

УДК 666.943.3

*Г.М. Шабанова^а, С.М. Логвінков^б, В.М. Шумейко^а, А.М. Корогодська^а,
М.Д. Сахненко^а, Р.В. Кривобок^а, В.В. Волощук^а*

ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДІВ ШЛАКОЛУЖНИХ ЦЕМЕНТОВМІСНИХ БУДІВЕЛЬНИХ ВИРОБІВ

^а Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

^б Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків, Україна

У статті наведено результати визначення раціонального гранулометричного складу природних фракцій заповнювача для вібропресування бетонних виробів для дорожнього будівництва. Встановлено, що для розроблених шихт вібропресування може здійснюватися в енергоощадних режимах: зі зниженим віброускоренням, меншим пресовим зусиллям, скороченим часом вібрації або із заміною безперервного режиму вібрації на імпульсний. Розроблені склади характеризуються низькою схильністю до розфракціонування, тобто після перемішування та засипання у вимірювальний пристрій розшарування на великі й дрібні зерна у подібних випадках є вкрай незначним. Відповідно, на виробництві можна створювати запаси заздалегідь дозованих і змішаних шихт із їхнім бункерним зберіганням. Раціональним і рекомендованим до застосування в промислових умовах є заповнювач із таким співвідношенням фракцій, мас. %: гранітний гравій 45, гранітний відсів 15, пісок 40. На основі поданого заповнювача та раціонального складу шлаколужного в'язучого розроблено ефективні склади бетонів для дорожньо-будівельних виробів, оскільки вони відзначаються високою міцністю при розтягу й стиску, підвищеною морозостійкістю, зносостійкістю та стійкістю до дії кислот.

Ключові слова: математичне моделювання, гранітний гравій, гранітний відсів, пісок, насипна густина, коефіцієнт ущільнення, бетонні вироби, дорожнє будівництво.

DOI: 10.32434/0321-4095-2025-163-6-159-167

Вступ

Розвиток економічного потенціалу країни тісно пов'язаний із необхідністю впровадження найефективніших технологічних рішень у всіх сферах життєдіяльності. Значне місце в галузі будівельних матеріалів і виробів посідають питання зниження витрат матеріальних, трудових і фінансових ресурсів у контексті раціонального використання сировини.

Останні десятиліття ознаменувалися значними досягненнями в технології виробництва бето-

ну [1]. Саме в ці роки з'явилися та отримали широке застосування нові ефективні в'язучі, модифікатори для в'язучих і бетонів, нові технологічні прийоми у виробництві заповнювачів і самих бетонів – складних штучних конгломератів.

Бетон є найпоширенішим будівельним матеріалом у світі. Споживання бетону на одну людину оцінюється щонайменше в один кубічний метр на рік. Виробництво цементу, необхідного для такого обсягу бетону, супроводжується викидами значної кількості CO₂ – приблизно одна

© Г.М. Шабанова, С.М. Логвінков, В.М. Шумейко, А.М. Корогодська, М.Д. Сахненко, Р.В. Кривобок, В.В. Волощук, 2025



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Optimization of the compositions of slag-alkali cement-containing building products

тонна CO_2 на тонну цементу, а загалом на виробництво цементу припадає близько 7% від усього обсягу CO_2 , що продукується у світі [2]. Крім того, процес виробництва портландцементу є дуже енергоємним. Для виготовлення однієї тонни портландцементу переважно споживається 1,6 тонни сировини та близько 4,5 тис. мДж енергії [3]. Також для виробництва бетону потрібна велика кількість води. Отже, виробництво бетону має негативний вплив на довкілля через високе споживання енергії та сировини, а також значні викиди CO_2 .

Пріоритети у розвитку виробництва й використання бетонів змінюються: спостерігається перехід від традиційних шляхів удосконалення структури та складів у напрямку модернізації технологій їх отримання. За такого підходу цілком природною є підвищена увага до структури, насамперед, цементних бетонів.

У зв'язку з тим, що питання сталого розвитку та екологічної безпеки стають пріоритетними для різних галузей промисловості, будівництво стикається з необхідністю переходу на більш екологічні матеріали [4]. Використання шлако-лужних в'язучих на основі тонкоподрібнених доменних шлаків є перспективним напрямом у будівництві [5]. Підвищена міцність і стійкість до різноманітних впливів бетонів на шлако-лужних в'язучих робить їх особливо цінними для створення сучасних та ефективних будівельних конструкцій.

Прагнення до сталого розвитку вимагає ефективного використання промислових відходів, таких як доменні шлаки, які інакше можуть накопичуватися та забруднювати довкілля. Шлако-лужні в'язучі є екологічно чистою альтернативою, що зменшує вуглецевий слід і покращує стан навколишнього середовища. Крім того, такі матеріали можуть мати покращені механічні властивості та довговічність, що робить їх перспективними для будівельної галузі. Таким чином, оптимізація їхнього складу та міцнісних характеристик не лише сприяє розв'язанню екологічних проблем, а й відповідає зростанню попиту на ефективні та надійні будівельні матеріали.

Використання шлако-лужних бетонів у дорожньому будівництві потребує якісного підбору фракційного складу заповнювача, який забезпечує підвищену міцність отримуваних матеріалів. Тому метою даного дослідження є оптимізація гранулометричного складу інертного заповнювача, що містить: гранітний гравій фракції 5–10 мм, гранітний відсів фракції 0–3,5 мм та пісок фракції <0,3 мм.

Матеріали та методи досліджень

Гранітний гравій (далі по тексті позначався як **X**) і гранітний відсів (далі позначався як **Y**) були взяті зі Шматківського родовища (Полтавська обл.). Початковий гранулометричний склад і вологість не контролювалися, а в експериментах матеріали використовувалися у стані товарної поставки. Пісок було поставлено з підприємства ПрАТ «Кременчуцький річковий порт» (м. Кременчук) — позначався як **Z** — і також використовувався у стані товарної поставки. Дозування, змішування компонентів шихт, вимірвальний пристрій і принцип проведення випробувань детально наведені в роботах [6,7]. Відповідні насипні густини під навантаженням (ρ_i) та коефіцієнт ущільнення (K_y) також розраховувалися за методикою, поданою у роботі [6]. Для оптимізації гранулометричного складу застосовувався симплекс-гратковий метод математичного планування експерименту [8] із отриманням рівнянь регресії у вигляді поліномів певного порядку (залежно від кількості випробуваних складів і їх розташування на симплекс-гратці).

Результати та обговорення

За результатами попередніх досліджень [9] для розглянутих заповнювачів було обґрунтовано вибір концентраційної ділянки, зумовлений підвищеними значеннями насипної густини під навантаженням ($>1,8$) та коефіцієнта ущільнення ($>1,12$). На концентраційному трикутнику ділянка обмежена складами 1–6; склад 7 є контрольним і використовується для оцінювання похибки рівнянь регресії (рис. 1, табл. 1).

Значення ρ_{15} для складів шихт 1–6 (табл. 1) є меншими, ніж розрахункове для замкненої ділянки, обмеженої ізолінією $\rho_{15}=1,8$ (склад, мас. %: X 10–20; Y 50–70; Z 15–35).

Це свідчить про більш вузьку концентраційну ділянку складів із насипною густиною під навантаженням $\rho_{15} \geq 1,82$ (точка «е»), яка, щонайменше, розташована ближче до точки складу $X_{25}Y_{50}Z_{25}$. Виключення аналізованої концентраційної ділянки, що раніше вважалася перспективною, означає, що залежність ρ_{15} у цьому випадку має більш складний характер і потребує застосування поліномів вищого порядку для побудови рівняння регресії. На складний характер такої залежності вказує й високе значення $\rho_{15}=1,794$ для контрольного складу 7 шихти $X_{18}Y_{60}Z_{22}$, який належить до аналізованої ділянки. Очевидно, що раціональні склади шихт розташовані поблизу з'єднувальної прямої між точками складів $X_{18}Y_{60}Z_{22}$ – $X_{25}Y_{50}Z_{25}$ (рис. 1).

Для подальших експериментів з оптимізації

фракційного складу шихт можуть бути вибрані як склади, розташовані поблизу $X_{45}Y_{15}Z_{40}$, так і склади поблизу з'єднувальної прямої між точками $X_{18}Y_{60}Z_{22}$ – $X_{25}Y_{50}Z_{25}$. Зазначені останні склади не слід виключати з числа перспективних лише через те, що вони мають менші значення ρ_{15} порівняно зі складом шихти $X_{45}Y_{15}Z_{40}$. Шихта $X_{45}Y_{15}Z_{40}$ належить до так званих складів «із пропуском середньої фракції», тобто містить порівняно невелику кількість зерен середньої фракції. У таких шихтах простір між великими зернами заповнений товстими прошарками дрібнодисперсних частинок. За подібної структури матеріалу зростання тріщини під дією механічних навантажень не зустрічає суттєвих перешкод у вигляді великих зерен, енергія тріщини не витрачається на зміну траєкторії або розгалуження, що полегшує розширення магістральних тріщин і призводить до руйнування. Тому для подальших досліджень доцільно виконати оптимізацію гранулометричного складу шихт у двох зазначених концентраційних ділянках.

Для концентраційної ділянки в межах складів (1)–(2)–(3) (табл. 1) отримано рівняння регресії для ρ_{15} і K_y (рис. 2, 3) разом із їх графічними інтерпретаціями.

Значення ρ_{15} монотонно зростають від шихт у межах складів $X_{10}Y_{70}Z_{20}$ – $X_{10}Y_{60}Z_{30}$ у напрямку до складу $X_{20}Y_{60}Z_{20}$ (рис. 2). При цьому максимумами

відповідних парабол для ізоліній незначно зміщуються до сторони симплекс-гратки $X_{20}Y_{60}Z_{20}$ – $X_{10}Y_{60}Z_{30}$. Вище ізолінії $\rho_{15}=1,76$ виділяється концентраційна ділянка складів із високою насипною густиною для відповідних шихт.

Максимальні значення $\rho_{15}=1,77$ характерні для вузької концентраційної ділянки, склади якої розташовані поблизу сторони симплекс-гратки $X_{10}Y_{70}Z_{20}$ – $X_{20}Y_{60}Z_{20}$ (за вмісту останнього компонента в межах 60–90%).

Контрольний склад шихти $X_{18}Y_{60}Z_{22}$ (табл. 1) не належить до зазначеної концентраційної ділянки, проте має вище значення $\rho_{15}=1,794$. Це явище вже було нами відзначено раніше та пояснюється наддодатковим (нададитивним) характером формування насипної густини під навантаженням у шихтах досліджуваної концентраційної ділянки. Тому контрольний склад $X_{18}Y_{60}Z_{22}$ можна прийняти за раціональний для подальших досліджень у виробничих умовах. При цьому слід врахувати, що для цього складу відзначається мінімальне значення K_y (табл. 1), що вказує на його підвищену чутливість до вібронавантажень і узгоджується із загальними закономірностями зміни K_y у дослідженій концентраційній ділянці складів шихт (рис. 3).

Складність залежностей ρ_{15} і K_y для складів шихт поблизу $X_{25}Y_{50}Z_{25}$ потребувала проведення контрольних випробувань для двох складів:

Таблиця 1

Результати експериментів

№	Формульний запис складу	ρ_0	ρ_5	ρ_{10}	ρ_{15}	K_y
1	$X_{20}Y_{60}Z_{20}$	1,613	1,710	1,745	1,769	1,097
2	$X_{10}Y_{60}Z_{30}$	1,554	1,665	1,722	1,757	1,131
3	$X_{10}Y_{70}Z_{20}$	1,526	1,665	1,722	1,757	1,152
4	$X_{15}Y_{60}Z_{25}$	1,633	1,757	1,769	1,757	1,099
5	$X_{15}Y_{65}Z_{20}$	1,583	1,687	1,745	1,769	1,118
6	$X_{10}Y_{65}Z_{25}$	1,623	1,687	1,722	1,757	1,083
7 контроль	$X_{18}Y_{60}Z_{22}$	1,644	1,699	1,745	1,794	1,092
IV	$X_{45}Y_{15}Z_{40}$	1,807	1,860	1,873	1,887	1,044
8	$X_{50}Z_{50}$	1,710	1,790	1,820	1,846	1,080
13	$X_{25}Y_{50}Z_{25}$	1,644	1,757	1,794	1,820	1,107
14	$X_{50}Y_{25}Z_{25}$	1,583	1,644	1,665	1,687	1,066
15	$X_{25}Y_{25}Z_{50}$	1,583	1,654	1,710	1,745	1,103
a	$X_{37,5}Y_{12,5}Z_{50}$	1,676	1,769	1,807	1,833	1,094
b	$X_{50}Y_{12,5}Z_{37,5}$	1,699	1,757	1,807	1,833	1,079
c	$X_{37,5}Y_{25}Z_{37,5}$	1,644	1,722	1,769	1,794	1,092
d	$X_{37,5}Y_{37,5}Z_{25}$	1,623	1,687	1,733	1,757	1,083
e	$X_{25}Y_{37,5}Z_{37,5}$	1,623	1,733	1,782	1,820	1,122

$X_{21}Y_{55}Z_{24}$ і $X_{29}Y_{45}Z_{26}$. Перший із контрольних складів укладався в загальну закономірність зміни ρ_i (г/см³) і K_y : $\rho_0 = 1,602$; $\rho_5 = 1,676$; $\rho_{10} = 1,710$; $\rho_{15} = 1,745$; $K_y = 1,089$. Другий контрольний склад характеризувався експериментально високим значенням ρ_{15} (г/см³) за середніх значень K_y : $\rho_0 = 1,722$; $\rho_5 = 1,769$; $\rho_{10} = 1,807$; $\rho_{15} = 1,820$; $K_y = 1,057$. При цьому шихта складу $X_{29}Y_{45}Z_{26}$ має низьку схильність до розфракціонування під час пересипання, на що вказує високе значення ρ_0 . Це дає змогу здійснювати бункерне зберігання попередньо змішаної шихти. Відповідно, склад $X_{29}Y_{45}Z_{26}$ навіть більш перспективний для дослі-

джень у виробничих умовах, ніж раніше визначений перспективний склад $X_{18}Y_{60}Z_{22}$.

Зазначений склад $X_{29}Y_{45}Z_{26}$ належить концентраційній ділянці, обмеженій точками складів (13)–(15) (табл. 1), що дало змогу здійснити побудову рівнянь регресії для ρ_{15} і K_y у формі полінома другого порядку для симплекс-ґраткового плану експерименту за методикою Шеффе з урахуванням відомих експериментальних даних для складів, точки яких відповідають серединам сторін трикутного симплексу (рис. 1, точки «с», «d», «e» у табл. 1). Отримані рівняння регресії для

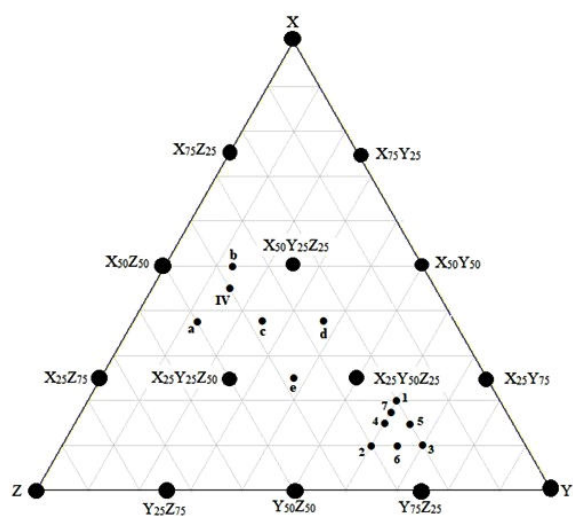


Рис. 1. Склади шихт серії експериментів на концентраційному трикутнику

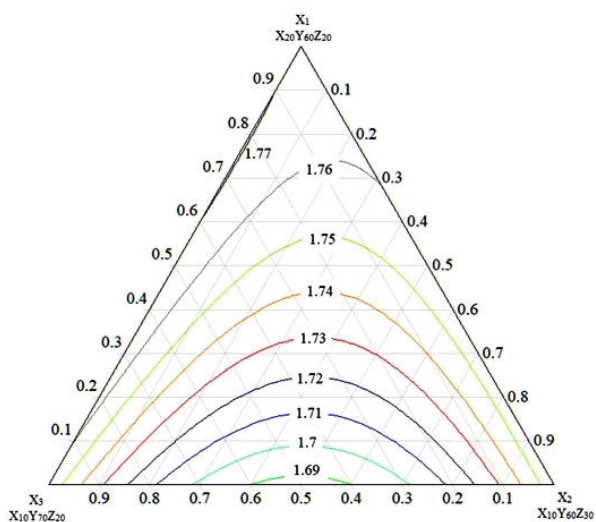


Рис. 2. Рівняння регресії та відповідні ізолінії ρ_{15} в концентраційній ділянці (1)–(2)–(3) (табл. 1):
 $\rho_{15} = 1,769X_1 + 1,757X_2 + 1,757X_3 - 0,024X_1X_2 + 0,024X_1X_3 - 0,28X_2X_3$

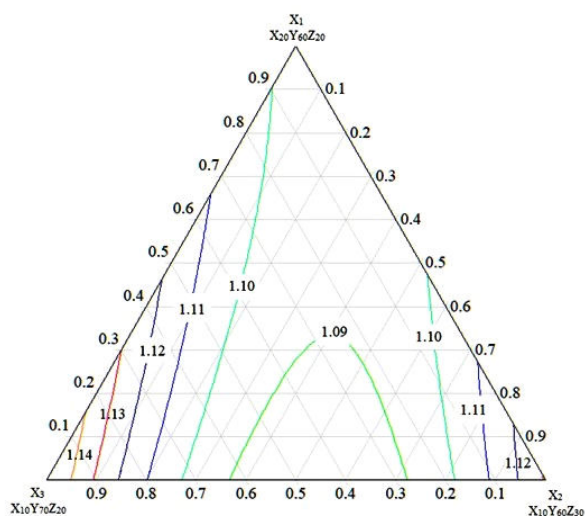


Рис. 3. Рівняння регресії та відповідні ізолінії K_y в концентраційній ділянці (1)–(2)–(3) (табл. 1):
 $K_y = 1,097X_1 + 1,13X_2 + 1,152X_3 - 0,06X_1X_2 - 0,026X_1X_3 - 0,234X_2X_3$

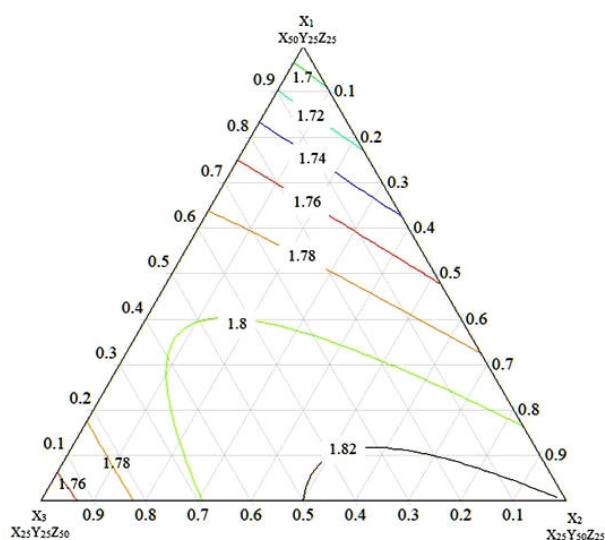


Рис. 4. Рівняння регресії та відповідні ізолінії ρ_{15} в концентраційній ділянці складів (13)–(15) (табл. 1):
 $\rho_{15} = 1,687X_1 + 1,820X_2 + 1,745X_3 + 0,014X_1X_2 + 0,312X_1X_3 + 0,15X_2X_3$

ρ_{15} і K_y , а також їх графічні інтерпретації подані на рис. 4 і 5, відповідно.

Для симплекс-гратки, обмеженої на рис. 1 точками складів $X_{50}Z_{50}$ – $X_{50}Y_{25}Z_{25}$ – $X_{25}Y_{25}Z_{50}$, пошук рівняння регресії також виконувався у формі полінома другого порядку, оскільки всі необхідні експериментальні дані для складових симплексу, а також для складів, точки яких відповідають серединам сторін (а, b, с), наведені в табл. 1. Отримані рівняння регресії для ρ_{15} і K_y разом із відповідними графічними інтерпретаціями подані на рис. 6 і 7.

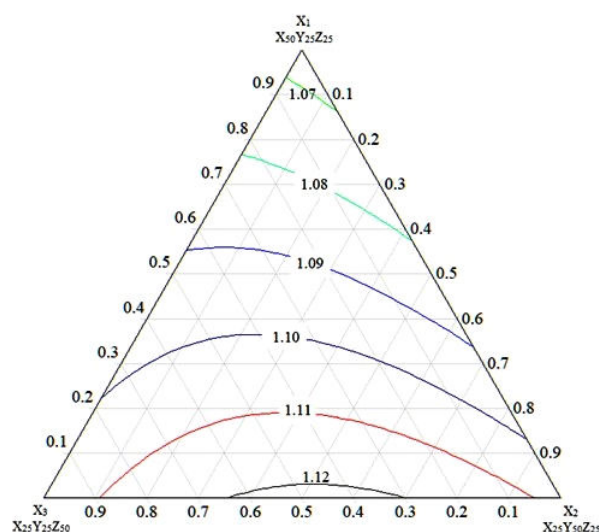


Рис. 5. Рівняння регресії та відповідні ізолінії K_y в концентраційній ділянці складів (13)–(15) (табл. 1):
 $K_y = 1,066X_1 + 1,107X_2 + 1,103X_3 - 14X_1X_2 + 0,03X_1X_3 + 0,068X_2X_3$

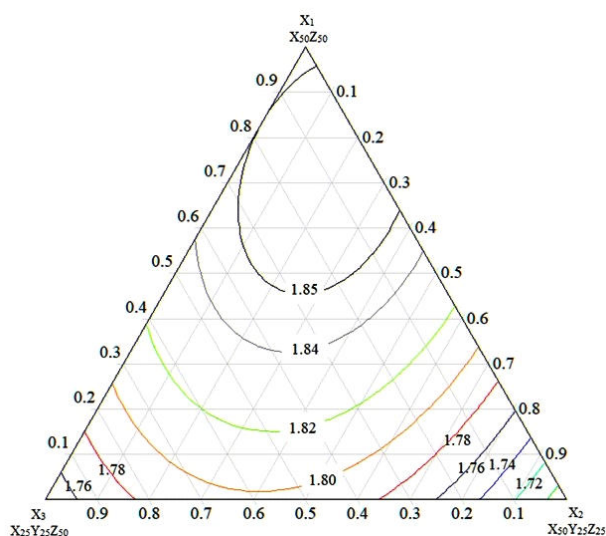


Рис. 6. Рівняння регресії та відповідні ізолінії ρ_{15} в концентраційній ділянці складів (8)–(14)–(15) (табл. 1):
 $\rho_{15} = 1,846X_1 + 1,687X_2 + 1,745X_3 + 0,266X_1X_2 + 0,15X_1X_3 + 0,312X_2X_3$

З рис. 6 видно, що склад шихти $X_{29}Y_{45}Z_{26}$ розташований дуже близько до ділянки оптимуму для аналізованого симплексу, яка чітко обмежена ізолінією $\rho_{15}=1,82$. Власне, цей склад можна прийняти за контрольний і використати для оцінювання адекватності рівняння регресії та релевантності математичної моделі під час прогнозування раціональних складів. Відхилення для ρ_{15} становило 0,83%, а для K_y – 4,12%. Відхилення експериментальних і розрахункових значень ρ_{15} і K_y менше 5% можна вважати такими, що задовольняють умови релевантності математичної моделі. Це дає змогу з високою точністю заздалегідь прогнозувати зручність укладання шихт в аналізованій концентраційній ділянці з використанням отриманих рівнянь регресії.

Концентраційна ділянка складів шихт із високими значеннями ρ_{15} на рис. 6 чітко окреслена ізолінією $\rho_{15}=1,85$ і займає досить значну площу – близько 20%. Зазначена ділянка повністю входить у межі зміни значень K_y : 1,08–1,09, що видно зі зіставлення рис. 6 та 7.

З урахуванням високих значень ρ_{15} у зазначеній концентраційній ділянці та її значної площі, а також експериментальних даних для складу IV (табл. 1), який належить до аналізованого симплексу, але не враховувався під час побудови рівняння регресії, було проведено додаткову серію експериментів для встановлення найзагальніших закономірностей зміни ρ_{15} і K_y із застосуванням полінома четвертого порядку. Результати експериментів наведено в табл. 2.

З результатів, наведених у табл. 2, видно,

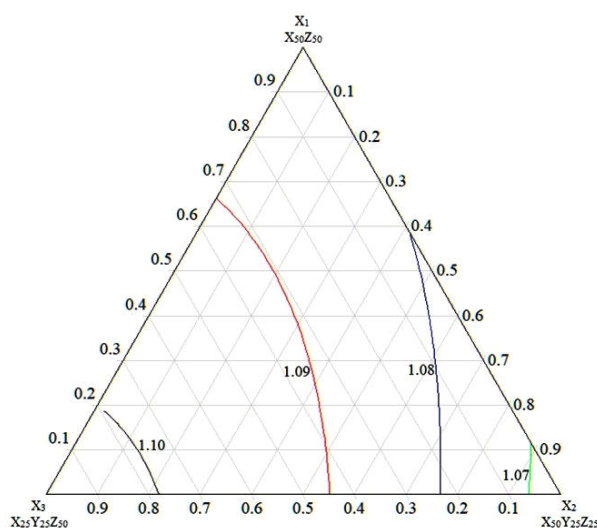


Рис. 7. Рівняння регресії та відповідні ізолінії K_y в концентраційній ділянці складів (8)–(14)–(15) (табл. 1):
 $K_y = 1,08X_1 + 1,066X_2 + 1,103X_3 + 0,024X_1X_2 + 0,01X_1X_3 + 0,03X_2X_3$

що всі склади мають високе значення ρ_{15} ; мінімальне значення у складі (II'), а максимальне — у складів (I') та (II''). Як і в попередніх випадках, прямої кореляції між ρ_{15} і K_y немає, і для складу (I') з максимальним значенням ρ_{15} спостерігається мінімальне значення K_y . Жоден зі складів додаткової серії експериментів не перевищив значення ρ_{15} для раніше відзначеного складу IV (табл. 1). Звуження концентраційної ділянки симплекс-гратки від $X_{50}Z_{50}-X_{50}Y_{25}Z_{25}-X_{25}Y_{25}Z_{50}$ (рис. 6, 7) до $X_{50}Z_{50}-X_{50}Y_{18,75}Z_{31,25}-X_{31,25}Y_{18,75}Z_{50}$ під час проведення додаткової серії експериментів і моделювання рівнянь регресій у формі поліномів 4-го порядку дозволило встановити більш точні закономірності та особливості змін ρ_{15} і K_y (рис. 8, 9).

По-перше, концентраційна ділянка складів шихт із $\rho_{15} > 1,82$ займає основну площу симплексу (рис. 8), а не близько 20% (рис. 6). По-друге, форма ізолінії $\rho_{15} = 1,84$ (рис. 8) є складнішою, протяжною, а обмежена нею ділянка прилягає своєю основною частиною (зі значеннями ρ_{15} порядку 1,95) до сторони симплекс-гратки $X_{50}Z_{50}-X_{50}Y_{18,75}Z_{31,25}$. По-третє, контрольний склад IV (табл. 1) належить до зазначеної ділянки складів шихт зі значеннями $\rho_{15} > 1,84$, але має аномально високе значення $\rho_{15} = 1,887$, що чітко виокремлює його як основний раціональний склад для перевірки у виробничих умовах.

Істотна корекція виявилася й у змінах значень K_y залежно від складів шихт у дослідженому симплексі, що наочно виділяє замкнену овальну

концентраційну ділянку, від якої значення K_y складним чином зростають у різних напрямках, особливо помітно в напрямку до вузької смуги складів поблизу сторони симплексу $X_{31,25}Y_{18,75}Z_{50}-X_{50}Z_{50}$ за вмісту останнього компонента в межах 0,68–0,85 мас. часток ($K_y > 1,093$).

Концентраційна ділянка із високими значеннями ρ_{15} покривається ділянкою з відносно низькими значеннями K_y (порівняння рис. 8 і 9), зокрема замкненою ділянкою з мінімальними значеннями $K_y < 1,075$. Склад IV (табл. 1) також охоплюється замкненою ділянкою з мінімальними значеннями K_y , але й у цьому випадку проявляє аномальність, маючи ще нижче значення $K_y = 1,044$ (табл. 1).

Таким чином, раціональним і рекомендованим до застосування в промислових умовах є заповнювач із таким співвідношенням фракцій, мас. %: гранітний гравій — 45, гранітний відсів — 15, пісок — 40.

На основі поданого заповнювача та раніше розробленого раціонального складу шлаколузкого в'язучого [9] були розроблені склади бетонів для дорожніх будівельних виробів. Співвідношення цемент:заповнювач — 1:3, водотверде співвідношення — 0,23. Зразки з бетону виготовлялися методом віброукладання з напівжорсткої бетонної суміші. Для формування виробів використовували бетонозмішувач БС-350 для отримання основної маси; бетонозмішувач БС-150 для отримання

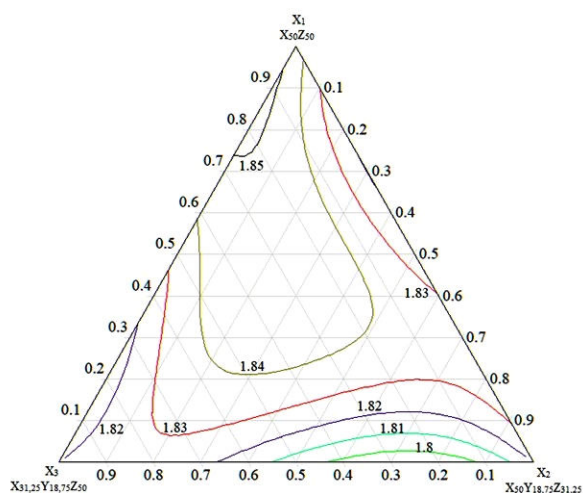


Рис. 8. Рівняння регресії та відповідні ізолінії ρ_{15} в концентраційній ділянці складів

$$X_{50}Z_{50}-X_{50}Y_{18,75}Z_{31,25}-X_{31,25}Y_{18,75}Z_{50};$$

$$\rho_{15}=1,846X_1+1,82X_2+1,82X_3-0,02925X_1X_2-0,0585X_2X_3-0,14625X_1X_2(X_1-X_2)+0,117X_1X_3(X_1-X_3)-0,1755X_2X_3(X_2-X_3)+0,73125X_1X_2X_3$$

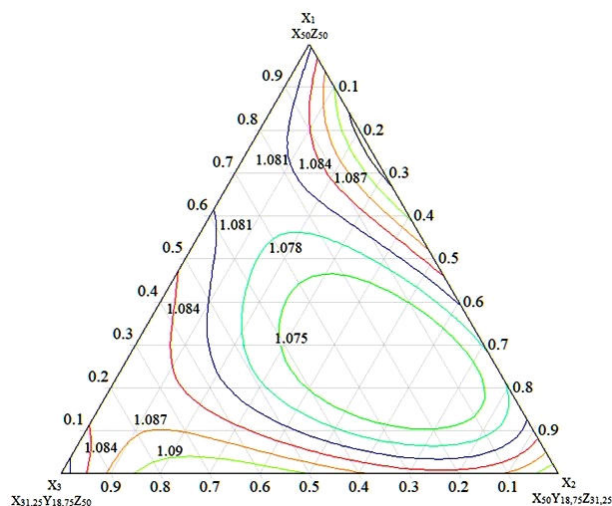


Рис. 9. Рівняння регресії та відповідні ізолінії K_y в концентраційній ділянці складів

$$X_{50}Z_{50}-X_{50}Y_{18,75}Z_{31,25}-X_{31,25}Y_{18,75}Z_{50};$$

$$K_y=1,08X_1+1,093X_2+1,079X_3-0,00225X_1X_2+0,01575X_1X_3+0,01575X_2X_3+0,112375X_1X_2(X_1-X_2)-0,04275X_1X_3(X_1-X_3)-0,07875X_2X_3(X_2-X_3)-0,38475X_1X_2X_3$$

факторного шару; лабораторний вібростіл СМЖ-539 із механічним кріпленням для форм і вібропрес ПС 130 з однією прес-формою (напівавтомат). Послідовність завантаження бетономішалки: гранітний гравій, гранітний відсів, пісок, вода (перемішування 3 хв), попередньо підготовлене шлаколузне в'язуче, затворювач (перемішування 5 хв). Після перенесення матеріалу в форму параметри виготовлення виробів були такими: частота коливань вібродвигуна – 2850 хв^{-1} ; амплітуда коливань – 0,5 мм; тривалість віброоброблення – 1 хв; пресовий тиск – 30–35 МПа. Зберігання сформованих виробів відбувалося під поліетиленовою плівкою протягом 1 доби, після чого вони виймалися з форм і зберігалися в аналогічних умовах не менше 7 діб. Виготовлені бетонні вироби були випробувані відповідно до ДСТУ Б В.2.7-238:2010 «Будівельні матеріали. Плити бетонні тротуарні. Технічні умови» (табл. 3).

Оскільки затвердження таких бетонів здійснюється за допомогою рідкого скла, вони стійкі до дії більшості мінеральних і органічних кислот, окрім фтороводневої, кремнефтороводневої кислот і лугів.

За результатами випробувань і на основі вимог державних стандартів можна зробити висно-

вок, що одержаний бетон на шлаколузному в'язучому може бути використаний для дорожнього будівництва, оскільки він характеризується високою міцністю на розтяг і стиск, підвищеною морозостійкістю, зносостійкістю та стійкістю до дії кислот.

Висновки

Таким чином, у результаті проведеного комплексу теоретичних і експериментальних досліджень подано результати визначення раціонального гранулометричного складу природних фракцій заповнювача для віброформування бетонних виробів для дорожнього будівництва.

Встановлено, що для розроблених шихт вібропресування можна здійснювати в енергоощадних режимах: зі зниженим віброприскоренням, меншим пресовим зусиллям, скороченим часом вібрації або замінюючи безперервний режим вібрації імпульсним.

Розроблені склади характеризуються низькою схильністю до розфракціонування, тобто після перемішування і засипання у вимірювальний пристрій розшарування на великі та дрібні зерна в таких випадках є вкрай незначним. Відповідно, на виробництві можна створювати запаси заздалегідь дозованих і змішаних шихт із їхнім бункерним зберіганням. Раціональним і рекомен-

Таблиця 2

Результати додаткової серії експериментів

№	Формульний запис складу	ρ_0	ρ_5	ρ_{10}	ρ_{15}	K_y
I'	$X_{43,75}Y_{12,5}Z_{43,75}$	1,722	1,794	1,820	1,846	1,073
II'	$X_{43,75}Y_{18,75}Z_{37,5}$	1,676	1,757	1,794	1,794	1,086
I''	$X_{50}Y_{6,25}Z_{43,75}$	1,665	1,745	1,794	1,820	1,093
II''	$X_{43,75}Y_{6,25}Z_{50}$	1,710	1,769	1,807	1,846	1,080
01	$X_{50}Y_{18,75}Z_{31,25}$	1,665	1,733	1,782	1,820	1,093
02	$X_{31,25}Y_{18,75}Z_{50}$	1,687	1,769	1,807	1,820	1,079

Таблиця 3

Результати випробувань технічних характеристик дорожніх бетонних виробів на основі шлаколузного в'язучого

Властивості	Вимоги ДСТУ Б В.2.7-238:2010	Результати випробувань
Водостійке співвідношення	не регламентується	0,08
Клас рухливості	не вище ПЗ	П2
Міцність при стисненні, МПа	M400	42
Клас за міцністю при стисненні	B35	B35
Міцність на розтяг при згині, МПа	3,6	3,8
Клас за міцністю на розтяг при згині	$B_{\text{вгв}} 3,6$	$B_{\text{вгв}} 3,6$
Марка бетону за морозостійкістю	F150	F150
Водопоглинання, %	не більше 5	4,2
Стирання, г/см^2	не більше 0,8	0,8

дованим до застосування в промислових умовах є заповнювач із таким співвідношенням фракцій, мас. %: гранітний гравій 45, гранітний відсів 15, пісок 40. На основі поданого заповнювача та раціонального складу шлаколузкого в'язучого розроблено ефективні склади бетонів для дорожніх будівельних виробів, оскільки вони відзначаються високою міцністю на розтяг і стиск, підвищеною морозостійкістю, зносостійкістю та стійкістю до дії кислот.

Подяка

Дослідження проводилися за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України в межах проєкту 2021.01/0316 «Розроблення складів композиційних матеріалів для дорожнього будівництва на основі багатотонажних відходів».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Studies on green concrete – a review* / Boobalan S.C., Salman Shereef M., Saravanaboopathi P., Siranjeevi K. // *Mater. Today Proc.* – 2022. – Vol.65. – Part 2. – P.1404-1409.
2. Ali M.B., Saidur R., Hossain M.S. A review on emission analysis in cement industries // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2011. – Vol.15. – No. 5. – P.2252-2261.
3. *Biases in life cycle assessment of circular concrete* / Habibi A., Bamshad O., Golzary A., Buswell R., Osmani M. // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2024. – Vol.192. – Art. No. 14237.
4. *Application of iron and steel slags in mitigating greenhouse gas emissions: a review* / Chen J., Xing Y., Wang Y., Zhang W., Guo Z., Su W. // *Sci. Total Environ.* – 2022. – Vol.844. – Art. No. 157041.
5. *A review on alkali-activated slag concrete* / Amer I., Kohail M., El-Feky M.S., Rashad A., Khalaf M.A. // *Ain Shams Eng. J.* – 2021. – Vol.12. – No 2. – P.1475-1499
6. *Analysis of the granulometric composition of a three-fraction charge for vibropressed products* / Shabanova H.M., Logvinkov S.M., Korohodska A.M., Shumeiko V.M., Shchukina L.P., Lisachuk G.V., et al. // *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. – 2024. – No. 6. – P.11-16.
7. *Optimization of the ratio of adjacent aggregate fractions for slag-alkali binder concrete* / Shabanova H.N., Logvinkov S.M., Korohodska A.M., Shumeiko V.N., Sviderskii V.A., Lisachuk G.V., et al. // *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. – 2024. – No. 6. – P.136-143.
8. Kumar Sh., Barai S.V. *Concrete fracture models and applications*. – Berlin: Springer-Verlag, 2011. – 262 p.
9. *Розробка складів шлаколузких в'язучих матеріалів для тротуарних виробів* / Шабанова Г.М., Корогодська А.М., Шумейко В.М., Борисенко О.М., Кривобок Р.В., Сахненко М.Д. // *Питання хімії та хім. технолог.* – 2023. – № 5. – P.147-154.

Надійшла до редакції 05.08.2025

OPTIMIZATION OF THE COMPOSITIONS OF SLAG-ALKALI CEMENT-CONTAINING BUILDING PRODUCTS

H.M. Shabanova ^a, S.M. Lohvinkov ^b, V.M. Shumeiko ^a, A.M. Korohodska ^a, M.D. Sakhnenko ^a, R.V. Kryvobok ^{a, *}, V.V. Voloshchuk ^a

^a National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

^b O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine

* e-mail: krivobok491@gmail.com

The article presents the results of determining the optimal granulometric composition of natural aggregate fractions for vibro-pressing concrete products intended for road construction. It has been established that for the developed mixtures, vibro-pressing can be carried out under energy-saving conditions – with reduced vibration acceleration, lower pressing force, shortened vibration time, or by replacing continuous vibration with a pulsed mode. The developed compositions are characterized by low susceptibility to fractionation; that is, after mixing and loading into the measuring device, the segregation of coarse and fine grains in such cases is extremely minor. Accordingly, it is possible in production to create stocks of pre-dosed and mixed batches with hopper storage. The optimal and industrially recommended aggregate composition is as follows, wt. %: granite gravel 45, granite screenings 15, and sand 40. Based on the proposed aggregate and the optimal composition of the slag-alkali binder, effective concrete mixtures for road-building products have been developed, as they exhibit high tensile and compressive strength, improved frost resistance, wear resistance, and resistance to acid attack.

Keywords: mathematical modeling; granite gravel; granite screenings; sand; bulk density; compaction coefficient; concrete products; road construction.

REFERENCES

1. Boobalan SC, Salman Shereef M, Saravanaboopathi P, Siranjeevi K. *Studies on green concrete – a review. Mater Today Proc.* 2022; 65: 1404-1409. doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.392.
2. Ali MB, Saidur R, Hossain MS. A review on emission analysis in cement industries. *Renew Sustain Energy Rev.* 2011; 15: 2252-2261. doi: 10.1016/j.rser.2011.02.014.
3. Habibi A, Bamshad O, Golzary A, Buswell R, Osmani M. Biases in life cycle assessment of circular concrete. *Renew Sustain Energy Rev.* 2024; 192: 114237. doi: 10.1016/j.rser.2023.114237.
4. Chen J, Xing Y, Wang Y, Zhang W, Guo Z, Su W. Application of iron and steel slags in mitigating greenhouse gas emissions: a review. *Sci Total Environ.* 2022; 844: 157041. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157041.

5. Amer I, Kohail M, El-Feky MS, Rashad A, Khalaf MA. A review on alkali-activated slag concrete. *Ain Shams Eng J.* 2021; 12: 1475-1499. doi: 10.1016/j.asej.2020.12.003.

6. Shabanova HM, Logvinkov SM, Shumeiko VM, Korohodska AM, Shchukina LP, Lisachuk GV, et al. Analysis of the granulometric composition of a three-fraction charge for vibropressed products. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii.* 2024; (6): 11-16. doi: 10.32434/0321-4095-2024-157-6-11-17.

7. Shabanova HN, Logvinkov SM, Shumeyko VN, Korohodska AN, Sviderskii VA, Lisachuk GV, et al. Optimization of the ratio of adjacent aggregate fractions for slag-alkali binder concrete. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii.* 2024; (6): 136-143. doi: 10.32434/0321-4095-2024-157-6-136-143.

8. Kumar S, Barai SV. *Concrete fracture models and applications.* Berlin, Heidelberg: Springer; 2011. 262 p. doi: 10.1007/978-3-642-16764-5.

9. Shabanova GM, Korogodska AM, Shumeiko VM, Borysenko OM, Lisachuk GV, Kryvobok RV, et al. Development of compositions of slag-alkaline binding materials for pavement products. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii.* 2023; (5): 147-154. (in Ukrainian). doi: 10.32434/0321-4095-2023-150-5-147-154.