

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 ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ ІНЕРТНИХ ЗАПОВНЮВАЧІВ ДЛЯ ЦЕМЕНТВІСНИХ ВІБРОФОРМОВАНИХ МАС

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

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

Наведено аналіз результатів первинної оптимізації гранулометричного складу гранітного відсіву, що використовується як середній та дрібний заповнювач для цементвісних вібропресованих мас. Аналіз проводився шляхом зіставлення значень насипної густини під навантаженням і коефіцієнта ущільнення, які характеризують зручність укладання обраних складів та здатність зерен розміщуватися в порах до утворення максимально можливої консолідованої структури. Для узагальнення отриманих результатів застосовувався симплекс-решітчастий метод математичного планування. За результатами опрацювання експериментальних даних із подальшим математичним аналізом рівнянь регресії та діаграм «склад–властивість» встановлено закономірності зміни насипної густини під навантаженням і коефіцієнта ущільнення трифракційних шихт залежно від їх складу. Концентраційна межа ділянки раціональних складів шихт обмежена таким співвідношенням фракцій, мас. %: гранітний гравій 25–50, гранітний відсів 12,5–37,5, пісок 25–50. Таке співвідношення забезпечує конгломерат зерен, структура якого найбільш наближена до монолітної, що дозволяє прогнозувати високі значення міцнісних характеристик і морозостійкості після вібропресування виробів.

Ключові слова: зручність укладання, математичне моделювання, гранітний гравій, гранітний відсів, пісок, насипна густина, коефіцієнт ущільнення.

DOI: 10.32434/0321-4095-2025-162-5-103-109

Вступ

Енергоефективні технології будівельних матеріалів на сьогодні є найбільш затребуваними в Україні [1]. Це зумовлено не лише традиційним прагненням знизити частку витрат на паливно-енергетичні та матеріальні ресурси виробництва, але й сучасною ситуацією в Україні. Вібропресування виробів із цементвісних мас без крупного

щебеню дає змогу забезпечити механізацію основних технологічних процесів за дуже низьких витрат електроенергії. Це особливо актуально під час виготовлення штучних виробів і конструктивних елементів для малоповерхового будівництва, безнапірних вузлів водопровідних систем, каналізаційних лотків, кілець колодязів, бордюрного каменю, тротуарної плитки тощо [2].

© 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 granulometric composition of inert aggregates for cement-containing vibro-formed mixes

Широкий асортимент таких виробів доцільно отримувати з цементовмісних мас зі зниженим вмістом цементу та води затворення при різних варіантах методів формування, що поєднують вібрацію та підпресування. Використання подібних комбінованих методів формування дозволяє обмежити вміст дорогого цементу (часто нижче 10–12 %) і забезпечити виробам необхідні міцнісні характеристики та морозостійкість за знижених параметрів тепло-вологісної обробки або навіть лише при використанні природного сушіння [3].

У таких технологіях особливої ваги набуває раціональний підбір фракційного складу заповнювача, який безпосередньо визначає значення відкритої пористості та параметри структури матеріалу у виробках, а отже, істотно впливає на міцність і морозостійкість. Безперечно, важливіми залишаються й інші технологічні параметри: марка та вміст цементу, вологість маси, частота й амплітуда вібрації, пресове зусилля та варіанти навантаження, габарити й форма оснащення для формування тощо. Водночас усі зазначені параметри взаємопов'язані, що робить задачу оптимізації процесу одержання виробів із наперед заданими характеристиками надзвичайно складною [4].

Разом із тим, оптимізацію гранулометричного складу інертного заповнювача можливо здійснити ще на стадії лабораторних експериментів, що створює базову основу для подальших досліджень у конкретних виробничих умовах. Саме ця мета була поставлена в даній роботі, а саме: оптимізувати гранулометричний склад 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 позначався як X) та гранітний відсів (далі позначався як Y) постачалися зі Шматківського родовища (Полтавська область), вихідний гранулометричний склад і вологість не контролювалися та в експериментах використовувалися у стані товарної поставки. Пісок постачався ПрАТ «Кременчуцький річковий порт» (м. Кременчук) – позначений Z і також застосовувався у стані товарної поставки. Для дозування компонентів використовували електронні ваги (марка Constant, модель 14192-640C) із точністю зважування 0,1 г при навішуванні по 500 г для кожного експерименту. Процес змішування компонентів шихт, вимірювальне обладнання та принцип здійснення випробувань детально наведено у [5,6]. Відповідні насипні густини під навантаженням (ρ_i) та коефіцієнт ущільнення (K_y) також розраховува-

лися згідно з методикою [5]. Варто зазначити, що коефіцієнт ущільнення характеризує швидкість усадки шихти після струшувань, тобто фактично її чутливість до низькочастотної вібрації. Значення K_y та ρ_i взаємопов'язані між собою опосередковано. Насипна густина шихти під навантаженням визначає зручність укладання, а саме здатність її зерен розміщуватися в порах до утворення максимально можливої консолідованої структури.

Для візуалізації запланованих експериментів фракційні склади шихт наносили на концентраційний рівносторонній трикутник, кожна точка якого відображає певний склад у барицентричних координатах $X_k Y_l Z_m$ (де X, Y, Z – гранітний гравій фракції 5–10 мм, гранітний відсів фракції 0–3,5 мм та пісок фракції <0,3 мм, відповідно, а нижні індекси вказують вміст кожного з компонентів у мас. %). Для оптимізації гранулометричного складу було виконано серію послідовних експериментів із проміжним аналізом результатів значень ρ_i та K_y з метою звуження концентраційних меж ділянки раціональних складів шихт. Паралельно для узагальнення отриманих результатів застосовувався симплекс-гратчастий метод математичного планування (метод Шеффе) [7] з отриманням рівнянь регресії у вигляді поліномів певного порядку (залежно від кількості випробуваних складів та їхнього розташування на симплекс-гратці). Симплекс-гратка для математичної обробки результатів експериментів ідентична концентраційному трикутнику складів шихт, але вміст компонентів для запису барицентри-

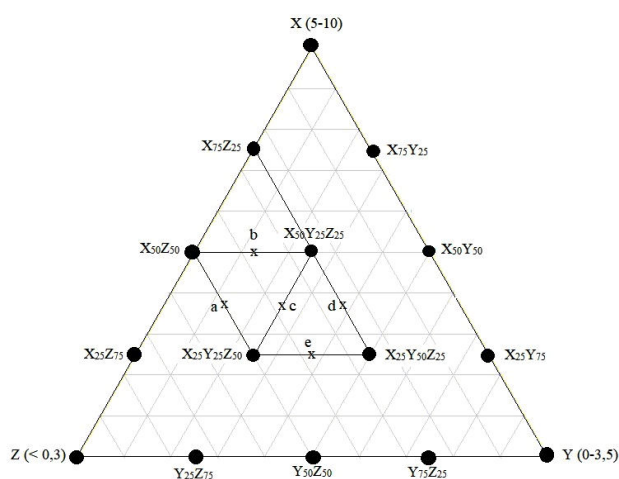


Рис. 1. Склади шихт першої серії експериментів на концентраційному трикутнику (хрестиками позначено склади шихт та проставлено a, b, c, d, e, які визначено для серії експериментів (2) – див. у тексті)

чних координат подано у масових частках, сумарно рівних одиниці. Наочність результатів математичного аналізу забезпечувалася побудовою на симплекс-гратці ізоліній для ρ_{15} та K_y в кожній із серій експериментів, розрахованих за рівняннями регресій.

Результати та обговорення

Серію експериментів (1) проводили на складах шихт, формульні записи яких відображено на концентраційному трикутнику (рис. 1). Розраховані значення ρ_i (г/см³) та K_y наведені в табл. 1.

На початку аналізу результатів експериментів варто відзначити загальну закономірність — для всіх складів шихт спостерігається монотонне зростання значень насипної густини під навантаженням від ρ_0 до ρ_{15} . Тому порівнювати зручність укладання шихт доцільно за значеннями ρ_{15} , як найбільш інформативного показника здатності шихт формувати конгломерат зерен, структура якого найбільш наближена до монолітної та дозволяє прогнозувати високі значення міцнісних характеристик і морозостійкості після вібропресування виробів.

При цьому значення K_y також бажано мати високими, оскільки для таких шихт вібропресування можна буде здійснювати в енергоощадних режимах: зі зниженим віброприскоренням, меншим пресовим зусиллям, скороченим часом вібрації або замінюючи безперервний режим вібрації імпульсним. Важливо також звертати увагу на значення ρ_0 , адже високі його показники характеризують низьку схильність шихт до розфракціонування, тобто після перемішування та

засипання у вимірювальний пристрій розшарування на великі та дрібні зерна у подібних випадках є мінімальним. Відповідно, у виробничих умовах можна створювати резерви заздалегідь дозованих і змішаних шихт із їхнім бункерним зберіганням.

Серед індивідуальних компонентів шихт найбільша насипна густина під навантаженням ρ_{15} спостерігається у гранітного відсіву, а найменша — у гранітного гравію (табл. 1). Двофракційна шихта без використання гранітного відсіву $X_{50}Z_{50}$ забезпечує максимальні значення показників ρ_{15} та ρ_0 , але середнє значення K_y (табл. 1). Значення ρ_{15} знижується у низці кращих із випробуваних складів шихт: $X_{50}Z_{50}-X_{25}Y_{50}Z_{25}-X_{75}Z_{25}-X_{25}Y_{25}Z_{50}$. Ці ж склади мають високі значення вихідної насипної густини ρ_0 , що вказує на їхню додаткову перевагу — низьку схильність до розфракціонування. У порядку спадання значень ρ_0 склади шихт розташовуються в ряд: $X_{50}Z_{50}-(X_{75}Z_{25}\equiv X_{25}Y_{50}Z_{25})-(X_{50}Y_{25}Z_{25}\equiv X_{25}Y_{25}Z_{50})$ (табл. 1). Разом із тим, у зазначених двофракційних шихт не спостерігаються високі значення K_y . Більш високі значення K_y характерні для двофракційних шихт без участі гранітного гравію. У порядку спадання значень K_y можна виділити ряд шихт: $Y_{50}Z_{50}-X_{25}Y_{50}Z_{25}-X_{25}Y_{25}Z_{50}-Y_{25}Z_{75}$ (табл. 1). Як видно, до цього ряду потрапили й два із раніше відзначених за високими значеннями ρ_{15} склади шихт: $X_{25}Y_{50}Z_{25}$ та $X_{25}Y_{25}Z_{50}$. Очевидно, що подальшу оптимізацію фракційного складу шихт слід проводити в більш вузькій концентраційній

Таблиця 1

Результати серії експериментів (1)

№	Формульний запис складу	ρ_0	ρ_5	ρ_{10}	ρ_{15}	K_y
1	X	1,377	1,408	1,423	1,439	1,045
2	Y	1,535	1,623	1,654	1,687	1,099
3	Z	1,526	1,592	1,623	1,644	1,077
4	$X_{25}Y_{75}$	1,481	1,544	1,583	1,613	1,089
5	$X_{50}Y_{50}$	1,377	1,431	1,456	1,481	1,076
6	$X_{75}Y_{25}$	1,439	1,490	1,526	1,535	1,066
7	$X_{25}Z_{75}$	1,464	1,499	1,517	1,535	1,048
8	$X_{50}Z_{50}$	1,710	1,790	1,820	1,846	1,080
9	$X_{75}Z_{25}$	1,644	1,699	1,733	1,757	1,069
10	$Y_{25}Z_{75}$	1,544	1,633	1,644	1,699	1,100
11	$Y_{50}Z_{50}$	1,499	1,544	1,633	1,665	1,111
12	$Y_{75}Z_{25}$	1,554	1,633	1,676	1,699	1,093
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

ділянці, обмеженій на рис. 1 точками, що відповідають складам $X_{50}Z_{50}$, $X_{75}Z_{25}$, $X_{25}Y_{50}Z_{25}$ і $X_{25}Y_{25}Z_{50}$, тобто тим, що входять до ряду з високими значеннями ρ_{15} . На концентраційному трикутнику точки цих складів шихт відповідають вершинам трапеції, складеної з трьох трикутників (рис. 1). Враховуючи, що в середині більшої сторони трапеції знаходиться точка складу $X_{50}Y_{25}Z_{25}$ із невисоким значенням ρ_{15} , ділянку перспективних складів можна ще звужити шляхом виключення недоцільних експериментів у концентраційній ділянці трикутника $X_{75}Z_{25}-X_{50}Z_{50}-X_{50}Y_{25}Z_{25}$ (рис. 1). Відповідно, у серії експериментів (2) обрані концентраційні ділянки, що складають два трикутники: $X_{50}Z_{50}-X_{50}Y_{25}Z_{25}-X_{25}Y_{25}Z_{50}$ і $X_{50}Y_{25}Z_{25}-X_{25}Y_{25}Z_{50}-X_{25}Y_{50}Z_{25}$ (рис. 1).

Оскільки експериментальні дані для складів, що відповідають вершинам зазначених трикутників, були визначені (табл. 1), для досліджень обрані шихти, точки яких відповідають середині сторін цих трикутників (на рис. 1 позначені хрестиками та мають позначення a, b, c, d, e).

Математична обробка результатів експериментів (табл. 1) із використанням методу Шеффе для пошуку рівняння регресії у формі полінома 4-го порядку дозволила до вище наведеної серії досліджень залучити перспективні складів для додаткових експериментів. Мотивацією для проведення додаткових експериментів став аналіз наочних закономірностей розподілу значень ρ_{15} (рис. 2) та K_y (рис. 3) на симплекс-гратці у всій концентраційній ділянці складів (рис. 1).

Ізолінії з однаковими значеннями ρ_{15} (рис. 2) та K_y (рис. 3) наочно інтерпретують відповідні рівняння регресії за умови неперервності функціональних залежностей у всій концентраційній ділянці складів. На рис. 2 видно дві ділянки складів шихт із високими значеннями ρ_{15} , обмежені ізолініями $\rho_{15}=1,8$. При цьому ділянка складів біля сторони X-Z концентраційного трикутника вже була запланована для подальших досліджень. Разом із тим, інша ділянка чітко обмежена і має певне зміщення у бік кута Y концентраційного трикутника. Саме тому для додаткових експериментів обрана трикутна ділянка складів, що практично повністю належить виділеній ізолінією ρ_{15} замкненій ділянці (рис. 2). Більше того, ці складів мають не лише високі значення ρ_{15} , а й одночасно високі значення K_y (рис. 3).

Результати експериментів для складів шихт, позначених a–e та відзначених хрестиками на рис. 1, наведені в табл. 2.

Відповідне рівняння регресії ізоліній рис. 2 для складів шихт, наведених у табл. 1, має такий

вигляд:

$$\begin{aligned} \rho_{15} = & 1,439X + 1,687Y + 1,644Z - 0,328XY + 1,218XZ - \\ & - 0,002YZ + 0,245XY(X-Y) + 1,731XZ(X-Z) - \\ & - 0,115YZ(Y-Z) + 1,547XY(X-Y)^2 - \\ & - 2,643XZ(X-Z)^2 + 0,723YZ(Y-Z)^2 - 10,515X^2YZ + \\ & + 11,416XY^2Z + 2,933XYZ^2 \end{aligned}$$

У результаті експериментів (табл. 2) відзначено два складів (a, b), для яких значення ρ_{15} вищі, ніж раніше зафіксовані у першій серії експериментів (табл. 1). При цьому склад a має досить високі значення K_y (табл. 2), а склад b – найвище значення вихідної насипної густини під навантаженням (ρ_0), тобто шихта не схильна до розфракціонування. Відповідно, результати цих експериментів мають позитивний ефект і дозволяють спрогнозувати складів шихт для подальшої оптимізації, що відповідають середині сторін трикутника з вершинами $X_{50}Z_{50}-X_{37,5}Y_{12,5}Z_{50}-X_{50}Y_{12,5}Z_{37,5}$ на рис. 1.

Результати експериментів запланованих складів шихт наведені в табл. 3 (для шихт на середині сторін трикутника складів $X_{50}Z_{50}-X_{37,5}Y_{12,5}Z_{50}-X_{50}Y_{12,5}Z_{37,5}$ застосована нумерація римськими цифрами I–III; склад IV – контрольний для оцінювання похибки рівнянь регресії). Складів шихт I–III характеризуються дещо меншими значеннями ρ_{15} порівняно з двофракційним складом шихти $X_{50}Z_{50}$ (табл. 2, 3).

Відповідне рівняння регресії ізоліній рис. 3 для складів шихт, наведених у табл. 1, має такий вигляд:

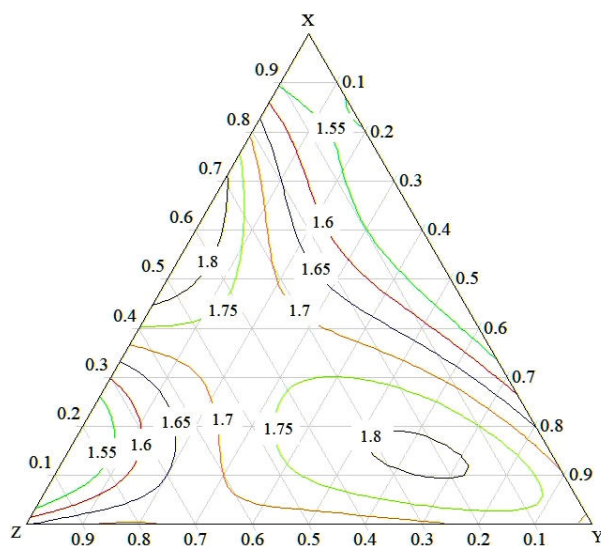


Рис. 2. Ізолінії значень ρ_{15} для складів шихт, наведених у табл. 1

$$K_y = 1,045X + 1,099Y + 1,077Z + 0,016XY + 0,076XZ + 0,092YZ + 0,021XY(X-Y) - 0,197XZ(X-Z) - 0,096YZ(Y-Z) + 0,053XY(X-Y)^2 - 0,357XZ(X-Z)^2 + 0,187YZ(Y-Z)^2 - 3,008X^2YZ + 2,053XY^2Z + 1,616XYZ^2$$

Ці шихти мають близькі значення ρ_{15} , що вказує на наявність екстремуму в концентраційній ділянці, обмеженій точками їх складів. На це також вказує максимальне значення $\rho_{15} = 1,887$ для контрольного складу IV (табл. 3), що належить до

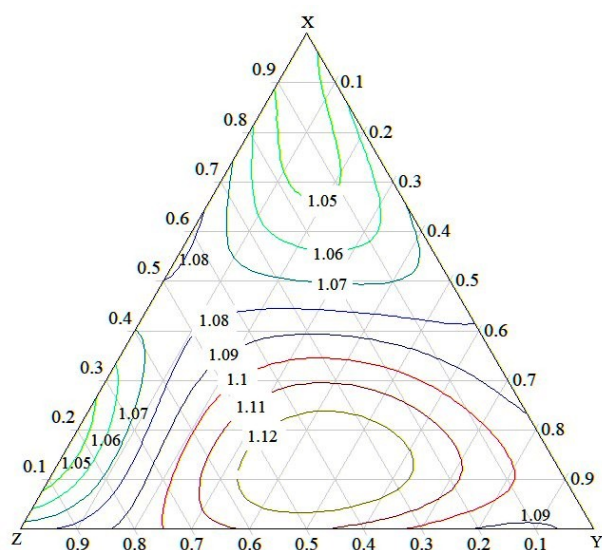


Рис. 3. Ізолінії значень K_y для складів шихт, наведених у табл. 1

досліджуваної концентраційної ділянки. При цьому значення K_y для контрольного складу IV є найнижчим, а початкова насипна густина під навантаженням ($\rho_0 = 1,807$ г/см³) – найвищою.

Для складів шихт I–III значення ρ_{15} є достатньо високими. Відповідно, у досліджуваній концентраційній ділянці слід очікувати менш виражену зручність укладання шихт при вібропресуванні, тобто у міжзерновому просторі збережеться багато порожнин. Тому для подальших досліджень доцільно виконати оптимізацію гранулометричного складу шихт у концентраційній ділянці, обмеженій $\rho_{15} = 1,8$ (рис. 2).

Висновки

У результаті здійсненого комплексу теоретичних та експериментальних досліджень проаналізовано дані первинної оптимізації гранулометричного складу трифракційної шихти заповнювача, що використовується для цементовмісних вібропресованих мас без урахування крупної фракції.

Аналіз проводився шляхом зіставлення значень насипної густини під навантаженням та коефіцієнта ущільнення, які характеризують зручність укладання обраних складів, здатність зерен розмішуватися в порах до утворення максимально можливої консолідованої структури. Для узагальнення отриманих результатів застосовувався симплекс-гратчастий метод математичного планування.

За результатами обробки експериментальних даних з подальшим математичним аналізом рівнянь регресії та діаграм «склад–властивість»

Таблиця 2

Результати експериментів для складів а–е

№	Склад	Формульний запис складу	ρ_0	ρ_5	ρ_{10}	ρ_{15}	K_y
1	a	$X_{37,5}Y_{12,5}Z_{50}$	1,676	1,769	1,807	1,833	1,094
2	b	$X_{50}Y_{12,5}Z_{37,5}$	1,699	1,757	1,807	1,833	1,079
3	c	$X_{37,5}Y_{25}Z_{37,5}$	1,644	1,722	1,769	1,794	1,092
4	d	$X_{37,5}Y_{37,5}Z_{25}$	1,623	1,687	1,733	1,757	1,083
5	e	$X_{25}Y_{37,5}Z_{37,5}$	1,623	1,733	1,782	1,820	1,122

Таблиця 3

Результати експериментів

№	Формульний запис складу	ρ_0	ρ_5	ρ_{10}	ρ_{15}	K_y
I	$X_{50}Y_{12,5}Z_{37,5}$	1,699	1,769	1,809	1,833	1,079
II	$X_{37,5}Y_{18,75}Z_{43,75}$	1,665	1,757	1,794	1,820	1,093
III	$X_{37,5}Y_{12,5}Z_{50}$	1,676	1,757	1,794	1,820	1,086
IV контроль	$X_{45}Y_{15}Z_{40}$	1,807	1,860	1,873	1,887	1,044

встановлено закономірності зміни насипної густини під навантаженням і коефіцієнта ущільнення трифракційних шихт залежно від їх складу.

Концентраційна межа ділянка раціональних складів шихт обмежена таким співвідношенням фракцій, мас. %: гранітний гравій 25–50, гранітний відсів 12,5–37,5, пісок 25–50. Таке співвідношення забезпечує конгломерат зерен, структура якого найбільш наближена до монолітної та дозволяє прогнозувати високі значення міцнісних характеристик і морозостійкості після вібропресування виробів.

Подяка

Дослідження здійснювались за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках проекту 2021.01/0316 «Розроблення складів композиційних матеріалів для дорожнього будівництва на основі багатотоннажних відходів».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Складов М.В., Швець В.В., Кашканов А.А. Інноваційні технології у будівництві як ресурс економічного розвитку і фактор модернізації економіки будівництва // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2025. – Т.37. – № 2. – С.163-170.
2. Global prospects, advance technologies and policies of energy-saving and sustainable building systems: a review / Akram M.W., Mohd Zublie M.F., Hasanuzzaman M., Rahim N.A. // Sustainability. – 2022. – Vol.14. – No. 3. – Art. No. 1316.
3. Maciulaitis R., Vaicien M., Zurauskien R. The effect of concrete composition and aggregates properties on performance of concrete // J. Civ. Eng. Manag. – 2009. – Vol.15. – No. 3. – P.317-324.
4. Demissew A. Comparative analysis of selected concrete mix design methods based on cost-effectiveness // Adv. Civ. Eng. – 2022. – No 1. – Art. No. 4240774.
5. Analysis of the granulometric composition of a three-fraction charge for vibropressed products / Shabanova H.M., Logvinkov S.M., Shumeiko V.M., Korohodska A.M., Shchukina L.P., Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Sakhnenko M.D., Lapuzina O.M. // Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii. – 2024. – No. 6. – P.11-17.
6. Optimization of the ratio of adjacent aggregate fractions for slag-alkali binder concrete / Shabanova H.N., Logvinkov S.M., Shumeiko V.N., Korohodska A.N., Sviderskii V.A., Lisachuk G.V., Sakhnenko M.D., Voloshchuk V.V., Kudii D.A. // Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii. – 2024. – No. 6. – P.136-143.

7. Kumar Sh., Barai S.V. Concrete fracture models and applications. – Berlin: Springer-Verlag, 2011. – 262 p.

Надійшла до редакції 14.05.2025

OPTIMIZATION OF THE GRANULOMETRIC COMPOSITION OF INERT AGGREGATES FOR CEMENT-CONTAINING VIBRO-FORMED MIXES

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 paper presents an analysis of the results of the primary optimization of the granulometric composition of granite screenings, used as medium and fine aggregates for cement-containing vibro-pressed mixes. The analysis was carried out by comparing the values of bulk density under load and the compaction coefficient, which characterize the workability of the selected compositions and the ability of particles to arrange themselves within voids to form the most consolidated structure possible. To generalize the obtained results, the simplex-lattice method of mathematical planning was applied. Based on the processing of experimental data followed by a mathematical analysis of regression equations and «composition–property» diagrams, the regularities of changes in bulk density under load and compaction coefficient of three-fraction mixtures depending on their composition were established. The concentration boundary of the rational composition area of the mixtures is limited by the following fraction ratios, wt. %: granite gravel 25–50, granite screenings 12.5–37.5, sand 25–50. This ratio provides a particle conglomerate with a nearly monolithic structure, which makes it possible to predict high strength characteristics and frost resistance after vibro-pressing of products.

Keywords: workability; mathematical modeling; granite gravel; granite screenings; sand; bulk density; compaction coefficient.

REFERENCES

1. Sklyarov MV, Shvets VV, Kashkanov AA. Innovatsiini tekhnologii u budivnytstvi yak resurs ekonomichnoho rozvytku i faktor modernizatsii ekonomiky budivnytstva [Innovative technologies in construction as a resource for economic development and a factor for the modernization of the construction economy]. *Suchasni Tekhnologii, Materialy i Konstruktsii v Budivnytstvi*. 2025; 37(2): 163-170. (in Ukrainian). doi: 10.31649/2311-1429-2024-2-163-170.
2. Akram MW, Mohd Zublie MF, Hasanuzzaman M, Rahim NA. Global prospects, advance technologies and policies of energy-saving and sustainable building systems: a review. *Sustainability*. 2022; 14: 1316. doi: 10.3390/su14031316.
3. Maciulaitis R, Vaicien M, Zurauskien R. The effect of concrete composition and aggregates properties on performance of concrete. *J Civ Eng Manag*. 2009; 15(3): 317-324. doi: 10.3846/1392-3730.2009.15.317-324.

4. Demissew A. Comparative analysis of selected concrete mix design methods based on cost-effectiveness. *Adv Civ Eng*. 2022; 4240774. doi: 10.1155/2022/4240774.

5. 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): 11-17. doi: 10.32434/0321-4095-2024-157-6-11-17.

6. 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.

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