

СУХІ БУДІВЕЛЬНІ СУМІШІ НА ОСНОВІ ФОСФОГІПСУ МОДИФІКОВАНОГО ДЛЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

Шинкевич О.І., аспірант,
oleksiishynkevych@gmail.com, ORCID: 0009-0006-2906-4958
Одеська державна академія будівництва та архітектури
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, Україна

Анотація. Показано актуальність утилізації фосфогіпсу – відходу хімічної промисловості – шляхом переробки їх у сухі будівельні суміші. Утилізація техногенної сировини створює відповідні можливості для таких важливих аспектів як відчутне зниження фінансових інвестицій у виробничу діяльність підприємств завдяки вже реалізованій первинній діяльності підприємств великої потужності. На базі потужних підприємств розвиваються дочірні підприємства з індивідуальними завданнями, що відрізняються від попередніх, які зазвичай відрізняються впровадженням нових, перспективних, «облегшених» технологій. Використання техногенної сировини забезпечує не тільки фінансову економію, а також знижує витрати на будівництво та обслуговування звалищ. Важливим позитивним аспектом є зменшення екологічного навантаження на атмосферу та водний басейн планети. Тому масова утилізація промислових відходів є загальною проблемою сучасного етапу діяльності будівельних компаній. Різноманітність продуктів із техногенного фосфогіпсу є економічно вигідною. Показано доцільність утилізації фосфогіпсу як високоякісного техногенного продукту, що утворюється в процесі виробництва суперфосфатних сільськогосподарських добрив. Двоводний фосфогіпс в процесі термообробки та модифікації переробляється в модифіковані суміші; розробляється певна послідовність технологічних процесів. Проведено опис процесів та обґрунтовано вибір низькоенергетичного технологічного процесу, який забезпечує скорочення енергоспоживання та економію ресурсів. Реалізовано також застосування сухих будівельних сумішей. Показано, що сухі будівельні суміші є наукоємним продуктом високотехнологічних заводських процесів, який дозволяє підвищити якість і темпи ведення дорожніх робіт при зниженні економічної складової цього процесу. Представлено результати експериментальних досліджень щодо застосування фосфогіпсу модифікованого в якості сировини для виготовлення сухих будівельних сумішей для основ дорожнього одягу.

Ключові слова: техногенна сировина, фосфогіпс, сухі будівельні суміші, енергозберігаюча технологія, механічне обладнання для спільного помелу, сушіння та випалу.

Вступ. Сучасна енергетика має гарантувати збереження довкілля, зокрема захист повітряних ресурсів, водних басейнів і контролювати енергозбереження у будівництві. Збереження енергетичних ресурсів є однією з найважливіших проблем енергетичної безпеки в країні. Будівельна галузь України споживає значну кількість енергетичних ресурсів. Будівельний сектор споживає майже 50% природних ресурсів і понад 40% енергії. Енергоспоживання будівельного виробництва в Україні у 2,5-3,5 рази вище, ніж у країнах ЄС. Вдосконалення найсучасніших інноваційних технологій спрямоване на ефективну обробку техногенних відходів, що зменшує енергоспоживання та важку сировину. Розробка та вдосконалення новітніх, ефективних і енергозберігаючих технологій спрямовані на вирішення цієї проблеми, а також на розширення вільних територій від звалищ шляхом раціональної обробки техногенної сировини. Наявність значних обсягів техногенних запасів в Україні дозволяє, враховуючи сучасні матеріали, будинки та технології, вирішувати загальні соціальні, науково-технічні проблеми для отримання екологічно безпечних, економічних і ефективних матеріалів широкого спектра. Наразі у всіх країнах проводиться додаткова обробка матеріалів, які можуть використовуватися як специфічний низькоенергетичний

сировинний матеріал у порівнянні з природною сировиною та сприяють впливу технологічних процесів на якість екологічної екології. Техногенна сировина є дешевшою та менш рідкісною у різних будівельних складах сумішей, матеріалів і продуктів. Водночас кожен тип техногенної сировини відрізняється основними властивостями та сферою застосування відходів, що необхідно враховувати.

Аналіз досліджень та публікацій. Питання практичного використання фосфогіпсу – відходу виробництва фосфорних добрив – для виготовлення будівельних матеріалів нині переросло у загальносвітову проблему, у якій переплітаються інтереси підприємств із виробництва добрив [1], охорони навколишнього середовища [2] та промисловості будівельних матеріалів, зокрема при будівництві автомобільних доріг [3].

Доцільність утилізації фосфогіпсу з його переробкою у будівельні матеріали зумовлена двома основними чинниками:

– необхідністю покращення екологічної ситуації у районах складування відходів, оскільки відбувається забруднення водного й повітряного басейнів, а під відвалами зайняті родючі землі [2];

– необхідністю збереження природних ресурсів гіпсового каменю, оскільки хімічний склад фосфогіпсу близький до природного гіпсу, а обсяги його накопичення співставні із запасами природної сировини [4].

У зв'язку зі збільшенням обсягів цивільного та промислового будівництва та підвищенням вимог до якості оздоблювальних матеріалів широко застосовуються сухі будівельні суміші (СБС) [5].

Застосування таких сумішей зумовлене їх технологічністю та можливістю приготування розчинів безпосередньо на будівельному майданчику [5].

Оскільки в багатьох складах сухих сумішей основним компонентом є напівводний гіпс, переробка фосфогіпсу у гіпсове в'язуче з отриманням СБС є важливим завданням для економіки та екології [1, 4, 6-8]. Щодо отримання сухих сумішей на основі фосфогіпсового в'язучого, то розроблено склади для виготовлення пазогребневих плит, газофосфогіпсобетону, штукатурок, шпаклівок і пресованих виробів .

Термічне перетворення двоводного гіпсу у напівводний здійснюється у зваженому стані. Технологія апробована у напівпромислових умовах ХНУБА та впроваджена корпорацією «Екологія – Дніпро». Для забезпечення стабільності властивостей до складу СБС вводяться модифікуючі добавки [9-12]. Як наповнювач застосовується карбонат кальцію (вапняк), який підвищує тріщиностійкість і пластичність [7]. Гашене вапно $\text{Ca}(\text{OH})_2$ вводиться для зменшення усадкових напружень [8]. Лимонна кислота або Na_2SO_4 застосовуються як сповільнювачі тужавіння [9]. Легкі наповнювачі (перлітовий пісок, трепел) використовуються для полегшення нанесення товстих шарів , але потрібні новітні підходи та нові комплексні підходи . Кварцовий пісок та вапняк застосовуються як заповнювачі для підвищення міцності та зниження вартості матеріалу, але потрібні новітні підходи та нові комплексні підходи та сучасні і низькоенергоємні технології [10-15].

Кварцовий пісок та вапняк застосовуються як заповнювачі для підвищення міцності та зниження вартості матеріалу.

Таким чином, підбір дисперсних наповнювачів і добавок з урахуванням їх мікроструктурної взаємодії дозволяє регулювати технологічні параметри розчинних сумішей.

Метою роботи є оцінка впливу термообробки немодифікованого та модифікованого фосфогіпсу на властивості сухої будівельної суміші для основ дорожніх одягів.

Матеріали та методи досліджень. У якості дрібного заповнювача використовувався пісок кар'єрний Вознесенського (Нікітинського) родовища з модулем крупності 1,25 згідно ДСТУ Б В.2.7-232:2010. Полікарбонатний гіперпластифікатор MelFlux 2651F на основі ефіру полікарбонатових кислот, виробник BASF Construction Solutions (Німеччина), використовувався для СБС у якості водоредукуючої добавки. Мінеральний наповнювач – тонкомелений вапняк, в якості добавки, яка знижує процеси усадки, підвищує тріщиностійкість. Використовувався фракціонований мікроволластоніт (CaSiO_3) MB-05-96, що поставляється «Імпексінвест» м.

Харків; гідрофобізатори композиційні.

Рухливість розчинної суміші визначалася по ДСТУ В.2.7-239:2010. Час життєстійкості суміші – відповідно до ДСТУ В.2.7-185:2009. Щільність суміші визначалася відповідно до ДСТУ Б В.2.7-82:2010. Водостійкість – за стандартною методикою. Визначення міцності на стиск, на розтяг при вигині, водопоглинання визначалось відповідно до ДСТУ Б.В.2.7-82:2010 "Будівельні матеріали. В'яжучі гіпсові. Технічні умови", їх фізико-механічні показники, вимоги до сировини, виробництва та контролю якості.

Результати досліджень. Отримання гіпсового в'яжучого із фосфогіпсу було здійснено на лабораторній установці, змонтованій спільно кафедрами будівельних матеріалів і виробів та кафедрою механізації будівельних процесів ХНУБА. Дана установка дозволяє здійснювати випал дисперсних матеріалів у зваженому стані. Відмінною особливістю цієї технології є відсутність промивання водою і нейтралізації вихідної сировини – фосфогіпсу. Процес отримання гіпсового в'яжучого з техногенних відходів фосфогіпсу за технологією випалу дисперсних матеріалів у зваженому стані (ВДМЗС) має таку послідовність: підготовка для випалу, випал, витримка в камері томління [16-22].

Проведена оцінка і аналіз впливу технологічних особливостей традиційної термообробки фосфогіпсу немодифікованого та модифікованого наповнювача у вигляді кварцового піску. Для приготування сухих сумішей як гіпсового в'яжучого було взято напівводний гіпс марки Г-5, отриманий випалом Дніпродзержинського фосфогіпсу за новою технологією. Температура випалу значною мірою сприяє або зростанню міцності або її зниженню, що пов'язано з утворенням у результаті дегідратації сировини кількості напівводного гіпсу й ангідриту, і впливає на міцність одержуваного матеріалу. При цьому подальше нагрівання матеріалу призведе до зневоднення напівводного гіпсу з його перетворенням у розчинний ангідрит і до погіршення його якості, обраний інтервал температур знаходиться в межах від 175 до 400 С. В результаті досліджень було виявлено, що температура випалу впливає на якість одержуваного продукту. Далі експеримент полягає в оцінці температури випалу даного фосфогіпсу, за який він дегідратується в гіпсове в'яжуче з максимальними показниками міцності. Графіки диспергування фосфогіпсу та фосфогіпсу модифікованого кварцовим піском наведені на рис. 1.

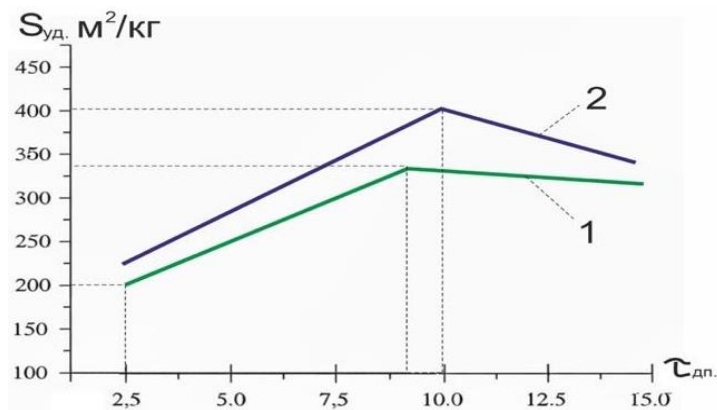


Рис. 1. Вплив тривалості диспергування суміші на величину питомої поверхні фосфогіпсу: 1 – немодифікованого; 2 – модифікованого кварцевим піском

На основі аналізу отриманих даних зроблено такі висновки. По-перше, проведено аналіз підвищення активності матеріалу. Встановлено, що введення наповнювача у вигляді кварцового піску до складу фосфогіпсу (крива 2) забезпечує більш інтенсивне зростання питомої поверхні порівняно з немодифікованим фосфогіпсом (крива 1). Це пояснюється тим, що тверді частинки кварцу виконують роль абразивного компонента, який інтенсифікує подрібнення м'якої гіпсової фази та сприяє утворенню більшої кількості активних поверхонь.

Підвищення активності матеріалу. Введення наповнювача підвищує питому поверхню фосфогіпсу модифікованого із $S = 220$ до $S_{уд.} = 400$ м²/кг протягом 10 хв., а фосфогіпс немодифікований – до $S_{уд.} = 330$ м²/кг протягом 9,0 хв. Далі, величина $S_{уд.}$ починає

зменшуватись до величини $S_{уд}$ 280-300 м²/кг.

Далі присутній ефект агрегації частинок. Подальше збільшення тривалості механічної обробки понад 2-3 хв. призводить далі до зменшення питомої поверхні. Це явище пов'язане з агрегацією надтонких частинок під дією міжмолекулярних та електростатичних сил, унаслідок чого утворюються вторинні агломерати. Таким чином, подальший помел є енергетично та технологічно недоцільним.

Визначення оптимального часу диспергування для обох складів досягаються при тривалості диспергування 10 хвилин, що свідчить про досягнення оптимального ступеня подрібнення. Даний часовий інтервал є технологічно доцільним для отримання найбільш тонкодисперсного та реакційно здатного матеріалу при мінімальних енерговитратах.

Екологічний та ресурсозберігаючий ефект також має значення. Отримана модифікована фосфогіпс-кварцова суміш забезпечує можливість безпечної утилізації промислових відходів фосфогіпсу, переводячи його з екологічно небезпечного стану у стабільний композиційний матеріал. В процесі механічної активації відбувається іммобілізація шкідливих домішок у структурі матеріалу, що знижує їхню міграційну здатність та негативний вплив на довкілля. Модифікований фосфогіпс характеризується підвищеною реакційною здатністю та може бути рекомендований як сировина для виробництва композиційних гіпсових в'язучих, сухих будівельних сумішей та елементів дорожніх основ.

На рис. 2 представлено залежності міцності на стиск (f_{cm}) та міцності на розтяг при вигині (f_{ctfm}) від температури випалу і питомої поверхні матеріалу та впливу мінеральних домішок.

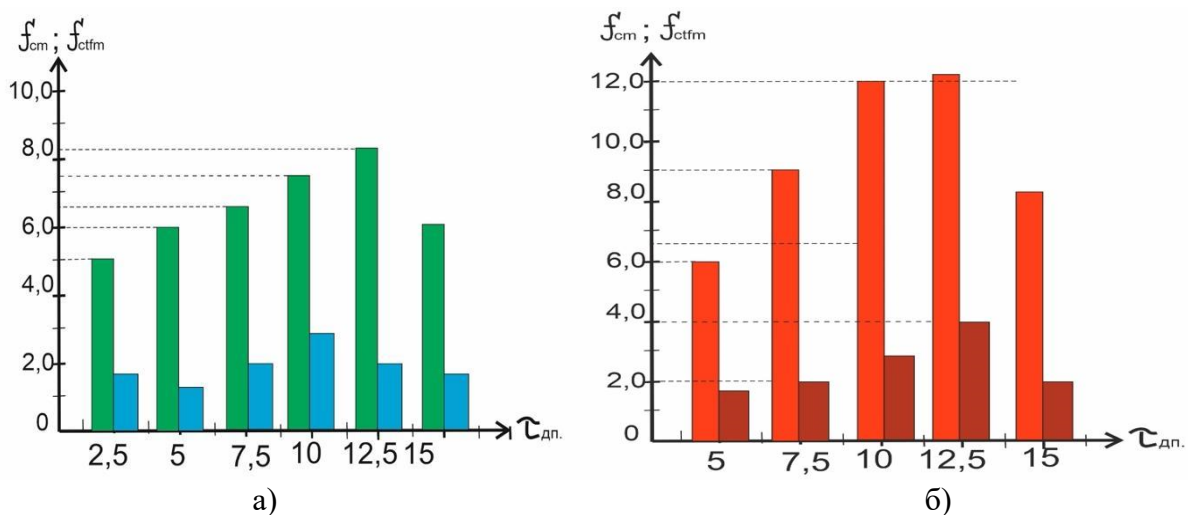


Рис. 2. Вплив тривалості диспергування фосфогіпсу (ФГ) та фосфогіпсу модифікованого кварцовим піском (ФГ+Мод) на показники міцності:

а – f_{cm} ФГ – ■; f_{ctfm} ФГ – ■;
 б – f_{cm} ФГ+Мод – ■; f_{ctfm} ФГ+Мод – ■.

Аналіз результатів показує, що міцність фосфогіпсу неактивованого f_{cm} та f_{ctfm} оптимально збільшується до 8,0 МПа протягом 12,5 хв, а міцність фосфогіпсу модифікованого – до 12,2 МПа, тобто міцність вище в 1,5 - 1,6 разів.

У ході проведеного дослідження встановлено, що спільне диспергування (механічна активація) фосфогіпсу з кварцовим піском є ефективним методом фізико-механічної та частково механохімічної модифікації фосфогіпсової сировини.

Властивості одержаних сухих сумішей представлені в табл. 1. На початковому етапі проведено дослідження щодо впливу параметрів температури на показники якості, отриманих у процесі термообробки сухих будівельних сумішей. При цьому актуальним завданням є тривалість та оптимальна температура термообробки.

Таблиця 1 – Сухі будівельні суміші на гіпсовому в'язучому з немодифікованого фосфогіпсу (1) і модифікованого фосфогіпсу (2)

№ п.п	Найменування сухої будівельної суміші	Відкритий час роботи, с		Границя міцності на стиск, МПа		Границя міцності на розтяг при згині, МПа		Усадка, мм/м		Міцність зчеплення з основою, МПа	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	Суміш для основ дорожнього одягу	85	80	6,1	12,7	2,5	3,1	0,2	0,1	0,6	0,78

Додаткові варіанти модифікації фосфогіпсу для будівельної промисловості за напрямами функціоналізації можуть бути такі:

- мінералогічна та фазова модифікація у вигляді карбонізації (CO₂-активація) з утворенням стабільних карбонатних фаз і зниженням розчинності;
- хімічна стабілізація та нейтралізація домішок. Сульфоальюмінатна активація для створення швидкотверднучих композицій з низькою усадкою;
- композиційне армування: мікроармування волокном для підвищення тріщиностійкості; введення нанодобавок (SiO₂, Al₂O₃) для ущільнення структури та росту міцності;
- функціональні будівельні матеріали: розробка фосфогіпсових дорожніх основ і стабілізованих ґрунтів (з цементом або вапном).

Аналіз даних, наведених у таблиці 1 показує, що властивості сухих сумішей задовольняють сучасним вимогам. Економічні переваги при виробництві таких сумішей полягають у тому, що гіпсове в'язуче отримано з техногенних відходів фосфогіпсу. На наступному етапі дослідження проведено аналіз і дано оцінку впливу комплексної активації компонентів сухої будівельної суміші: полікомпонентного гіперпластифікатора White, який варіювався в інтервалі від 1 до 3 (% м.в.); полікарбонатної гіперпластифікуючої добавки Melflux-2651F, вміст якої варіювався в межах від 1 до 11 (% від м.в.); наповнювач у вигляді кварцового піску із заданою питомою поверхнею – S(1) = 200 см²/г, S(2) = 300 см²/г, S(3) = 400 см²/г (при різній температурі від 170 до 400 °С) за технологією ВДМЗС. Отримані експериментальні результати обґрунтовані методом експериментально-статистичного моделювання [12, 13, 20]. Результати аналізу ЕС-моделей продемонстрували залежність міцності на стиск та розтягу при згині від питомої поверхні матеріалу та органо-мінеральних композицій. Виходячи із діаграм на рис. 3 слід зазначити, що для досягнення максимальних значень міцності необхідно, щоб фосфогіпс модифікований мав питому поверхню в межах 400 см²/г ± 5 см²/г.

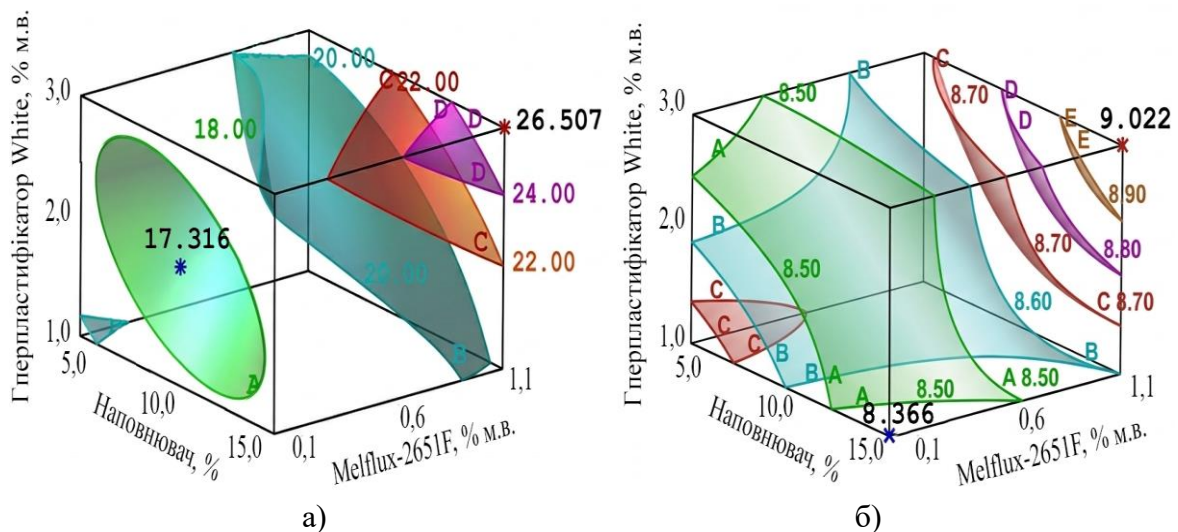


Рис. 3. Міцність на стиск комплексно модифікованої фосфогіпсової сухої будівельної суміші на тонкомеленому піску та органо-мінеральному комплексі:

а – максимальні показники якості; б – мінімальні показники якості при S_{уд}(3)

Результати математичного моделювання комплексно активованих процесів і явищ зведені в таблицю 2.

Таблиця 2 – Спільний вплив комплексних наповнювачів і органо-мінеральних добавок різного призначення на властивості СБС

Назва властивостей СБС	Дисперсність наповнювача у вигляді кварцового піску					
	$S_{уд} = 200 \text{ см}^2/\Gamma$		$S_{уд} = 300 \text{ см}^2/\Gamma$		$S_{уд} = 400 \text{ см}^2/\Gamma$	
Міцність на стиск	Max	Min	Max	Min	Max	Min
		10,2	4,6	15,1	8,3	26,5
Міцність на розтяг при згині	6,8	2,5	8,1	6,7	9,0	8,4

В результаті подальших досліджень встановлено, що розроблені склади будівельної суміші на основі гіпсового в'язучого з комплексом наповнювачів та органо-мінеральних композицій отримані з поліпшеними показниками якості до 3,6 разів. Утворення з'єднань кальциту (CaCO_3) і магнезиту (MgCO_3) в кількості 5%, в фосфогіпсі після випалу має бути позитивним фактором, що впливає на можливість отримання гіпсового в'язучого із фосфогіпсу Г-10 та більше, також позитивно впливає на інші властивості.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Фосфогіпс доцільно розглядати не як відхід, а як багатофункціональну сировину, властивості якої цілеспрямовано налаштовуються під конкретні будівельні задачі – від доріг до промислових будівель і інфраструктури. Застосування комплексного системного підходу для оптимізації рецептур під конкретні експлуатаційні умови підвищує якість матеріалів з фосфогіпсу.

Модифікований фосфогіпс характеризується підвищеною реакційною здатністю та може бути рекомендований як сировина для виробництва композиційних гіпсових в'язучих, сухих будівельних сумішей, стінових матеріалів та елементів дорожнього одягу, наприклад, основ для покриття доріг.

Література

1. Singh M. Phosphogypsum: Potential Applications and Environmental Issues. *Waste Management Journal*. 2018. 24 p.
2. Tayibi H., Choura M., López F. Environmental Impact and Management of Phosphogypsum. *Journal of Environmental Management*. 2009. 18 p.
3. Shen W., Zhou M., Ma W. Use of Phosphogypsum in Road Construction. *Construction and Building Materials*. 2007. 15 p.
4. Круць Т.В. Використання техногенного гіпсу в будівництві. Київ: Будівельник, 2015. 186 с.
5. Пługін А.А. Сухі будівельні суміші на гіпсовій основі. Харків: ХНУБА, 2012. 210с.
6. Глуховський В.Д., Пługін А.А. Технологія переробки фосфогіпсу у в'язучі матеріали. *Вісник ХНУБА*. 2016. 14 с.
7. Neville A.M. Properties of Concrete. Pearson Education. 2011. 872 p.
8. ДСТУ Б В.2.7-126:2011. Суміші будівельні сухі модифіковані. Загальні технічні умови. Київ. Мінрегіонбуд України. 2010. 59 с.
9. Lea F.M. The Chemistry of Cement and Concrete. 4th ed. 2004. 1092 p.
10. Dvorkin L., Lushnikova N., & Sonebi M. Application areas of phosphogypsum in production of mineral binders and composites based on them: a review of research results. *MATEC Web of Conferences*, vol. 149, 01012, 2018. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201814901012>.
11. Дворкін Л.Й., Гавриш О.М., Безусяк О.В., Мироненко А.В., Поліщук-Герасимчук Т.О., Ковалик І.В. Ефективні гіпсові матеріали. За редакцією д.т.н., професора Л.Й. Дворкіна. К: "СПД Павленко", 2013. 240 с.
12. Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Марчук В.В., Степасюк Ю.О., Скрипник М.М. Ефективні технології бетонів із застосуванням техногенної сировини: монографія. Рівне : НУВГП, 2017. 424 с.

13. Онищенко А.М., Лантух-Лященко А.І., Мішутін А.В., Снитко В.П., Твардовський І.О., Здольник М.В., Вердіян В.С. Теоретичні та практичні методи оцінювання надійності і довговічності транспортних споруд: монографія. Київ: Видавництво Людмила, 2024. 164 с.
14. Дворкін Л.Й. Добавки для бетонів і розчинів : навчальний посібник. К: Видавництво «Каравела», 2025. 204 с.
15. Рунова Р. Ф., Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Носовський Ю. Л. В'язучі речовини: Підручник. К.: Основа, 2012. 448 с.
16. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво [Чинний від 01.04.2016]. Вид. офіц. Київ, 2015. 113 с.
17. Sopov V.P., Vinnichenko V.I., Krot A.Yu., Vitsenko, N.Yu. The effect of the addition of calcium sulfate di-hydrate on the properties of lime-silica binder, *Weimarer Gipstagung*. 2020. p. 633–639.
18. Kostyuk T., Vinnichenko V., Plugin A. Physicochemical studies of the structure of energy-saving compositions based on slags. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 1021:012016, 2021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012016>.
19. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Активация цементных систем как этап получения качественного бетона. URL: <http://m350.ru/articles/more/v/id/93/> (дата звернення: 09.12.2025).
20. V. Vinnichenko, I. Shul'ga, P. Saffiot. Ecological feasibility of pyrolysis in comparison with the incineration of municipal solid waste. *AIP Conference Proceedings*. 2490. 050006. 2023. <https://doi.org/10.1063/5.0151894>
21. V. Vinnichenko, A. Riazanov. Environmental Problems of Phosphogypsum Utilization. *Key Engineering Materials*. 864. pp. 108-114. 2020. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.864.108>

References

- [1] M. Singh, "Phosphogypsum: Potential Applications and Environmental Issues", *Waste Management Journal*. 2018.
- [2] H. Tayibi, M. Choura, F. López, "Environmental Impact and Management of Phosphogypsum", *Journal of Environmental Management*. 2009.
- [3] W. Shen, M. Zhou, W. Ma, "Use of Phosphogypsum in Road Construction", *Construction and Building Materials*. 2007.
- [4] T.V. Kruts, *Vykorystannia tekhnohennoho hipsu v budivnytstvi*. Kyiv: Budivelnik, 2015.
- [5] A.A. Plugin, *Sukhi budivelni sumishi na hipsovii osnovi*. Kharkiv: KHNUBA, 2012.
- [6] V.D. Glukhovskiy, A.A. Plugin, "Tekhnolohiia pererobky fosfohipsu u viazhuchi materialy", *Visnyk KhNUBA*. 2016.
- [7] A.M. Neville, *Properties of Concrete*. Pearson Education. 2011.
- [8] DSTU B V.2.7-126:2011. Sumishi budivelni sukhi modyfikovani. Zahalni tekhnichni umovy. Kyiv. Minrehionbud Ukrainy. 2010.
- [9] F.M. Lea, *The Chemistry of Cement and Concrete*. 4th ed. 2004.
- [10] L. Dvorkin, N. Lushnikova, & M. Sonebi, "Application areas of phosphogypsum in production of mineral binders and composites based on them: a review of research results", *MATEC Web of Conferences*, vol. 149, 01012, 2018. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814901012>.
- [11] L.Y. Dvorkin, O.M. Havrysh, O.V. Bezusiak, A.V. Myronenko, T.O. Polishchuk-Herasymchuk, I.V. Kovalyk, *Efektivni hipsovi materialy*. Za redaktsiieiu d.t.n., profesora L.Y. Dvorkina. K: "SPD Pavlenko", 2013.
- [12] L.Y. Dvorkin, V.V. Zhytkovskiy, V.V. Marchuk, Yu.O. Stepasiuk, M.M. Skrypnyk, *Efektivni tekhnolohii betoniv iz zastosuvanniam tekhnohennoi syrovyny: monohrafiia*. Rivne : NUVHP, 2017.
- [13] A.M. Onyshchenko, A.I. Lantukh-Liashchenko, A.V. Mishutin, V.P. Snytko, I.O. Tvardovskiy, M.V. Zdolnyk, V.S. Verdiian, *Teoretychni ta praktychni metody otsiniuvannia nadiinosti i dohovichnosti transportnykh sporud: monohrafiia*. Kyiv: Vydavnytstvo Liudmyla, 2024.
- [14] L.Y. Dvorkin, *Dobavky dlia betoniv i rozchyniv : navchalnyi posibnyk*. K: Vydavnytstvo "Karavela", 2025.
- [15] R.F. Runova, L.Y. Dvorkin, O.L. Dvorkin, Yu.L. Nosovskiy, *V'iazhuchi rehovyny: Pidruchnyk*. K.: Osнова, 2012.

- [16] DBN V.2.3-4:2015. Avtomobilni dorohy. Chastyna I. Proektuvannia. Chastyna II. Budivnytstvo. Vyd. ofits. Kyiv, 2015.
- [17] V.P. Sopov, V.I. Vinnichenko, A.Yu. Krot, N.Yu. Vitsen-ko, "The effect of the addition of calcium sulfate di-hydrate on the properties of lime-silica binder", *Weimarer Gipstagung*, pp. 633–639, 2020.
- [18] T. Kostyuk, V. Vinnichenko, A. Plugin, "Physicochemical studies of the structure of energy-sav-ing compositions based on slags", *IOP Confer-ence Series Materials Science and Engineering*, 1021:012016, 2021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012016>.
- [19] L.Y. Dvorkyn, O.L. Dvorkyn, Aktyvatsiia tsementnykh system kak etap polucheniya kachestvennoho betona. [Online]. Available: <http://m350.ru/articles/more/v/id/93/> Accessed on: December 09, 2025.
- [20] V. Vinnichenko, I. Shul'ga, P. Saffiot, "Ecological feasibility of pyrolysis in comparison with the incineration of municipal solid waste", *AIP Conference Proceedings*, 2490, 050006, 2023. <https://doi.org/10.1063/5.0151894>
- [21] V. Vinnichenko, A. Riazanov, "Environmental Problems of Phosphogypsum Utilization", *Key Engineering Materials*, 864, pp. 108-114, 2020. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.864.108>.

DRY CONSTRUCTION MIXTURES BASED ON PHOSPHOGYPSUM MODIFIED FOR MOTOR ROADS

Shinkevich O.I., postgraduate student,
oleksiishynkevych@gmail.com, ORCID: 0009-0006-2906-4958
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture
4, Didrichsona str., Odesa, 65029, Ukraine

Abstract. The relevance of the disposal of phosphogypsum – an output of the chemical industry – through the route of their processing in dry wastewater is shown. The disposal of technogenic waste creates a unique opportunity for such important aspects as a significant reduction in financial investments in the industrial activity of enterprises. Implementation of the primary activities of enterprises is of great importance. On the basis of existing enterprises, subsidiaries with individual tasks are being developed, which are evolving from the previous ones, which means they are seeing the development of new, promising, "lighter" ones technology. The use of man-made waste will provide not only financial savings, but also reduces costs for housekeeping and housekeeping. An important positive aspect is the change in environmental impact on the atmosphere and water basin of the planet. Therefore, the massive recycling of industrial waste is a key problem at the current stage of activity of industrial companies. The variety of products made from technogenic phosphogypsum is economically viable. The effectiveness of utilization of phosphogypsum as a high-acidity man-made product that is created in the process of production of superphosphate minerals has been shown. During the process of heat treatment and modification, dihydrous phosphogypsum is processed in a modified mixture; the sequence of technological processes is broken down. A description of the processes has been carried out and a low-energy technological process has been selected, which will ensure faster energy consumption and resource savings. The stagnation of dry waste products has also been implemented. It is shown that of dry building mixtures is a scientific product of high-tech factory processes, which allows increasing the intensity and speed of road work while reducing the economical warehouse process. The results of experimental research on the curing of modified phosphogypsum in milk berry for the preparation of dry wake-up bags for the basics of road clothing are presented.

Keywords: technogenic waste, phosphogypsum, dry waste mixtures, energy-saving technology, mechanical equipment for sleeping broom, drying and drying.

Стаття надійшла до редакції 12.01.2026

Стаття прийнята до друку 8.02.2026

Дата публікації статті 20.03.2026

[This work](#) © 2026 by [Шинкевич О.І.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)