні та розробленні якісних показників до сировини і матеріалів з МШ [2, 9, 11]; розробленні методики визначення еколого-економічної ефективності використання МШ у дорожньому будівництві [5, 12]; визначенні комплексу критеріїв оцінювання рівня екологічної безпеки на окремих етапах життєвого циклу МШ як відходів металургійного виробництва, будівельних матеріалів та елементів конструкції дорожнього одягу [3, 8, 13, 16]; виконанні на основі морфологічного аналізу систематизації КДО нежорсткого типу з використанням альтернативних матеріалів [6, 14]; розробленні методики еколого-

економічного оцінювання КДО з шарами основи із доменних шлаків [2 – 5, 10 – 12, 15, 17, 18].

Дисертаційна робота є самостійним завершеним дослідженням автора в галузі екологічної безпеки.

**Апробація результатів роботи.** Основні наукові положення і результати роботи доповідалися й обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях: «Відходи виробництва та споживання, медично-екологічні і економічні аспекти» (м. Ялта, 2005); V Міжнародній науково-практичній конференції «Управління проектами: стан та перспективи» (м. Миколаїв, 2009); XX Міжнародній конференції «Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju pojazdow samochodowych i maszyn roboczych samojezdnych – Zarzadzanie i marketing w motoryzacji» (Rzeszow, 2009); Міжнародних науково-практичних конференціях «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства» (м. Львів, 2012, 2018); IV Всеукраїнській науково-практичній конференції «Охорона навколишнього середовища промислових регіонів як умова сталого розвитку України» (м. Запоріжжя, 2008); XI Всеукраїнській науковій конференції студентів, магістрантів і аспірантів «Регіональні екологічні проблеми» (м. Одеса, 2009); Всеукраїнських науково-практичних конференціях молодих учених і студентів «Екологічна безпека держави» (м. Київ, 2014 – 2017), науково-практичних конференціях науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів НТУ, 2003 – 2018 рр.

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 18 друкованих наукових праць, у тому числі одну статтю в розділі в колективній монографії, одну статтю у наукових періодичних виданнях інших держав з напряду, з якого підготовлено дисертацію, шість статей у фахових виданнях України з технічних наук, 10 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях, доповідь на Всеукраїнській науково-технічній конференції та два документи авторського права.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (168 найменувань) та 12 додатків. Матеріали дисертаційної роботи викладено на 188 сторінках друкованого тексту, ілюстровано 27 рисунками, текст містить 31 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, висвітлено наукове та практичне значення отриманих результатів, поставлено мету та визначено напрями її досягнення, дано загальну характеристику дисертаційної роботи.

**Перший розділ** присвячено аналізу науково-технічної літератури за темою дисертації та постановці завдання підвищення екологічної безпеки в дорожньому будівництві шляхом застосування металургійних шлаків. На основі досліджень вітчизняних і зарубіжних вчених визначено вплив на НС будівництва, ремонту та експлуатації автомобільних доріг під час реалізації окремих технологічних процесів.

Вирішенню проблеми використання промислових відходів як альтернативних матеріалів у будівництві присвячені наукові розробки

В. С. Бойчука, Н. В. Внукової, Ф. П. Гончаренка, І. Є. Євгенєва, Б. Р. Карімова, І. Г. Коцюби, Є. Д. Прусенка, В. М. Радовенчика, М. Ф. Саська, В. Ф. Скорченка, А. К. Славуцького, І. С. Чоборовської та ін. В їх роботах обґрунтовані дослідження у сфері охорони НС та раціонального природокористування під час проектування, будівництва та експлуатації автомобільних доріг. Зазначено, що у ході досліджень впливу дороги на НС під час технологічних процесів її будівництва та експлуатації питання оцінки екологічної безпеки вивчені недостатньо.

Дослідження властивостей МШ як заміників природних кам'яних матеріалів у дорожньому будівництві проводились багатьма авторами, однак всебічного оцінювання екологічної безпеки з урахуванням окремих етапів їх життєвого циклу не проводилось.

Огляд стандартів та методів оцінювання підвищення рівня екологічної безпеки при використанні альтернативних матеріалів у дорожньому будівництві показав, що існуючі методики не враховують усіх аспектів використання будівельних матеріалів з МШ.

Визначено, що шлакові матеріали слід розглядати як одні з найбільш технічно та економічно вигідних для використання в будь-яких будівельно-ремонтних роботах як сьогодні, так і в майбутньому. Поступове скорочення накопичення промислових відходів металургійної промисловості, обмеження обсягів їх утворення, розширення можливостей утилізації, знешкодження, екологічно-безпечне їх видалення, а також повторне використання для дорожнього будівництва дозволить досягнути збільшення рівня екологічної безпеки – використання відходів і зменшення екологічного ризику, заміна природних матеріалів – з іншого боку.

На підставі проведеного аналізу було побудовано «дерево проблем» впливу відвалів металургійних шлаків на НС та визначено актуальність теми роботи, сформульовані мета і завдання дослідження.

У **другому розділі** розроблено системну модель оцінювання екологічної безпеки (МОЕБ) використання МШ як заміника природного матеріалу в дорожньому будівництві (рис. 1), яка включає модель підсистеми поводження з відходами (МППВ) та модель підсистеми будівництва доріг (МПБД), і є основою розробленої методики.

На вході моделі є металургійні шлаки, які описуються відповідним набором параметрів: хімічного складу ( $Z=\{SiO_2, Al_2O_3, CaO, MgO, FeO_2\}$ ), модуля основності ( $M_o$ ), модуля активності ( $M_a$ ), коефіцієнта якості ( $K$ ), активності ( $R_{28}$ ), модуля пружності ( $E_{ш}$ ), що визначають їх механічні характеристики. Модель підсистеми поводження з відходами МППВ дозволяє оцінити екологічний ризик  $R$ , який створюють МШ як відходи, а також описує характеристики шлаку як сировини для будівництва доріг.

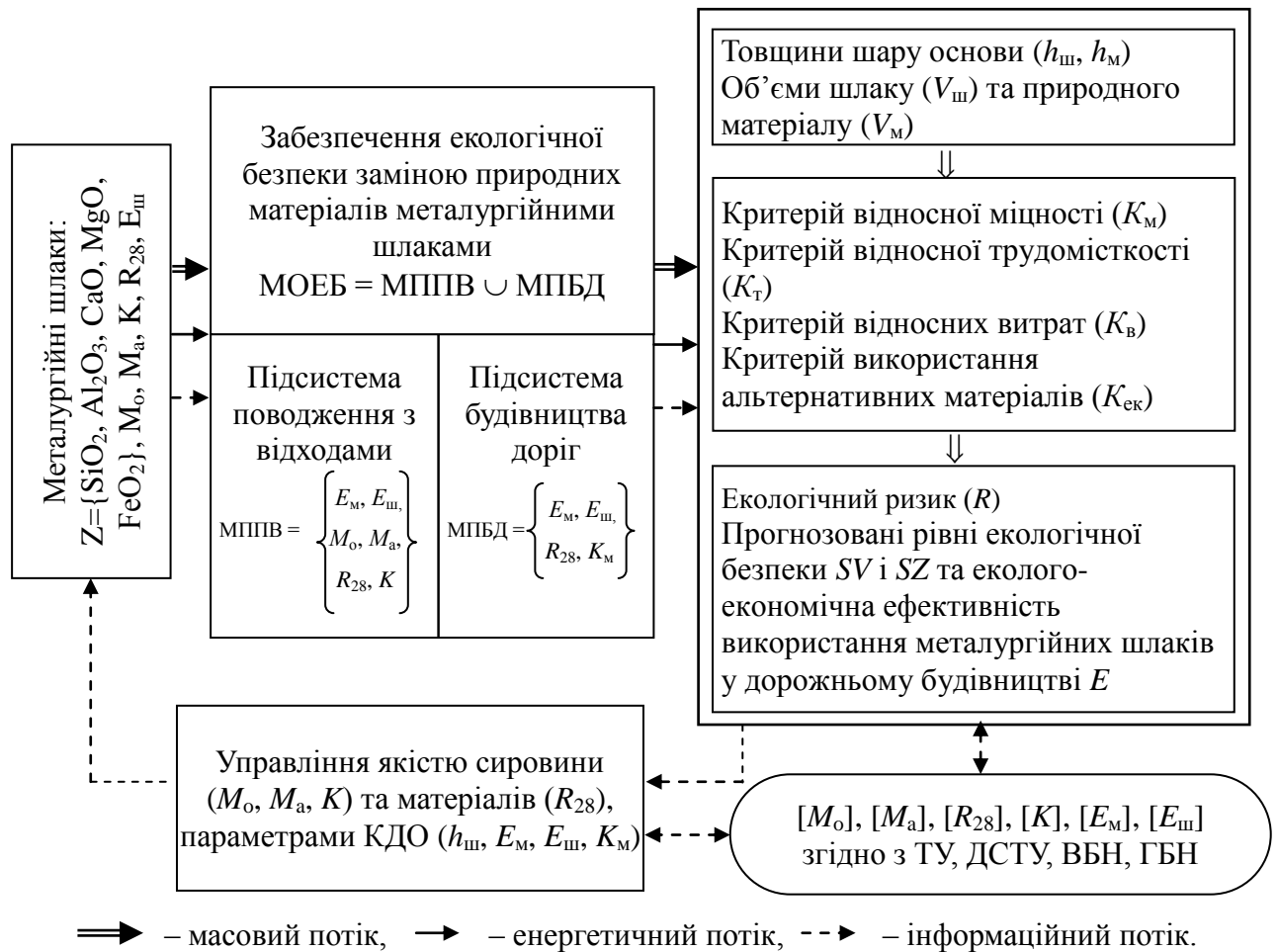


Рис. 1. Системна модель оцінювання екологічної безпеки використання МШ в дорожньому будівництві.

Модель підсистеми будівництва доріг МПБД описує умови перетворення металургійних шлаків як сировини в ДБМ, а також на основі заданих механічних характеристик шлаку дозволяє визначити відповідну товщину шару основи дорожнього одягу для забезпечення еквівалентних для випадку використання природних матеріалів механічних властивостей КДО.

На виході моделі є можливі об'єми використання металургійних шлаків  $V_{ш}$ , необхідні для заміни відповідного об'єму природних матеріалів  $V_m$ , а також комплекс критеріїв, які визначаються на основі отриманих значень обсягів і характеризують функціональні (критерій відносної міцності  $K_m$ ), технологічні (критерій відносної трудомісткості  $K_T$ ), економічні (критерій відносної витрати матеріалів  $K_B$ ) та екологічні властивості (критерій використання альтернативних матеріалів  $K_{ек}$ ) КДО з використанням МШ для доріг відповідних категорій, а також критерії екологічної безпеки  $SV$  і  $SZ$  та еколого-економічна ефективність за різних сценаріїв використання металургійних шлаків у дорожньому будівництві  $E$ .

Зворотний зв'язок моделі забезпечує управління вибором основних характеристик металургійних шлаків як сировини, матеріалу та КДО для забезпечення заданих міцнісних характеристик, наведених у відповідних ТУ, ВБН



та ДСТУ і представлених у моделі як обмеження. Системні об'єкти моделі поєднують відповідні масові, енергетичні та інформаційні потоки.

Таким чином, системна модель описує основні процеси життєвого циклу перетворення металургійних шлаків у ланцюзі «відходи – сировина – матеріал – елемент конструкції» (рис. 2).

Виходом процесу перетворення металургійних шлаків як відходів у сировину є показники  $M_0$ ,  $M_a$ ,  $K$ ,  $R_{28}$ , які залежать від хімічного складу шлаків і визначають їх механічні характеристики. За цими характеристиками оцінюється їх придатність як ДБМ. Основною характеристикою, яка визначає міцнісні властивості металургійних шлаків, зокрема його модуль пружності  $E_{ш}$ , є активність  $R_{28}$ , яка в моделі подана залежно від вмісту трьох основних компонентів шлаків ( $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ) у вигляді:

$$R_{28} = a_1 \cdot K_1 + a_2 \cdot K_2 + a_3 \cdot K_3 + a_{12} \cdot K_1 \cdot K_2 + a_{13} \cdot K_1 \cdot K_3 + a_{23} \cdot K_2 \cdot K_3 + a_{11} \cdot K_1^2 + a_{22} \cdot K_2^2 + a_{33} \cdot K_3^2, \quad (1)$$

де  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  – незалежні змінні (вміст хімічних складових металургійного шлаку  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ), %;  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{13}$ ,  $a_{23}$ ,  $a_{11}$ ,  $a_{22}$ ,  $a_{33}$  – емпіричні коефіцієнти.

Зворотний зв'язок цього процесу забезпечує вибір необхідних характеристик шлаку відповідно до обмежень, які визначені відповідними ТУ на шлак як сировини для дорожнього будівництва.

Виходом процесу перетворення МШ як сировини в матеріал для дорожнього будівництва є значення модуля пружності  $E_{ш}$ , який у моделі наведений у функції від активності шлаків  $R_{28}$  у вигляді:

$$E_{ш} = \sum_{i=0}^n b_i \cdot R_{28}^i, \quad (2)$$

де  $b_i$  – емпіричні коефіцієнти.

Зворотний зв'язок цього процесу забезпечує вибір необхідних значень модуля пружності відповідно до обмежень, які визначені відповідними ДСТУ і ТУ на матеріал для дорожнього будівництва.

Виходом процесу перетворення металургійного шлаку як матеріалу в елемент КДО є товщина шару основи дорожнього одягу  $h_{ш}$ , у конструкції якого використовується МШ як замітник природного матеріалу.

З використанням методу морфологічного аналізу і синтезу сформовано морфологічну матрицю можливих структур КДО з використанням природних та альтернативних матеріалів. У матриці визначено 13 морфологічних ознак основних функціональних елементів КДО (підстилаючий шар, основа та покриття) та варіанти їх реалізації. Поєднання окремих варіантів морфологічних ознак функціональних елементів формує окрему конструкцію КДО, яка може бути наведена у вигляді формули.

Так, морфологічна формула КДО автомобільної дороги I технічної категорії з використанням у нижньому шарі основи МШ має такий вигляд:

$$x_{1,9} \cup [(x_{2,9}; x_{3,2}) \wedge (x_{4,7}; x_{5,3}) \wedge (x_{6,11}; x_{7,3})] \cup [(x_{8,3}; x_{9,3}) \wedge (x_{10,3}; x_{11,1}) \wedge (x_{12,1}; x_{13,1})], \quad (3)$$

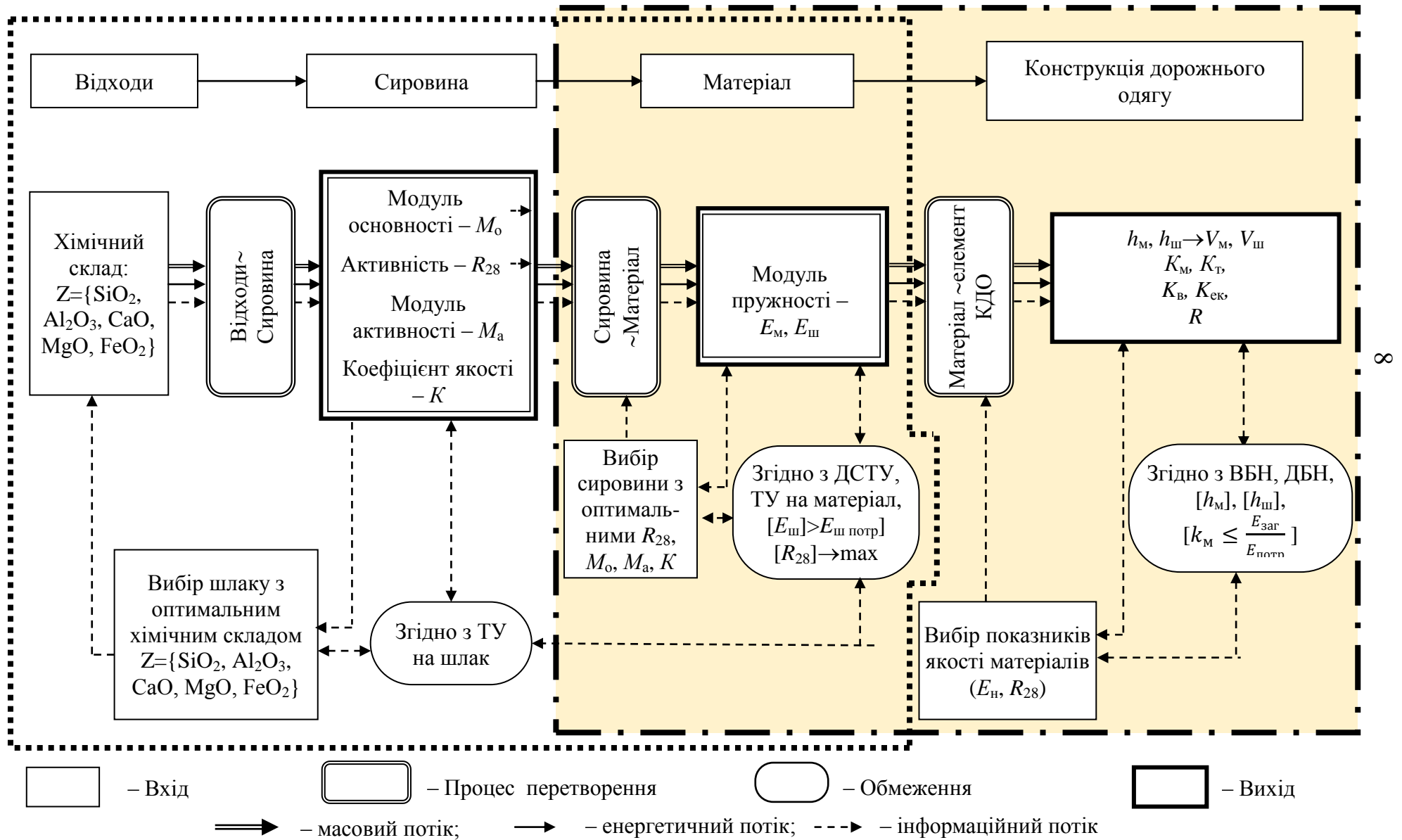


Рис. 2. Життєвий цикл МШ в системних об'єктах.

тобто це КДО з підстиляючим шаром із супіску важкого ( $x_{1,9}$ ); нижнім шаром основи із ґрунту, який оброблений неорганічним в'язучим ( $x_{2,9}$ ) товщиною від 12 см ( $x_{3,2}$ ); щебенем шлаковим ( $x_{4,7}$ ) товщиною від 15 см ( $x_{5,3}$ ); верхнім шаром – із гравійно-піщаної суміші ( $x_{6,11}$ ) товщиною від 8 см ( $x_{7,3}$ ). У структурі покриття є нижній шар з асфальтобетону пористого ( $x_{8,3}$ ) товщиною понад 8 см ( $x_{9,3}$ ); середній шар з асфальтобетону пористого ( $x_{10,3}$ ) товщиною понад 3 см ( $x_{11,1}$ ) та верхній шар з асфальтобетону дрібнозернистого ( $x_{12,2}$ ) товщиною шару понад 3 см ( $x_{13,1}$ ).

Розроблений метод дає можливість синтезувати різноманітні КДО і здійснити перебір усіх можливих альтернатив формування КДО для вибору такої, яка буде відповідати всім вимогам якості та екологічної безпеки.

Сформовані конструкції з використанням природних матеріалів та металургійних шлаків розраховувались згідно з ВБН В.2.3-218-186-2004.

Основними параметрами, які визначають можливі обсяги заміни природних матеріалів МШ, є товщини шарів основи дорожнього одягу, які забезпечують еквівалентну міцність КДО.

Значення товщини шару основи з металургійним шлаком  $h_{ш}$  визначається за умови еквівалентної міцності шару у випадку використання в конструкції природного матеріалу висотою  $h_{м}$ :

$$h_{м} \cdot E_{м} = h_{ш} \cdot E_{ш}. \quad (4)$$

Тоді товщина шару основи з металургійним шлаком  $h_{ш}$  для забезпечення заданих міцнісних властивостей КДО буде визначатись залежністю:

$$h_{ш} = \frac{h_{м} \cdot E_{м}}{E_{ш}}, \quad (5)$$

де  $E_{м}$  – модуль пружності природного матеріалу, МПа.

З використанням отриманих значень товщини основи КДО  $h_{м}$  і  $h_{ш}$  та відповідних їм об'ємів заміни природних матеріалів  $V_{м}$  металургійними шлаками  $V_{ш}$  визначаються критерії оцінки техніко-експлуатаційних властивостей КДО (табл. 1), які характеризують функціональні, технологічні, економічні та екологічні властивості КДО з використанням традиційних та альтернативних матеріалів.

Таблиця 1

### Критерії оцінки техніко-експлуатаційних властивостей КДО

Критерій відносної міцності ДО	Критерій відносної трудомісткості ДО	Критерій відносних витрат	Критерій використання альтернативних матеріалів
$K_{м} = \frac{h_{ш} \cdot E_{ш}}{h_{м} \cdot E_{м}}$	$K_{т} = \frac{m_{ш}}{m_{м}} = \frac{V_{ш} \cdot \rho_{ш}}{V_{м} \cdot \rho_{м}}$	$K_{в} = \frac{m_{ш} \cdot C_{ш}}{m_{м} \cdot C_{м}}$	$K_{ек} = \frac{m_{ш}}{m_{заг.КДО}}$

**Примітка.**  $E_{м}$  та  $E_{ш}$  – розрахунковий модуль пружності шару основи ДО із природних матеріалів та металургійних шлаків, МПа;  $m_{м}$ ,  $m_{ш}$  і  $m_{заг. КДО}$  – маса природного матеріалу, шлакового матеріалу та загальної конструкції дорожнього одягу, т;  $V_{м}$  і  $V_{ш}$  – визначені обсяги природних та шлакових матеріалів, м<sup>3</sup>;  $\rho_{м}$  і  $\rho_{ш}$  – насипна щільність природних та шлакових матеріалів, т/м<sup>3</sup>;  $C_{ш}$  і  $C_{м}$  – вартість металургійних шлаків та природних матеріалів, грн/т.

Оцінювання рівня екологічної безпеки використання МШ в дорожньому будівництві проводилось за двома критеріями:

1) за ступенем заміни річної потреби природних матеріалів при заданих обсягах дорожнього будівництва:

$$SZ = \frac{M_3}{M_{\pi}}, \quad (6)$$

де  $M_3$  – маса природного матеріалу, який може бути замінено МШ, т;  $M_{\pi}$  – річна потреба природних матеріалів при заданих обсягах дорожнього будівництва, т;

2) за ступенем використання річного обсягу утворення МШ:

$$SV = \frac{M_{\text{в}}}{M_{\text{у}}}, \quad (7)$$

де  $M_{\text{в}}$  – маса МШ, який потрібно для заміни прогнозованого обсягу природних матеріалів, т;  $M_{\text{у}}$  – річний обсяг утворення МШ, т.

Еколого-економічне оцінювання використання МШ у дорожньому будівництві проводилось за попередженими екологічними збитками НС, вираженими податковими платами, які стягуються за розміщення МШ як відходів, та зменшеними податковими зобов'язаннями з рентної плати за користування надрами через заміну необхідних природних матеріалів МШ.

**Третій розділ** присвячено експериментальним дослідженням металургійних шлаків як відходів, сировини, дорожньо-будівельного матеріалу та елементу КДО.

Побудовано дерево виникнення небезпечних ситуацій у відвалах металургійних комбінатів для подальшого оцінювання екологічного ризику.

Чинником негативного впливу МШ є обсяги їх накопичення у відвалах металургійних комбінатів, тому визначення ризику небезпеки збереження шлаків було оцінено за допомогою «дерева відмов». Оцінювання екологічного ризику показало, що загальна ймовірність виникнення небезпечної ситуації у відвалах металургійних комбінатів дорівнює 0,645, а основним чинником, що створює екологічну небезпеку, є наявний обсяг шлаків та шлакового пилу на території відвалів.

Експериментально встановлено та теоретично обґрунтовано закономірності впливу хімічного складу шлаків металургійних комбінатів ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат», ПАТ «ММК імені Ілліча», ПАТ «Запоріжсталь», ПАТ «Азовсталь» та ПАТ «ЄМЗ» на їх активність, яка характеризує міцнісні характеристики шлаків як матеріалу для дорожнього будівництва.

Визначення міцнісних характеристик шлаків шести металургійних комбінатів проводилося методами багатофакторного кореляційно-регресійного аналізу за результатами експериментальних досліджень.

Зокрема, математична модель активності металургійних шлаків ПАТ «Арселор-Міттал Кривий Ріг» має такий вигляд:

$$R_{28} = 7,847 \cdot K_1 - 11,268 \cdot K_2 - 3,622 \cdot K_3 + 0,446 \cdot K_1 \cdot K_2 + 0,083 \cdot K_1 \cdot K_3 + \\ + 0,004 \cdot K_2 \cdot K_3 - 0,214 \cdot (K_1)^2 - 0,297 \cdot (K_2)^2 + 0,005 \cdot (K_3)^2. \quad (8)$$

Дані проведених експериментальних та розрахункових досліджень властивостей шлаків у відвалах ПАТ «Арселор-Міттал Кривий Ріг» наведено в табл. 2.

Таблиця 2

**Характеристики властивостей шлаків  
ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»**

Номер проби	Вміст хімічних компонентів, %					Активність $R_{28}$ , МПа		Відносна похибка	Модуль пружності $E_{ш}$ , МПа	Модуль основності, $M_o$	Модуль активності, $M_a$	Коефіцієнт якості, $K$
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	FeO <sub>2</sub>	Екс-пер.	По моделі					
1	37	9,1	51,8	5,6	0,47	6,75	6,751	0,03	450	1,25	0,25	1,80
2	36,75	9	51,7	5,5	0,39	6,65	6,649	0,03	440	1,25	0,24	1,80
3	36,7	8,78	51,9	5,45	0,47	6,62	6,621	0,06	440	1,26	0,24	1,80
4	36,5	8,7	50,8	5,2	0,45	6,61	6,609	0,03	450	1,24	0,24	1,77
5	36,3	8,69	50,3	5,1	0,38	6,58	6,580	0,00	450	1,23	0,24	1,77
6	36,4	8,1	50,9	4,8	0,36	6,46	6,461	0,02	440	1,25	0,22	1,75
7	36	7,87	50,1	4,2	0,45	6,42	6,419	0,03	440	1,24	0,22	1,73
8	35,9	7,75	50,7	4,1	0,45	6,3	6,292	0,13	430	1,26	0,22	1,74
9	35,8	7,8	50,9	4,16	0,47	6,25	6,257	0,15	425	1,26	0,22	1,76
10	35	7,39	50,5	4,09	0,42	6,0	6,001	0,02	400	1,29	0,21	1,77

Аналогічні регресії побудовано для визначення активності металургійних шлаків на всіх дослідних комбінатах.

Перевірка адекватності моделей проводилась за критерієм Фішера  $F_p < F_T$ . Для всіх моделей табличне значення критерію Фішера  $F_{табл. (0,95)}$  дорівнює 5,32, а розрахункове  $F_p$  варіюється в межах від 1,882 до 3,168.

За допомогою кореляційно-регресійного аналізу результатів експериментальних досліджень отримано регресійні залежності модулів пружності шлаків від їх активності, що є вихідними величинами для визначення висоти шару основи дорожнього одягу і, відповідно, значення обсягів можливої заміни природних кам'яних матеріалів МШ.

Однофакторний регресійний аналіз дав змогу побудувати адекватні поліноми  $n$ -го порядку для визначення модуля пружності шлаків залежно від їх активності для шести металургійних комбінатів, коефіцієнт детермінації яких є  $R^2 \in [0,82; 0,92]$ , а розрахунковий критерій Фішера  $F_p \in [2,78; 5,12] < F_T(7,45)$ .

Узагальнення результатів моделювання дозволили визначити ті шлакові матеріали металургійних комбінатів, які можуть забезпечити необхідний модуль пружності 350 – 450 МПа.

Проаналізовано досвід використання МШ як елемента КДО під час будівництва автомобільної дороги «Київ – Одеса». Порівняльне оцінювання КДО з використанням МШ та природних матеріалів показало, що значення їх геометричних розмірів основних елементів знаходиться в рекомендованих межах, а значення коефіцієнта запасу міцності за критерієм граничного стану для КДО з МШ близькі до значень цього коефіцієнта для КДО з природним матеріалом. Це підтверджує доцільність використання МШ як ДБМ.

На основі визначених вимог до шлаків як дорожньо-будівельного матеріалу за участю автора розроблено ГР 3-036-2004 «Галузева система забезпечення єдності випробувань металургійних шлаків для дорожнього будівництва. Основні положення», ТУ У В.2.7-45.2-24432974-003-2004 «Шлаки сталеплавильні відвальні металургійного комбінату «Криворіжсталь» для дорожнього будівництва», ТУ У В.2.7-14.2-24432974-004:2005 «Шлаки доменні відвальні Маріупольського металургійного комбінату імені Ілліча для будівництва автомобільних доріг I категорії», ТУ У В.2.7-14.2-24432974-004:2005 «Шлаки доменні відвальні ВАТ «Криворіжсталь» для будівництва автомобільних доріг I категорії», ТУ У В.2.7-14.2-24432974-051:2008 «Шлаки сталеплавильні відвальні для дорожнього будівництва». В результаті визначених вимог до конструкцій дорожнього одягу на основі шлаку за участю автора розроблено ДСТУ Б В.2.7-149:2008 «Будівельні матеріали. Щебінь і щебенево-піщані суміші із шлаків металургійних для дорожніх робіт. Технічні умови», ГБН В.2.3-218-007:2012 «Споруди транспорту. Екологічні вимоги до автомобільних доріг. Проектування»; ГБН В.2.3-218-540:2012 «Споруди транспорту. Охорона довкілля при будівництві, ремонті та експлуатаційному утриманні автомобільних доріг».

У **четвертому розділі** здійснено оцінювання техніко-експлуатаційних властивостей сформованих типових КДО з використанням МШ для трьох категорій доріг за запропонованими функціональними, технологічними, економічними та екологічними критеріями (табл. 3).

Таблиця 3

**Оцінка критеріїв техніко-експлуатаційних властивостей КДО  
з використанням МШ**

Технічна категорія дороги	Параметри			Необхідний обсяг шлакового щебеню, $V_{ш}, м^3$	Модуль пружності, $E_{ш}, МПа$	Критерій відносної міцності, $K_M$	Критерій відносної трудомісткості, $K_T$	Критерій відносних витрат, $K_B$	Критерій використання альтернативних матеріалів, $K_{ек}$
	Кількість смуг руху, $k$ , шт.	Ширина смуги руху, $b$ , м	Товщина шару основи зі шлакового щебеню, $h_{ш}$ , м						
I	8	3,75	0,18	5400	450	0,95	0,68	0,26	0,30
			0,22	6600	400	1,03	0,83	0,31	0,33
II	2	3,75	0,17	1200	400	0,91	0,69	0,26	0,28
			0,19	1425	400	1,01	0,82	0,31	0,30
III	2	3,5	0,13	910	400	1,08	0,70	0,26	0,25
			0,15	1050	350	1,09	0,81	0,30	0,28

Критерій відносної трудомісткості  $K_T$  використання МШ знаходиться в межах 0,68...0,82, що вказує на зменшення трудовитрат на 18 – 32 % при заміні природних матеріалів МШ в досліджуваних КДО.

Заміна природних матеріалів МШ в досліджуваних КДО в розрахунку на 1 км дороги дозволить зменшити витрати на ДБМ в 1,3...1,5 рази.

Значення критерію використання альтернативних матеріалів  $K_{ек}$  показують, що в загальній структурі КДО дороги різної категорії обсяги МШ становлять 25 – 33 %.

Прогнозування рівня екологічної безпеки проводилося на основі методу «логіки можливого розвитку» за двома сценаріями використання МШ в дорожньому будівництві за умови 20 і 50 % заміни річної потреби природних матеріалів металургійними шлаками. Вихідними даними для прогнозування взято статистичні дані обсягів дорожнього будівництва та виробництва чавуну в 2018 р.

Визначено, що прогнозована маса збереженого природного матеріалу у випадку їх 20 % заміни шлаками для 3000 км доріг різних категорій становить 2 905 848 т, а у випадку 50 % заміни – 7 264 620 т. Необхідна маса МШ для заміни даного обсягу природних матеріалів становить 2 356 550 т та 5 891 375 т відповідно. Ступінь використання утворених МШ (рис. 3) у річному вимірі за I сценарієм 0,21, за II сценарієм – 0,52, що вказує на можливість утилізації річного обсягу утворення відходів шляхом використання їх як ДБМ на 21 і 52 % відповідно.

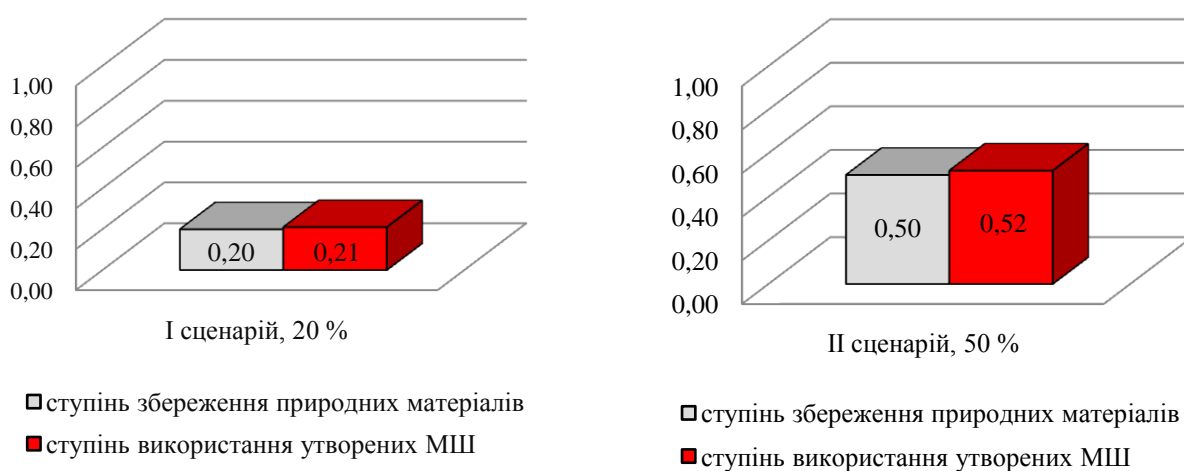


Рис. 3. Порівняльне оцінювання критеріїв рівня екологічної безпеки за різних сценаріїв використання МШ в дорожньому будівництві

Сумарний прогнозований еколого-економічний ефект використання МШ у дорожньому будівництві за попередженими екологічними збитками НС, вираженими податковими платами, які стягуються за розміщення МШ як відходів, та зменшеними податковими зобов'язаннями з рентної плати за користування надрами через заміну необхідних природних матеріалів МШ становить 235,22 млн грн і 588,06 млн грн відповідно.

Прогнозування негативного впливу на НС при зменшенні обсягів МШ у відвалах металургійних комбінатів показало, що при зменшенні на 20 % імовірності виникнення подій, що залежать від обсягів МШ, імовірність порушення екологічної рівноваги регіону становитиме 0,611, що на 5,2 % менше від розрахунку імовірності за базовим сценарієм, а при зменшенні на 50 % – на 13,9 %.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішувалося актуальне науково-технічне завдання підвищення рівня екологічної безпеки шляхом використання відходів металургійних виробництв як альтернативного матеріалу дорожнього будівництва

за рахунок зменшення негативного впливу відходів металургійних виробництв на НС та збереження природних кам'яних матеріалів при забезпеченні заданих техніко-експлуатаційних характеристик КДО. Стосовно мети та завдань дослідження було досягнуто таке:

1. Металургійні відходи, що зберігаються у відвалах, є суттєвим чинником екологічної небезпеки. Тому їх утилізація шляхом застосування як альтернативних ДБМ дасть змогу суттєво зменшити техногенне навантаження на НС та обсяги використання природних кам'яних матеріалів у дорожньому будівництві. Доведено, що підвищення рівня екологічної безпеки в дорожньому будівництві забезпечується шляхом використання МШ як альтернативних ДБМ при дотриманні заданих міцнісних характеристик КДО.

2. Розроблено методику оцінювання рівня екологічної безпеки в дорожньому будівництві під час заміни природних кам'яних матеріалів МШ, у межах якої:

- розроблено системну модель оцінювання екологічної безпеки використання металургійних відходів як заміника природного матеріалу в дорожньому будівництві, яка включає моделі підсистем поведінки з відходами та будівництва доріг, описує основні процеси життєвого циклу перетворення металургійних шлаків в ланцюзі «відходи – сировина – матеріал – елемент конструкції», вхідні і вихідні параметри процесів та зворотні зв'язки, які дозволяють реалізувати усі фази життєвого циклу металургійного шлаку та визначити основні вимоги до нього як ДБМ;

- розроблено метод визначення можливих обсягів заміни природних матеріалів металургійними шлаками на основі формування морфологічних структур дорожнього одягу з використанням металургійних шлаків для доріг різних категорій із заданими техніко-експлуатаційними характеристиками;

- запропоновано комплекс критеріїв оцінювання функціональних, технологічних, економічних та екологічних властивостей КДО з урахуванням можливих обсягів заміни природних матеріалів МШ, а також критеріїв прогнозування рівня екологічної безпеки за різних сценаріїв використання МШ в дорожньому будівництві.

3. На підставі експериментальних досліджень окремих фаз життєвого циклу металургійних шлаків:

- побудовано дерево виникнення небезпечних ситуацій у відвалах металургійних комбінатів для подальшого оцінювання екологічного ризику;

- експериментально встановлено та теоретично обґрунтовано закономірності впливу хімічного складу шлаків металургійних комбінатів ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат», ПАТ «ММК імені Ілліча», ПАТ «Запоріжсталь», ПАТ «Азовсталь» та ПАТ «ЄМЗ» на їх активність, яка характеризує міцнісні характеристики шлаків як матеріалу для дорожнього будівництва;

- за допомогою кореляційно-регресійного аналізу результатів експериментальних досліджень отримано регресійні залежності модулів пружності шлаків від їх активності, що є вихідними величинами для міцнісного розрахунку КДО і визначення необхідного значення товщини шару основи



дорожнього одягу і, відповідно, значення обсягів можливої заміни природних кам'яних матеріалів металургійними шлаками.

4. Проведено порівняльне оцінювання техніко-експлуатаційних властивостей сформованих типових морфологічних структур КДО з використанням МШ для трьох технічних категорій доріг. Показано, що при використанні МШ як ДБМ з рекомендованою товщиною шару основи дорожнього одягу критерій відносної міцності близький до одиниці, що свідчить про забезпечення вимоги еквівалентної міцності КДО з МШ. При цьому в загальній структурі КДО різних категорій доріг обсяги МШ становлять 25...33 %, що приводить до зменшення трудовитрат на будівництво на 18...32 % при відносному зменшенні вартості ДБМ в 1,3...1,5 рази.

5. Виконано прогнозування зміни рівня екологічної безпеки за умови 20 і 50 % заміни річної потреби природних матеріалів у дорожньому будівництві металургійними шлаками. Показано, що при цьому ступінь використання утворених МШ в річному вимірі становитиме 0,21 і 0,52, що вказує на можливість утилізації МШ шляхом використання їх як ДБМ на 21 і 52 % відповідно. Сумарний прогнозований еколого-економічний ефект використання МШ у дорожньому будівництві за попередженими екологічними збитками НС становитиме 235,22 млн грн і 588,06 млн грн відповідно.

6. Результати дисертаційної роботи використано під час розроблення: шести галузевих нормативних документів, чотирьох технічних умов та галузевих рекомендацій, які регламентують вимоги до шлаків як дорожньо-будівельного матеріалу, вимоги до КДО на основі шлаку та екологічні вимоги до автомобільних доріг і взято до використання в Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М. П. Шульгіна» та Управлінні з питань екології, енергоменеджменту та охорони праці Маріупольської міської ради.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Крюковська Л. І. Розробка моделі життєвого циклу металургійного шлаку як дорожньо-будівельного матеріалу / Л. І. Крюковська // Вісник Національного транспортного університету – К. : НТУ. – 2009. – Вип.18.– С. 206 – 211.

2. Крюковська Л. І. До оцінювання властивостей дорожнього одягу з використанням у конструкції альтернативних матеріалів / Л. І. Крюковська // Вісник Національного транспортного університету. – 2010. – Вип. 20. – С. 233–237.

3. Крюковська Л. І. Систематизація конструкцій дорожнього одягу нежорсткого типу з використанням альтернативних матеріалів / Л. І. Крюковська, В. О. Хрутьба // Вісник НТУ. – 2012. – Вип. 25. – С. 400–404.

4. Крюковська Л. І. До еколого-економічної оцінки заміни природних матеріалів металургійними шлаками при будівництві доріг / Крюковська Л.І. // Вісник Національного транспортного університету. – К. : НТУ, 2013. – Вип. 27. – С. 359–364.

5. Крюковська Л. І. Визначення показників екологічної безпеки проектів використання відходів як дорожньо-будівельного матеріалу / Л. І. Крюковська, В. О. Хрутьба, Г. О. Вайганг // Науковий журнал «Технічний аудит та резерви виробництва» – 2015. – № 4. – С. 64–71.

6. Крюковська Л. І. Математичне моделювання властивостей металургійних шлаків як дорожньо-будівельного матеріалу / Л. І. Крюковська // Науково-технічний збірник «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво» – 2017. – Вип. 100. – С. 97–104.

7. Крюковська Л. І. Розробка системи управління проектами використання металургійних відходів / Л. І. Крюковська, О. П. Кобзиста, В. О. Хрутьба // «Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju pojazdow samochodowych i maszyn roboczych samojedznych – Zarzadzanie i marketing w motoryzacji – SAKON'2009». Politechnika Rzeszowska. Tom XX. (23–26 wrzesnia 2009 r.) Rzeszow. 2009. – С. 271–274.

8. Системна модель екологічної безпеки застосування відходів як альтернативного дорожньо-будівельного матеріалу / Л. І. Крюковська // Проблеми хімотології. Теорія та практика раціонального використання традиційних і альтернативних паливно-мастильних матеріалів: Монографія / С. Бойченко, К. Лейда, В. Матейчик, П. Топільницький / за заг. ред. проф. С. Бойченка. – К. : Центр учбової літератури, 2017. – 452 с. – С. 407–407.

9. Крюковська Л. І. Використання доменних і сталеплавильних шлаків у дорожньому будівництві як вирішення проблеми утилізації відходів металургійних комбінатів / Л. І. Крюковська, В. Ф. Скорченко // Труды международной конференции «Отходы производства и потребления, медико-экологические и экономические аспекты». – 17–21 мая 2005 г. – г. Ялта. – К. : «Знання» України, 2005. – С. 211–212.

10. Крюковська Л. І. Застосування металургійних шлаків при будівництві автомобільних доріг як заміників традиційних дорожньо-будівельних кам'яних матеріалів / Л. І. Крюковська // Зб.: 63-наукова конференція професорсько-викладацького складу і студентів НТУ. Тези доповідей.– К. : НТУ. – 2007. С. 70.

11. Крюковська Л. І. Розробка алгоритму управління проектом використання відходів металургійного виробництва / Л. І. Крюковська, В. О. Хрутьба // Управління проектами: стан та перспективи: Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції. (16–18 вересня 2009 р.) – Миколаїв: НУК, 2009. – С. 69–70.

12. Крюковська Л. І. Використання металургійних шлаків у дорожньому будівництві як вирішення проблеми щодо їх утилізації / Л. І. Крюковська, В. О. Хрутьба // Регіональні екологічні проблеми. Матеріали II Міжнародної наукової конференції студентів, магістрантів і аспірантів. – Одеса: ОДЕКУ, 2009. – С. 170.

13. Крюковська Л. І. Підвищення рівня екологічної безпеки в проектах використання металургійних шлаків у дорожньому будівництві / Л. І. Крюковська // Матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства» (29 – 30 лист. 2012 р.). // Львів: ЛДУБЖД, 2012. – С. 367–368.

14. Крюковська Л. І. Методика еколого-економічного оцінювання дорожнього одягу нежорсткого типу при використанні доменних шлаків у шарах

основи / Л. І. Крюковська // LХІХ наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету. Тези доповідей. – К. : НТУ, 2013. – С. 87.

15. Крюковська Л. І. Перспективи підвищення екологічної безпеки дорожнього будівництва в сучасних умовах / Л. І. Крюковська, В. О. Хрутьба // Екологічна безпека держави: тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів – м. Київ, 15–17 квітня 2014р., НАУ / ред. О. І. Запорожець та ін. – К. : НАУ, 2014. – С. 14.

16. Крюковська Л. І. Вибір та моделювання критеріїв оцінювання рівня екологічної безпеки на окремих етапах життєвого циклу металургійних шлаків / Л. І. Крюковська // LХХ наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету. Тези доповідей. – К. : НТУ, 2014. – С. 88.

17. Крюковська Л. І. Формування вимог екологічної безпеки при використанні металургійних шлаків у дорожньому будівництві / Л. І. Крюковська // Екологічна безпека держави: тези доповідей ХІ Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів. – м. Київ, 20 квітня 2017 р., НАУ / ред. О. І. Запорожець та ін. – К. : НАУ, 2017. – С. 61.

18. Крюковська Л. І. Розробка методики оцінювання рівня екологічної безпеки при використанні металургійних шлаків у дорожньому будівництві / Л. І. Крюковська // Матеріали ІІІ Міжнародної науково-практичної конференції – «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи». – Львів : ЛДУБЖД, 2018. – С. 49–50.

## АНОТАЦІЯ

**Крюковська Леся Іванівна. Підвищення рівня екологічної безпеки у дорожньому будівництві шляхом використання металургійних шлаків.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – «Екологічна безпека». – Національний авіаційний університет, Київ, 2019.

Дисертаційну роботу присвячено підвищенню рівня екологічної безпеки у дорожньому будівництві шляхом використання відходів металургійних виробництв як альтернативного матеріалу дорожнього будівництва.

Розроблено методику оцінювання рівня екологічної безпеки в дорожньому будівництві під час заміни природних кам'яних матеріалів металургійними шлаками, яка включає моделі підсистем поведінки з відходами та будівництва доріг, описує основні процеси життєвого циклу перетворення металургійних шлаків в ланцюзі «відходи – сировина – матеріал – елемент конструкції дорожнього одягу».

Запропоновано комплекс критеріїв оцінювання техніко-експлуатаційних властивостей дорожнього одягу з використанням металургійних шлаків, а також

критеріїв прогнозування рівня екологічної безпеки за різних сценаріїв використання металургійних шлаків в дорожньому будівництві.

Експериментально встановлено закономірності впливу хімічного складу шлаків металургійних комбінатів на механічні характеристики шлаків як матеріалів для дорожнього будівництва.

Показано, що при використанні металургійного шлаку з рекомендованою товщиною шару основи забезпечуються вимоги до міцності дорожнього одягу. В загальній структурі конструкції дорожнього одягу різних категорій доріг обсяг металургійних шлаків становить 25,4...32,5 %.

Виконано прогнозування рівня екологічної безпеки за різних сценаріїв використання металургійних шлаків у дорожньому будівництві. Визначено сумарний прогнозований еколого-економічний ефект використання металургійних шлаків у дорожньому будівництві за попередженими екологічними збитками навколишньому середовищу.

**Ключові слова:** дорожнє будівництво; природні матеріали; металургійні шлаки; дорожній одяг; екологічна безпека; критерії оцінювання.

## ABSTRACT

**Kriukovska Lesia Ivanivna. Increasing the level of environmental safety in road construction using metallurgical slags.** – Manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 21.06.01 – «Ecological safety». – National Aviation University, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to increasing the level of environmental safety using metallurgical industry waste as an alternative material for road construction.

The methodology for assessing the level of environmental safety in road construction during the replacement of natural stone materials with metallurgical slags, which includes models of waste management and road building subsystems, describes the basic processes of the life cycle of the transforming the metallurgical slags in the chain «waste - raw material - material - element of road clothes».

Based on the formation of morphological structures of road clothes with the use of metallurgical slags for roads of various categories with given technical and operational characteristics the method of determination of possible volumes of replacement of natural materials by metallurgical slags is developed.

The evaluation criteria of technical and operational properties of road clothes with the use of metallurgical slags, as well as criteria for forecasting the environmental safety level in different scenarios of using metallurgical slags in road construction, are proposed.

The regularities of the influence of slagchemical composition of metallurgical enterprises on the mechanical characteristics of slags as materials for road construction have experimentally established.

Using correlation-regression analysis of the experimental results, regressive dependences of the modulus of elasticity of slags on their activity are obtained, which are the initial values for calculation of road clothes strength and determination of the

required value of the thickness of the base layer of road clothes and, accordingly, the value of volumes of possible replacement of natural materials by metallurgical slag.

The comparative estimation of technical and operational properties of the formed typical morphological structures with the use of slags for three technical categories of roads has been carried out. It is shown, using slag with the recommended thickness of the base of road clothes, the requirements for the durability of road clothes are provided. In the general structure of road clothes of various categories of roads, the volume of metallurgical slags is 25,4...32,5 %, which leads to a reduction of labor costs of construction by 18...32%, with a relative decreasing the cost of materials in 1,3...1,5 times.

Forecasting the level of environmental safety in different scenarios of the use of metallurgical slags in road construction is carried out. The total predicted ecological and economic effect of the use of metallurgical slags in road construction considering the ecological damage caused for the environment is determined.

The results of the dissertation work were used for the development of six sectoral standard documents, four technical specifications and sectoral recommendations that regulate the requirements for slag as road construction material, requirements for roadclothes using slags and environmental requirements for roads.

**Keywords:** road construction; natural materials; metallurgical slags; road clothes; environmental safety; evaluation criteria.