

УДК 691.327.32

*Дворкін Л.Й., доктор техн. наук, професор,
Житковський В.В., канд. техн. наук, доцент,
Національний університет водного господарства та
природокористування, м. Рівне, Україна*

ВІБРОПРЕСОВАНИЙ ГІПСОБЕТОН НА КЕРАМЗИТОВОМУ ЗАПОВНЮВАЧІ

Значного розширення можливостей застосування гіпсових в'язучих матеріалів можна досягнути шляхом зниження водовмісту сумішей і водогіпсового відношення до значень, близьких до теоретично необхідних. З цією метою поряд з застосуванням добавок-гіперпластифікаторів ефективним є також силове ущільнення гіпсових сумішей, що дозволяє не лише знизити водовміст, але й забезпечує компактне розташування частинок, що, в свою чергу теж сприяє підвищенню міцності. Силове ущільнення гіпсових сумішей дає можливість різко підвищити вміст заповнювача, за рахунок чого суттєво знизити вартість, а також отримати додатковий технічний ефект (наприклад зниження густини і теплопровідності при застосуванні легких матеріалів).

Серед силових способів ущільнення бетонних сумішей з низьким водовмістом найбільш ефективним є вібропресування, яке при низькій необхідній вологості сировини забезпечує високу щільність дрібноштучних виробів та високу продуктивність.

Наші дослідження, проведені раніше [1], показали, що виготовлення гіпсобетону способом вібропресування наджорстких сумішей дає можливість знизити В/Г до 0,35...0,4 при використанні щільного заповнювача (піску середньої крупності) і отримати міцність 12...16 МПа у сухому стані при використанні будівельного гіпсу марки Г-5. При вібропресуванні суттєво зменшується вплив активності в'язучого на міцність гіпсобетону, що особливо помітно при використанні низькоактивних в'язучих. Міцність низькоактивних гіпсових в'язучих визначається переважно їх підвищеною пористістю, що є наслідком високої водопотреби при стандартних випробуваннях. Вібропресування потребує застосування наджорсткої суміші з вологістю 5...6% [2], що обумовлює суттєве зниження пористості вібропресованого гіпсового каменю.

Щільна гіпсова матриця, отримана вібропресуванням добре сприймає заповнювачі різного виду, тому ефективним є застосування такого способу ущільнення для виготовлення легкого гіпсобетону.

На кафедрі технології будівельних виробів і матеріалознавства Національного університету водного господарства і природокористування була проведена серія досліджень для визначення оптимальних параметрів виготовлення гіпсового керамзитобетону способом вібропресування наджорстких сумішей. Експеримент проводився з використанням методів математичного планування з отриманням адекватних рівнянь регресії вихідних параметрів [3]. На першому етапі досліджень було визначено вплив кількості та властивостей, а також параметрів ущільнення гіпсового керамзитобетону. Другий етап був присвячений підвищенню водостійкості отриманого гіпсобетону.

При виготовленні бетону способом вібропресування значно підвищується роль заповнювача, ще у більшій мірі на властивостях матеріалу позначаються характеристики і вміст легких зерен. Тому у проведених дослідженнях основна увага приділялась зерновому складу керамзиту, його вмісту та інтенсивності ущільнення. Вивчення впливу даних факторів проводилось з використанням математичного планування експерименту шляхом реалізації плану Бокса-Бенкена для чотирьох факторів [3]. Умови планування наведені в табл.1.

В експериментах використовувались наступні матеріали: будівельний гіпс марки Г-5 (ВАТ «Іванофранківськ-цемент»), керамзитовий пісок (П) ($\rho_{\text{н}}=700 \text{ кг/м}^3$), керамзит дрібний ($K_{\text{д}}$) фракції

1...5 мм ($\rho_n=500$ кг/м³), керамзит крупний (K_k) фракції 5...10 мм ($\rho_n=450$ кг/м³) Вінницького заводу "Керамзит". Параметри ущільнення: частота – 50 Гц, амплітуда – 0,5 мм, тривалість ущільнення – 15 с. При проведенні експерименту для забезпечення необхідної «живучості» гіпсобетонної суміші був використаний сповільнювач (лимонна кислота) в кількості 0,05% від маси гіпсу.

Таблиця 1

Умови планування експерименту

№ п/п	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	Натуральний вигляд	Кодов. вид	-1	0	+1	
1	Масова частка керамзитового піску (П) у суміші піску і гравію (К), $r_n = П/(П+К)$	X_1	0,1	0,25	0,4	0,15
2	Масова частка дрібного керамзиту, $K_d/(K_d+K_k)$	X_2	0	0,5	1	0,5
3	Співвідношення маси заповнювача і в'язучого, З/Г	X_3	1	2	3	1
4	Величина привантаження (динамічного тиску), Р, МПа	X_4	0,01	0,06	0,11	0,05

В якості вихідних параметрів експерименту вибрані наступні:

- водогіпсове відношення (В/Г), – показник, що характеризує водопотребу бетону.
- середня густина бетону (ρ_0 , кг/м³),
- міцність гіпсобетону при стиску в висушеному стані (R_{cm} , МПа).

В результаті обробки експериментальних даних були отримані рівняння регресії для міцності на стиск (R_{cm}), середньої густини (ρ_0) і водо гіпсового відношення вібропресованого керамзитобетону:

$$R_{cm} = 8,07 + 2,68X_1 + 2,64X_2 - 4,74X_3 + 2,98X_4 + 0,32X_1^2 - 0,52X_2^2 - 0,62X_3^2 + 0,86X_4^2 - 0,95X_1X_2 - 1,03X_1X_3 + 0,55X_1X_4 - 2,35X_2X_3 + 1,92X_2X_4 - 0,48X_3X_4 \quad (1)$$

$$\rho_0 = 1050 + 147X_1 + 151X_2 - 303X_3 + 111X_4 + 5X_1^2 + 9X_2^2 - 54X_3^2 + 39X_4^2 - 79X_1X_2 - 36X_1X_3 - 1X_1X_4 + 1X_2X_3 - 46X_2X_4 + 52X_3X_4 \quad (2)$$

$$\frac{В}{Г} = 0,38 - 0,03X_1 - 0,02X_2 + 0,16X_3 - 0,15X_4 + 0,01X_1X_2 - 0,05X_1X_3 + 0,04X_1X_4 - 0,04X_2X_3 + 0,02X_2X_4 - 0,04X_3X_4 \quad (3)$$

Як видно з аналізу рівняння (3), водопотреба вібропресованого гіпсобетону з використанням керамзитового заповнювача коливається досить широко (В/Г від 0,2 до 0,65), що пояснюється різними причинами. Максимальний вплив викликає фактор X_3 (З/Г) – він здійснює практично лінійний вплив на В/Г. Збільшення вмісту пористого заповнювача, викликає необхідність підвищення водовмісту для забезпечення необхідної консистенції.

Підвищення інтенсивності ущільнення в результаті збільшення величини привантаження сприяє зниженню водопотреби. Менше абсолютне значення цього фактора порівняно з X_3 свідчить про те, що вплив пористого заповнювача на водопотребу бетону за рахунок збільшення динамічного тиску при вібропресуванні нейтралізувати не вдається.

Характерним є значний ефект взаємодії факторів X_1 та X_3 . Це пояснюється нівелюванням впливу зернового складу керамзитового заповнювача на водопотребу при збільшенні вмісту в'язучого.

Значення середньої густини вібропресованого керамзитобетону знаходяться в межах 600...1450 кг/м³ (рис. 1). Найбільш помітно на густину впливає фактор X_3 (З/Г) – збільшення частки керамзиту в масі гіпсобетону, яке дозволяє суттєво знизити його густину.

Фактори X_1 , X_2 і X_4 , а також ефекти їх взаємодії впливають позитивно: підвищення вмісту керамзитового піску та гравію дрібної фракції сприяють підвищенню ущільнюваності бетонної суміші, цьому також додатково допомагає підвищення величини привантаження.

Характер моделі міцності вібропресованого гіпсобетону подібний до моделі середньої густини (рис. 1). Як видно з отриманих даних, міцність вібропресованого гіпсобетону коливається досить широко (від 2,3 до 16 МПа). Підвищення міцності викликає зміна значень факторів X_1 , X_2 і X_4 (вміст керамзитового піску, частка дрібної фракції гравію та величина привантаження. При підвищенні кількості заповнювача (фактор X_3 (З/Г)) – міцність, природно, знижується.

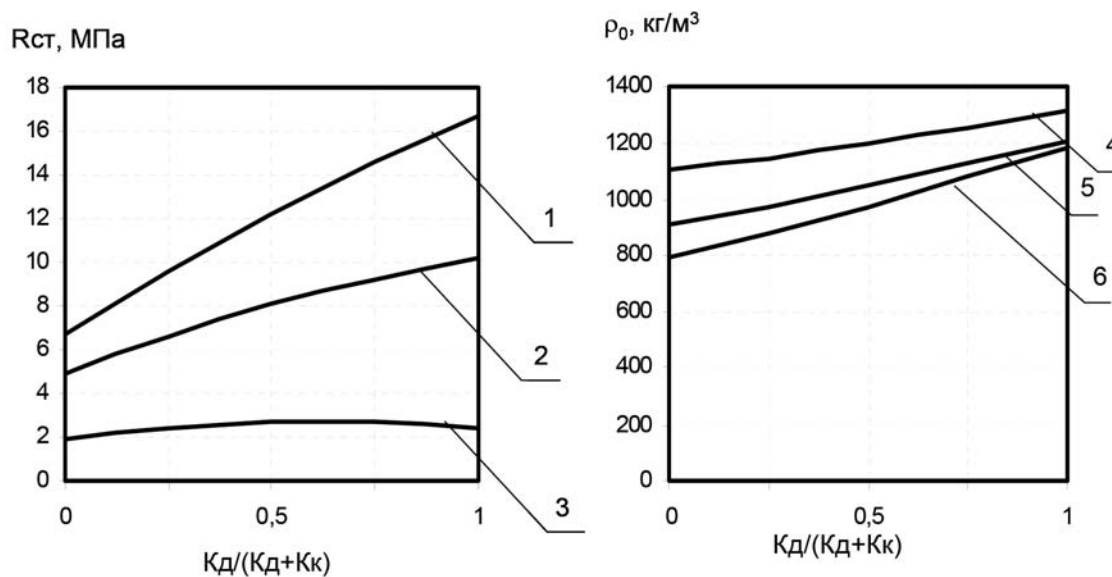


Рисунок 1. Залежність міцності ($R_{ст}$, МПа) та середньої густини (ρ_0 , кг/м³) вібропресованого гіпсобетону від факторів, що досліджувались.
1 - З/Г=1; 2 - З/Г=2; 3 - З/Г=3; 4 - P=0,11МПа; 5 - P=0,06МПа; 6 - P=0,01МПа

Слід відмітити, що при збільшенні кількості керамзитового піску в бетонній суміші спостерігається зростання міцності на 20...25%, що пояснюється більш щільною структурою каркаса заповнювача.

Таким чином, при оптимальному співвідношенні фракцій керамзитового гравію і піску вібропресуванням було отримано гіпсобетон на керамзитовому заповнювачі з міцністю при стиску 9...11 МПа, середньою густиною 900...1100 кг/м³. Водопотреба бетонної суміші при оптимальному привантаженні 0,06...0,08 МПа знаходилась в межах 0,34...0,38.

Найбільш ефективним способом підвищення водостійкості гіпсових матеріалів є використання композицій, що вміщують гіпс, портландцемент і активну мінеральну добавку.

Як відомо [4], необхідність мінеральної добавки у гіпсоцементній композиції викликана можливістю утворення етрингіту, що призводить до розширення в'язучої матриці і її руйнування. При застосуванні керамзиту як заповнювача необхідна кількість активної мінеральної добавки може знижуватись, внаслідок активності поверхні керамзитового заповнювача (гравію і піску). В експериментах в якості активної мінеральної добавки було використано керамзитовий пил з електрофільтрів керамзитовипалювальних печей. Такий пил характеризується високою

дисперсністю (3500...4000 см²/г) і містить у своєму складі до 15% невипаленої глини, що може негативно впливати на водопотребу гіпсобетонної суміші.

Ще одним зі шляхів підвищення водостійкості гіпсових матеріалів є використання у складі бетонної суміші добавок-гідрофобізаторів. Такі добавки, адсорбуючись на поверхні пор бетону знижують проникнення води та її дію на кристали сульфату кальцію. Крім того, гідрофобізатори на основі силіконів (метилгідридсилоксанові полімери ГКЖ-94 чи подібні) здатні взаємодіяти з гідроксидом кальцію і тим самим знижувати ймовірність утворення еtringіту в композиціях гіпсу з портландцементом. В якості гідрофобізатора в наших дослідях було використано добавку на силіконовій основі FugeC фірми CHRYSO (Франція), яка показала свою ефективність у цементних бетонах [5].

Дослідження оптимальних параметрів отримання водостійкого вібропресованого гіпсобетону проводилось з використанням математичного плану «суміш-технологія-властивості» [6], котрий дозволив одночасно вивчати вплив складу композиційного гіпсоцементного в'язучого і технологічних факторів.

В якості факторів суміші були взяті наступні:

- v_1 – вміст гіпсу (55%...75%);
- v_2 – вміст керамзитового пилю (10%...30%);
- v_3 – вміст портландцементу (15%...35%).

Технологічними факторами були прийняті водов'язуче відношення (В/В) та вміст добавки FugeC:

- x_1 – водов'язуче відношення (В/В=0,4 ...0,6);
- x_2 – вміст добавки (D) (0...1% від кількості в'язучого).

Під час проведення експерименту визначались наступні параметри: середня густина бетону (ρ_0 , кг/м³), міцність при стиску у віці 7 і 28 діб вологого твердіння (R_{cr}^7 , R_{cr}^{28} , МПа) та коефіцієнт водостійкості (розм'якшення) (K_p). В результаті статистичного аналізу даних отримані адекватні рівняння регресії вихідних параметрів, які можна розглядати як їх математичні модулі:

$$\rho_0 = 1413,85v_1 + 1199,08v_2 + 1300,5v_3 - 547,16v_1v_2 - 571,34v_1v_3 + 217,91v_2v_3 + 136,03v_1x_1 + 15,95v_1x_2 + 33,84v_2x_1 + 49,58v_2x_2 + 36,24v_3x_1 - 12,49v_3x_2 - 30,14x_1x_2 - 94,98x_{12} + 13,78x_{22} \quad (4)$$

$$R_{cr}^7 = 5,802v_1 + 3,763v_2 + 4,1522v_3 - 7,271v_1v_2 - 5,559v_1v_3 + 9,087v_2v_3 + 1,5898v_1x_1 + 0,503v_1x_2 + 0,1772v_2x_1 + 0,4765v_2x_2 - 0,3298v_3x_1 + 0,422v_3x_2 - 0,3797x_1x_2 - 1,6223x_{12} - 0,202x_{22} \quad (5)$$

$$R_{cr}^{28} = 5,415v_1 + 6,03v_2 + 10,531v_3 + 7,38v_1v_2 - 17,732v_1v_3 - 7,503v_2v_3 + 1,147v_1x_1 + 1,104v_1x_2 - 0,57v_2x_1 + 0,788v_2x_2 - 0,275v_3x_1 - 1,374v_3x_2 - 0,858x_1x_2 - 1,118x_{12} + 0,7825x_{22} \quad (6)$$

$$K_p = 0,6816v_1 + 0,7823v_2 + 0,7201v_3 - 0,8972v_1v_2 + 0,4293v_1v_3 - 0,6132v_2v_3 + 0,161v_1x_1 + 0,0714v_1x_2 - 0,036v_2x_1 + 0,0392v_2x_2 - 0,0574v_3x_1 + 0,0388v_3x_2 - 0,018x_1x_2 + 0,126x_{12} - 0,233x_{22} \quad (7)$$

Середня густина отриманого гіпсобетону знаходилась в межах 1000... 1300 кг/м³ і визначалась, в основному, прийнятою концентрацією керамзитового заповнювача у суміші. Як і слід було очікувати, співвідношення між компонентами в'язучого на середню густина практично не впливає. Збільшення вмісту добавки сприяє незначному підвищенню середньої густини (10...30 кг/м³) в результаті деякої пластифікації суміші. Максимальну зміну ρ_0 викликає збільшення В/В. Характер даної залежності екстремальний і вказує на оптимальне значення водовмісту суміші, що забезпечує максимальне ущільнення при мінімальній пористості в'язучої матриці. При водовмісті, що відповідає В/В=0,45...0,48 досягається найкраще ущільнення при заданих параметрах

вібропресування та характеристиках сировини.

Як видно з аналізу рівнянь (5) і (6), швидкий набір міцності у ранньому віці відбувається за рахунок гідrataції гіпсу і з наступним твердінням за рахунок новоутворень, які виникають при гідrataції цементу та мінеральної добавки. Максимальна міцність на стиск у віці 7 діб складає 7...7,5 МПа. Добавка FugeC суттєво характер залежності не змінює, звертає на себе відсутність негативного впливу гідрофобізатора на міцність (спостерігається підвищення міцності в межах 1...2 МПа, внаслідок відміченого вище пластифікуючого ефекту). Вплив показника В/В на міцність у 7 діб подібний до впливу на середню густину. Оптимальні значення водовмісту з позиції максимальних значень міцності і щільності практично збігаються.

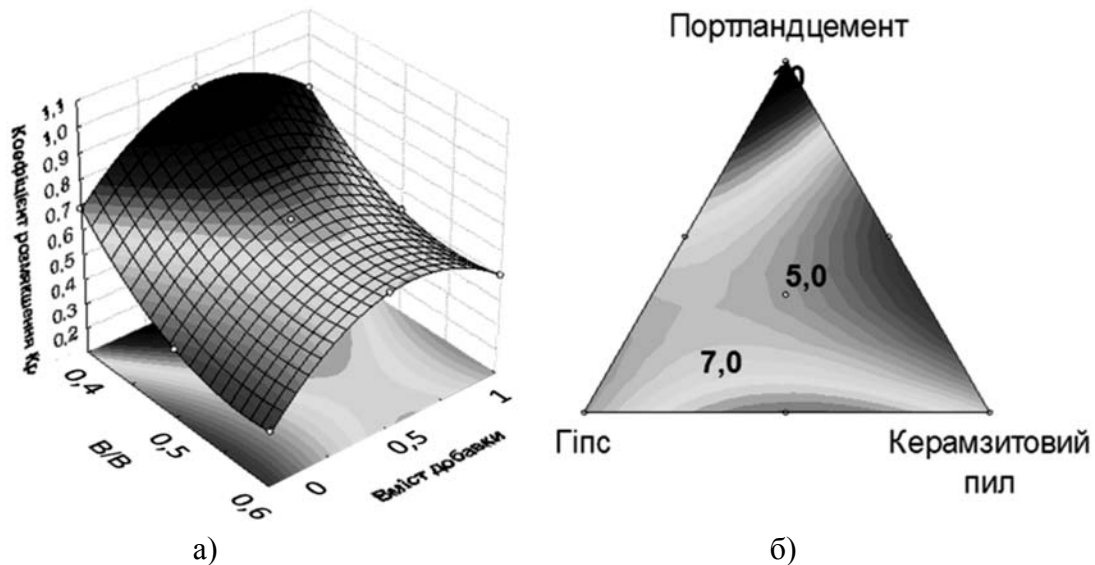


Рисунок 2. Графічні залежності коефіцієнта водостійкості (а) і міцності при стиску у віці 28 діб (б) від варійованих факторів

При подальшому твердінні у вологих умовах спостерігається підвищення міцності в композиціях, що характеризуються більшим вмістом портландцементу. Так, зокрема, максимальна міцність на стиск у віці 28 діб складає 10...11 МПа (рис. 2), при цьому вміст портландцементу – 33...35%, а вміст гіпсу мінімальний – 55...60%. На 28-му добу характер впливу технологічних факторів (В/В та вмісту добавки FugeC) практично не змінюється, однак стає помітним вплив водопотреби компонентів в'язучого на оптимальний з позиції максимальної міцності водовміст (В/В): збільшення частки керамзитового пилу у в'язучому викликає зміщення максимуму міцності у бік збільшення В/В від 0,4 до 0,5.

Аналізуючи математичну модель коефіцієнта розм'якшення гіпсобетону (K_p) (7) слід відмітити, що фактор v_3 (вміст портландцементу) становиться більш вагомими у порівнянні з факторами v_1 (вміст гіпсу) та v_2 (вміст керамзитового пилу). Збільшення вмісту гіпсу і керамзитового пилу викликає зменшення водостійкості від 0,86...0,76 до 0,60...0,55. Добавка FugeC викликає значне підвищення водостійкості гіпсобетону (в межах 22...25%) при кількості 0,5...0,55% від в'язучого. Це вказує на можливість зниження необхідної для забезпечення водостійкості кількості портландцементу.

Отримані математичні моделі властивостей вібропресованого гіпсобетону дозволяють встановити оптимальні параметри отримання для водостійкого вібропресованого гіпсобетону. Оптимізація проводилась графічним способом, шляхом суміщення відповідних діаграм міцності у віці 28 діб та коефіцієнта водостійкості. Критеріями оптимізації вибрано міцність бетону (не менше 5 МПа), коефіцієнт розм'якшення (не менше 0,8), а також мінімальну частку портландцементу та максимальну частку керамзитового пилу у композиції (рис. 3).

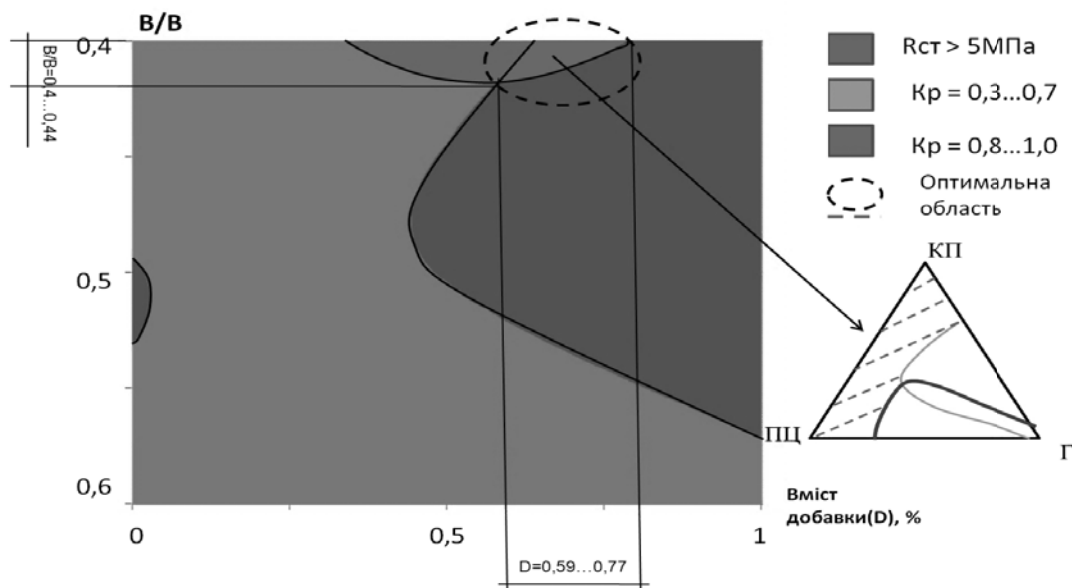


Рисунок 3. Оптимізація складу вібропресованого гіпсokerамзитобетону

В результаті оптимізації встановлено наступні параметри: вміст добавки FugeC - 0,59...0,77; водов'язуче відношення - 0,4...0,44; вміст гіпсу - 55...60%, портландцементу - 22...25%, керамзитового пилу - 18...20%. При цьому прийняте співвідношення в'язучого і керамзитового заповнювача (гравію і піску) становило 1:2.

Таким чином, при використанні наджорстких сумішей з вологістю 5...6% способом вібропресування можна отримати гіпсokerамзитобетон з середньою густиною 800...1200 кг/м³ при міцності 5...11 МПа. При використанні гіпсоцементної композиції з керамзитовим пилом та гідрофобізуючою добавкою можна суттєво підвищити водостійкість гіпсбетону.

Бетон таких властивостей можна використовувати для виготовлення повнотілих та пустотних блоків марок від М35 до М100 для внутрішніх перегородок, а також як заповнення прорізів у каркасних будівлях.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дворкин Л.И. Вибропрессованный гипсовый бетон. / Дворкин Л.И. Житковский В.В., Кулакевич Р.Н. // Зб. Будівельні конструкції- вип.72, К.:НДБК,2009, с.312...319.
2. Л.Й. Дворкін. Бетони на основі наджорстких сумішей. / Л.Й. Дворкін, В.В. Житковський, В.О. Каганов. // Рівне: Вид-во РДЦНТЕІ, 2006. – 179 с.
3. Дворкін Л.Й. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту(навчальний посібник) / Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л. Житковський В.В // Рівне: НУВГП,2011.-174 с.
4. Ферронская А.В. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение) / А.В. Ферронская // Справочник. Москва: Изд-во АСВ, 2004. – 488 с.
5. Житковський В.В. Вплив ущільнюючих та гідрофобізуючих добавок на властивості вібропресованих дорожніх бетонів / Житковський В.В. // Зб. «Бетони і розчини з використанням ефективних добавок та відходів промисловості» (матеріали VI науково-практичного семінару. Київ, 2008, с. 89...94.
6. Вознесенский В.А. Численные методы решения строительных задач на ЭВМ. / Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарьков В.А. // К. : Вища школа, 1989. - 328 с.