Національний університет
водного господарства
та природокористування

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та природокористування

Л. Й. Дворкін, В. В. Марчук, В. В. Житковський

СУХІ БУДІВЕЛЬНІ СУМІШІ НА ОСНОВІ РЕАКЦІЙНО ПОРОШКОВИХ БЕТОНІВ

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Монографія

За редакцією

Заслуженого діяча науки і техніки України
доктора технічних наук, професора Л.Й. Дворкіна

Рівне 2022

Національний університет
водного господарства
та природокористування

УДК 691.53
Д24

Рецензенти:
Кровяков С. О., доктор технічних наук, професор Одеської академії будівнництва та архітектури;
Кочкарьов Д. В., доктор технічних наук, професор кафедри міського будівництва та господарства Національного університету водного господарства та природокористування.

Рекомендовано науково-технічною радою Національного університету водного господарства та природокористування. Протокол № 152_від 24_лютого 2022 р.

Дворкін Л. Й., Марчук В. В. Житковський В. В.
Д24 Сухі будівельні суміші на основі реакційно порошкових бетонів : монографія. [Електронне видання]. – Рівне : НУВГП, 2022. – 144 с.
ISBN 978-966-327-529-1

Національний університет
водного господарства
та природокористування

У монографії наведені результати експериментально-теоретичних досліджень сухих будівельні суміші на основі реакційно порошкових бетонів з визначення технологічних параметрів отримання сумішей різного функціонального призначення.

УДК 691.53

ISBN 978-966-327-529-1

© Л. Й. Дворкін, В. В. Марчук, В. В. Житковський, 2022
© НУВГП, 2022

Національний університет
водного господарства
та природокористування

ЗМІСТ

1. РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВІ БЕТОНИ – ЕФЕКТИВИЙ ВИД БЕТОНІВ НОВОГО ПОКОЛІННЯ ……..... 5
1.1 Загальна характеристика реакційно-порошкових бетонів…….……. 5
1.2. Основні напрямки застосування реакційно-порошкових бетонів……. 7
1.3 Зерновий склад піску як заповнювача реакційно-порошкових бетонів…… 10
1.4. Вплив водов'яжучого відношення (В/В) та різних видів суперпластифікаторів на міцність реакційно-порошкових бетонів…… 19
1.5. Вплив мінеральних добавок на міцність реакційно-порошкових бетонів…….. 26
1.6. Аналіз впливу комплексу технологічних факторів, що впливають на міцність реакційно-порошкових бетонів. Обґрунтування оптимальних складів…….. 47
1.7. Вплив температурних режимів твердіння на міцність реакційно-порошкових бетонів……. 60
Перелік використаних до розділу 1……. 68

2. БУДІВЕЛЬНІ СУМІШІ НА ОСНОВІ РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВИХ БЕТОНІВ……. 70
2.1. Передумови використання РПБ у будівельних сумішах 70
2.2. Дослідження впливу полімеру на властивості СБС…… 75
2.3. Ремонтні суміші на основі РПБ…….…….. 79
2.4. Гідроізоляційні суміші на основі РПБ…….…… 92
2.5. Поризовані та теплоізоляційні суміші на основі РПБ… 100
2.6. Суміші для наливних підлог на основі РПБ…….. 110
2.7. Сухі бетонні суміші на основі реакційно порошкових бетонів……. 119
2.7.1. Склад і властивості керамзитобетонів на основі РПБ… 119
2.7.2. Полістиролбетонні суміші на основі РПБ ……..... 126
Перелік використаних джерел до розділу 2……. 142

Національний університет
водного господарства
та природокористування

ПЕРЕДМОВА

При зведенні будівель і споруд виникає необхідність в сумішах різного призначення. Виготовлення таких сумішей можливе централізовано на заводах або безпосередньо на будівельних майданчиках з застосуванням напівфабрикатів. В якості такого напівфабрикату може бути використаний реакційно-порошковий бетон (РПБ). РПБ – можна розглядати, як суху суміш, що містить в'яжуче (портландцемент), дисперсний наповнювач (дрібний пісок, зола) і суперпластифікатор, а також при необхідності добавки-модифікатори (мікрокремнезем, метакаолін). Ці суміші забезпечують високу міцність, адгезійну здатність та довговічність розчинів у різних умовах експлуатації. Коректуючи склади РПБ різними компонентами можна досягати необхідних властивостей сухих сумішей, розчинів різного призначення.

У монографії наведені результати досліджень сухих будівельних сумішей на основі реакційно-порошкових бетонів, виконаних на кафедрі технологій будівельних виробів і матеріалів Національного університету водного господарства та природокористування.

Важливою особливістю цих досліджень було визначення технологічних параметрів, методології прогнозування властивостей і проектування складів сухих будівельних сумішей на основі реакційно-порошкових бетонів з широким застосуванням місцевої в т.ч. техногенної сировини.

Автори вдячні рецензентам монографії д.т.н., проф. Кровякову С.О. і д.т.н., проф. Кочкарьову Д.В., зауваження яких враховані при підготовці монографії до друку. Автори також вдячні інженерам Л.А. Мацько та Г.В. Киц за технічну підготовку монографії до друку. Автори вважають, що монографія викличе інтерес у широкому колі будівельників і технологів, студентів профільних вузів, а також дослідників, що працюють в області технологій сухих будівельних сумішей

Національний університет
водного господарства
та природокористування

1. РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВІ БЕТОНИ – ЕФЕКТИВИЙ ВИД БЕТОНІВ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

1.1. Загальна характеристика реакційно-порошкових бетонів

Ефективним різновидом дрібнозернистого бетону, котрий володіє підвищеною однорідністю, міцністю та деформативністю є розроблений у Франції у 90-х роках XX століття реакційно-порошковий бетон (РПБ) (Reactive Powder Concrete (RPC)) [1]. Для такого бетону міцність при стиску досягає 150…200 МПа і вище. Як показують дані багатьох дослідників [1; 2; 3], для РПБ поряд високою міцністю характерний також високий показник тріщиностійкості, що характеризується співвідношенням міцності при стиску до міцності при згині. Такий показник для РПБ знаходиться у межах від 3,5 до 5, тоді як у високоміцних бетонах з крупним заповнювачем – 8…10 [1]. Поєднання надвисокої міцності та високої деформативності у реакційно-порошковому бетоні забезпечується додатково внаслідок дисперсного армування короткими сталевими волокнами [4].

У складі РПБ не міститься крупний заповнювач. Замість цього використовуються дрібні порошки, зокрема кварцовий пісок і мелений кварц з розмірами частинок від 0,045 до 0,6 мм. Термін «реакційно-порошковий» відображає той факт, що всі дисперсні компоненти в РПБ при твердінні проходять хімічні перетворення. Аморфний різновид діоксиду кремнію сприяє пуцолановій реакції з утвореним при гідратації цементу гідроксидом кальцію; мелений кварц утворенню тобермориту під час термообробки РПБ при підвищеному тиску [5].

Надвисокі механічні характеристики РПБ можна пояснити наступними його особливостями:

1. підвищенням однорідності шляхом усунення крупних заповнювачів;

2. підвищенням щільності бетону шляхом оптимізації зернового складу суміші компонентів;

Національний університет
водного господарства
та природокористування

3. покращенням властивостей цементуючої матриці шляхом додавання високоактивних пуцоланових добавок та за рахунок зменшення водо-в'яжучого відношення [6];

Надвисока міцність та інші властивості РПБ забезпечують багато переваг порівняно зі звичайним бетоном.

Високі міцнісні властивості дають можливість отримати РПБ значну перевагу над звичайними бетонами при статичних навантаженнях. При виробництві більш тонких конструкцій дозволяють зменшити загальні витрати і збільшити корисну площу в висотних будівлях.

Підвищена деформативність РПБ забезпечує більшу надійність конструкцій навіть при землетрусах [7]; високі характеристики поглинання енергії РПБ також можуть дозволити поліпшити прогини колон, шарнірних балок і стінових конструкцій [8].

РПБ має підвищену водонепроникність, практично не піддається вилуговуванню або проникненню хлоридів і сульфатів. Підвищена стійкість до стирання забезпечує тривалий термін служби поверхонь споруд, в той час як підвищена корозійна стійкість забезпечує захист в районах із суворими кліматичними умовами.

Однак поряд з перевагами, РПБ має певні недоліки: високий вміст цементу (до 800…1200 кг/м^3) впливає не тільки на виробничі витрати, але й має негативний вплив на теплоту гідратації і може викликати проблеми з усадкою;

У зв'язку з тим, що РПБ містить значну кількість високодисперсних матеріалів технологія їх виготовлення вимагає спеціальних способів. Методи змішування РПБ, прийняті різними дослідниками [8; 9; 10] більш-менш однакові. Їх можна підсумувати наступним чином:

1. Сухі інгредієнти спочатку змішують (на низькій швидкості) протягом 1…3 хвилин до досягнення гомогенної суміші;.

2. Половину кількості води, що містить половину об'єму суперпластифікатора, додають і змішують приблизно 3…5 хвилин (при високій швидкості).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

3. Воду і суперпластифікатор, що залишилися, додають і перемішують протягом 5…8 хвилин (при високій швидкості).

Загальний час перемішування становить від 10 до 15 хвилин, згідно даних [9] суміш РПБ змішувалася при дуже високій швидкості 30 оборотів в секунду. Швидкість змішувача впливає як на час перемішування так і властивості РПБ. Після завершення процесу змішування РПБ виливають у сталеві форми і вібрують на вібраційному столі.

1.2. Основні напрямки застосування реакційно-порошкових бетонів

Елементи конструкцій. Існує ряд прикладів застосування РПБ для зведення елементів мостів (переважно пішохідних). Шербрукський пішохідний міст у Квебеку в Канаді був першою в світі великою спорудою, яка була побудована на основі РПБ. Конструкція мосту являє собою ферму, що не містить звичайної арматурної сталі, натягнуту сталевими тросами. РПБ залитий в тонкостінні труби з нержавіючої сталі для складання діагональних елементів. Ефективна товщина пішохідного мосту становить лише 150 мм. Відмічається, що є високий потенціал РПБ для збірних або попередньо-напружених конструкцій.

Пішохідний міст в Кореї Суньюдо у Сеулі є найбільшим мостом з РПБ у світі з одним прольотом 120 м. Міст також не містить звичайної арматури. Під час будівництва всі елементи конструкції були зібрані поруч з будівельним майданчиком в зоні, що містила дозувальні установки, сталеву опалубку та камеру термічної обробки.

Пішохідний міст Саката-Мірай у Саката в Японії не містить жодної пасивної арматури. Він надзвичайно легкий з вагою всього 56 тонн, що становить приблизно одну п'яту від статичного навантаження еквівалентної звичайної попередньо напруженої бетонної конструкції [11]. Технологія РПБ дозволяє будівельникам при зведенні пішохідних мостів оптимізувати використання матеріалу та реалізувати економічні вигоди.

Матеріали для ремонту. Окрім застосування РПБ при зведенні тонкостінних будівельних конструкцій, він може бути

Національний університет
водного господарства
та природокористування
використаний як матеріал для ремонту бетонних споруд. Ремонтний матеріал повинен мати високу текучість, щоб повністю заповнити тріщини і пори. У той же час він повинен мати практично такий же модуль пружності, що й у бетонної основі. Ремонтний матеріал з РПБ з високою текучістю, відносно більшою міцністю на стиск і згин порівняно з бетонною основою є кращим.

Авторами у праці [12] було виявлено, що РПБ володіє високою адгезією, динамічним модулем пружності та довговічністю зчеплення в порівнянні з іншими бетонами. Застосування РПБ товщиною 10 мм для склеювання елементів конструкцій після 7-денного твердіння призводить до збільшення міцності при стиску і згині більш ніж у 2 рази ніж при використанні звичайного бетону. Після 1000 циклів стирання, зниження маси РПБ і звичайного бетону відрізняється майже у 8 разів. Це ж дослідження [12] показує, що відносний динамічний модуль і міцність на стиск РПБ зростають після 300 циклів заморожування і відтавання. Збільшення міцності може бути викликане безперервною гідратацією цементу і пуцолановою взаємодією з мікрокремнеземом.

Міцність зчеплення РПБ з арматурою майже в 3 рази перевищує міцність звичайного бетону після 1000 циклів заморожування-відтавання. У роботі [13] також показані високі результати випробування на витягування арматурних стержнів.

Матеріали для безпеки. Одним із напрямків можливого застосування РПБ – є матеріали для різного роду захисту (рис. 1.1, 1.2, 1.3).

У дослідженнях [14] відмічено, що РПБ може використовуватися як надійний контейнер для радіоактивних відходів АЕС завдяки відмінній міцності і довговічності. Відповідно РПБ може застосовуватись у якості водонепроникних контейнерів з небезпечними рідинами через його дуже низьку проникність і високу хімічну стійкість.

Дисперсно-армований РПБ, відомий під комерційною назвою DUCON® використовується у захисних бетонних елементах проти динамічних впливів, таких як вибухи, бомбардування, удари або землетруси. Для використання РПБ

Національний університет
водного господарства
та природокористування

як захисного бетону вирішальне значення має взаємозв'язок деформативних та міцнісних властивостей. За допомогою DUCON® Security можна ефективно підвищити захист будівель від руйнівних дій за рахунок використання тонкостінних елементів.

Рис. 1.1. Результат випробувань вибухом залізобетонних плит, підсилених і не підсилених за допомогою РПБ DUCON®

Встановлено, що дисперсно-армований РПБ витримує вибухи, бомбардування, землетруси та їх поєднання при товщині не більше 4…5 см. Такі характеристики були підтверджені і продемонстровані у багатьох випробуваннях і дослідженнях відомих університетів і установ [14; 15]. У той же час завдяки високій текучості суміші такий РПБ придатний для виготовлення виробів різноманітних форм, що адаптує його до загальної архітектурної картини. Матеріал, отриманий за технологією DUCON®, використано для захисту об’єктів критичної інфраструктури, таких як посольства, хмарочоси, громадські центри, центри обробки даних високого рівня безпеки та атомних електростанцій. Використання дисперсно-армованого РПБ дозволяє також забезпечити захист людей від уламків бетонних конструкцій, що утворюються при вибухах чи

Національний університет
водного господарства
та природокористування

інших динамічних впливах. Великі приміщення з самонесучими перекриттями, такі як спортивні зали, громадські приміщення, виробничі приміщення або будівлі з високими вимогами безпеки, вимагають високих вимог до безпеки конструкцій. Стельові конструкції, виготовлені зі звичайного залізобетону, утворюють, у разі руйнування елементів (наприклад, при вибухах), небезпечні для людей та обладнання уламки. Підкріплення залізобетонних плит захисним шаром з РПБ може призвести до значного поліпшення безпеки. Випробування показали, що шари захисту від уламків, виготовлені з РПБ DUCON®, можуть поглинати локальні руйнування залізобетонних елементів при товщині шару до 1,5 см. Захисний шар дисперсно-армованого РПБ діє як захисна сітка, що запобігає падінню уламків. Наведені дані свідчать про ефективність застосування тонкошарових елементів, виготовлених з РПБ в елементах захисних та фортифікаційних споруд.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

а) б)

Рис. 1.2. Результати випробування залізобетонної плити (а) та плити з РПБ (б) шляхом контактної детонації

1.3. Зерновий склад піску як заповнювача реакційно-порошкових бетонів

Як показують теоретичних передумови, отримання РПБ та результати експериментальних досліджень різних авторів [1; 2; 5], значний вплив на реологічні та механічні властивості таких

Національний університет
водного господарства
та природокористування

бетонів спричиняє зерновий склад заповнювача та співвідношення між окремими фракціями. При цьому основним критеріями оптимізації РПБ є максимальна текучість бетонної суміші та міцність у необхідному віці.

Рис. 1.3. Залізобетонна плита із захисним шаром РПБ, для захисту від утворення уламків при руйнуванні

Досить ефективним експериментальним способом дослідження необхідного співвідношення між різними фракціями заповнювача та оптимізації гранулометричного складу є використання методів математичного планування експерименту з реалізацією симплекс-решітчатих планів типу «склад-властивість» та «склад-технологія-властивість» [16].

В наших дослідах використовувались пісок кар'єрний фракцій 0,16…0,315 мм, 0,315…0,63 мм, 0,63…1,25 мм, портландцемент ПЦ-І-500 та суперпласти-фікатор Melflux 2141 f. В якості мікронаповнювача цементного тіста використовували мелений пісок з різною тонкістю помелу. Умови планування наведені у табл. 1.1.

Згідно плану експерименту готувалась реакційно-порошкова бетонна суміш з рухомістю, що характеризувалась розпливом конуса 250±5 см. Характеристикою водопотреби

Національний університет
водного господарства
та природокористування

бетонної суміші було прийнято водов'яжуче відношення (В/В), що забезпечувало задану рухомість. Склад бетону був прийнятий наступний: Ц (витрата в'яжучого (цемент+наповнювач))=1200 кг/м^3; витрата заповнювача З=1200 кг/м^3. Кількість суперпластифікатора в усіх точках експерименту приймалась однаковою – 1% від маси в'яжучого. З бетонної суміші виготовлялись зразки-куби 10×10×10 см, які піддавали твердінню у нормальних умовах і випробовували у віці 28 діб з визначенням міцності при стиску ($f_{см}^{28}$, МПа).

Таблиця 1.1

Умови планування експерименту

Фактори		Рівні варіювання		
Натуральний вид	Кодований			
Вміст фракції (0,63…1,25 мм), %	V_1	0	50	100
Вміст фракції (0,315…0,63 мм), %	V_2	0	50	100
Вміст фракції (0,16…0,315 мм), %	V_3	0	50	100
Ступінь наповнення цементного тіста меленим піском, Н/(Н+Ц)	X_1	0	0,15	0,3
Питома поверхня меленого піску, ($S_п$, см^2/г)	X_2	2300	3500	4700

В результаті обробки експериментальних даних (табл. 1.2) отримані адекватні математичні моделі вихідних параметрів:

$$B/B = 0{,}17V_1 + 0{,}2V_2 + 0{,}25V_3 + 0{,}2V_1V_2 + 0{,}19V_1V_3 + \\ + 0{,}23V_2V_3 - 0{,}003V_1X_2 + 0{,}001V_2X_1 + 0{,}001V_2X_2 - \\ - 0{,}003V_3X_1 + 0{,}012V_3X_2 + 0{,}006X_1X_2 + 0{,}015X_1^2 + 0{,}007X_2^2 \quad (1.1)$$

$$f_{28} = 73{,}5V_1 + 80{,}4V_2 + 103{,}3V_3 + 65{,}6V_1V_2 + 80{,}1V_1V_3 + \\ + 96{,}3V_2V_3 + 3{,}3V_1X_1 - 5{,}1V_1X_2 + 7{,}3V_2X_1 + 7{,}0V_2X_2 + \\ + 9{,}1V_3X_1 + 10{,}7V_3X_2 - 4{,}6X_1X_2 - 18X_1^2 - 9{,}5X_2^2 \quad (1.2)$$

Як показує аналіз математичної моделі (1.1) водопотреба бетонної суміші для РПБ суттєво залежить від зернового складу та крупності зерен заповнювача (фактори V_1...V_3). Також на водопотребу бетонної суміші значно впливає і наповнення цементного тіста меленим піском (X_1 та X_2).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Таблиця 1.2

Матриця планування та результати експерименту

№ з/п	Кодовані значення факторів					Вихідні параметри		
	V_1	V_2	V_3	X_1	X_2	В/Ц	Міцність при стиску, МПа, f_c^{28}	$Ц_f$, * кг/МПа
1.	1	0	0	-1	-1	0,20	43,0	27,9
2.	1	0	0	+1	+1	0,20	40,0	18,0
3.	0	1	0	-1	-1	0,25	37,4	32,1
4.	0	1	0	+1	-1	0,23	61,9	11,6
5.	0	1	0	+1	+1	0,25	66,0	10,9
6.	0	1	0	-1	+1	0,23	61,4	19,5
7.	0	0	1	-1	-1	0,28	52,3	22,9
8.	0	0	1	+1	0	0,26	94,6	7,6
9.	0	1	1	-1	+1	0,27	80,8	14,9
10.	0,5	0,5	0	0	-1	0,25	84,8	11,3
11.	0,8	0,2	0	-1	+1	0,22	56,6	21,2
12.	0,3	0	0,7	+1	+1	0,30	92,8	7,8
13.	0,5	0	0,5	+1	-1	0,27	89,3	8,1
14.	0,6	0	0,4	0	0	0,25	104,5	9,2
15.	0	0,4	0,6	0	-1	0,30	100,6	9,5
16.	0	0,5	0,5	-1	0	0,31	91,3	13,1

* $Ц_f = Ц / f_{см}^{28}$.

Водов'яжуче відношення реакційно-порошкової бетонної суміші знаходилось у межах 0,17…0,31. Зі збільшенням крупності зерен заповнювача витрата води, необхідна для забезпечення рухомості суміші, здебільшого знижувалась. При використанні фракції піску 0,63…1,25 мм задана рухомість забезпечувалась при В/В=0,18…0,19. При зниженні крупності до 0,315 мм, В/В підвищувалась до 0,2…0,22, а при зниженні крупності до 0,16…0,315 мм – до 0,25…0,27, здебільшого відповідно до питомої поверхні заповнювача. Вплив заповнювача найдрібнішої фракції менш помітний. Це може бути викликане деякою розріджуючою дією дисперсних кварцових частинок на цементне тісто, відмічене іншими

Національний університет
водного господарства
та природокористування

дослідниками [17]. Такий ефект спостерігається при одночасній дії суперпластифікаторів з високою водоредукцією, наприклад на поліакрилатній чи полікарбоксилатній основі. Зі збільненням кількості меленого кварцового піску у наповненому цементному тісті та його питомої поверхні позитивна розріджуюча дія фракції 0,16…0,315 мм знижується.

Слід відмітити, що у випадку використання у РПБ чистого цементного в'яжучого без наповнювачів бетонна суміш є досить високої в'язкост і навіть при збільшенні витрати води не піддається саморозтіканню. У свою чергу, підвищення ступеня наповнення цементного тіста меленим кварцовим наповнювачем сприяє розрідженню бетонної суміші і підвищенню її текучості. Про це свідчить зниження показника В/В, що забезпечує задану рухомість суміші.

Такий вплив дисперсної добавки у «тонкозернистій» бетонній суміші підтверджується даними щодо впливу дисперсних наповнювачів на властивості цементного тіста. Вплив факторів X_1 та X_2 ступеня наповнення цементного тіста та дисперсності наповнювача) має екстремальний характер, тобто позитивний вплив цих факторів на легковкладальність бетонної суміші спостерігається до деяких порогових значень, після досягнення яких водопотреба суміші починає зростати і уже не компенсується розріджуючою дією суперпластифікатора. Оптимальні, з позиції мінімальної водопотреби, значення ступеня наповнення цементного тіста меленим піском знаходяться в межах 0,08…0,2, значення питомої поверхні меленого піску – 2300…3600 см^2/г. (табл. 1.3)

Таблиця 1.3

Оптимальні параметри меленого піску щодо досягнення мінімальної водопотреби РПБ

№	Фракція заповнювача	Ступінь наповнення цементного тіста	Питома поверхня наповнювача, см^2/г
1	0,63…1,25 мм	0,08…0,2	3000…3600
2	0,315…0,63 мм	0,1…0,17	3200…3600
3	0,16… 0,315 мм	0,17…0,2	2300…2400

Національний університет
водного господарства
та природокористування

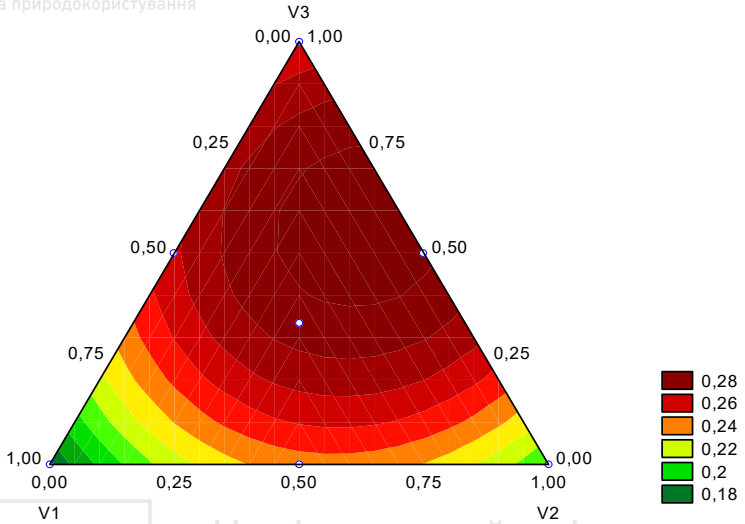


Рис. 1.4. Діаграма впливу зернового складу заповнювача на водопотребу (В/В) РПБ

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Міцність реакційно-порошкового бетону на 28-му добу за отриманими експериментальними даними змінювалась в досить широкому діапазоні у межах від 40 до 105 МПа. Це свідчить про значний ефект, який чинять вибрані фактори на міцність РПБ.

Аналізуючи математичну модель міцності (1.2) слід відмітити, що фактори суміші (V_1...V_3) чинять значний вплив на міцність бетону, причому як окремо, так і у поєднанні один з одним. Для усіх сумішевих факторів характерні також значні взаємодії з технологічними факторами. Для технологічних факторів (X_1, X_2) помітні суттєві від'ємні квадратичні ефекти у рівнянні регресії (1.2), що свідчить про екстремальний характер впливу даних факторів на міцність РПБ. За математичною моделлю (1.2) максимальні значення міцності (105…110 МПа) спостерігаються у випадках, коли заповнювач представлений крупною фракцією (0,63…1,25 мм), а також сумішами цієї фракції з іншими ((0,63…1,25 мм+0,16…0,315 мм) та (0,63…1,25 мм+0,315…0,63 мм), коли за рахунок змішування фракцій досягається мінімальна пустотність заповнювача [6].

Національний університет
водного господарства
та природокористування

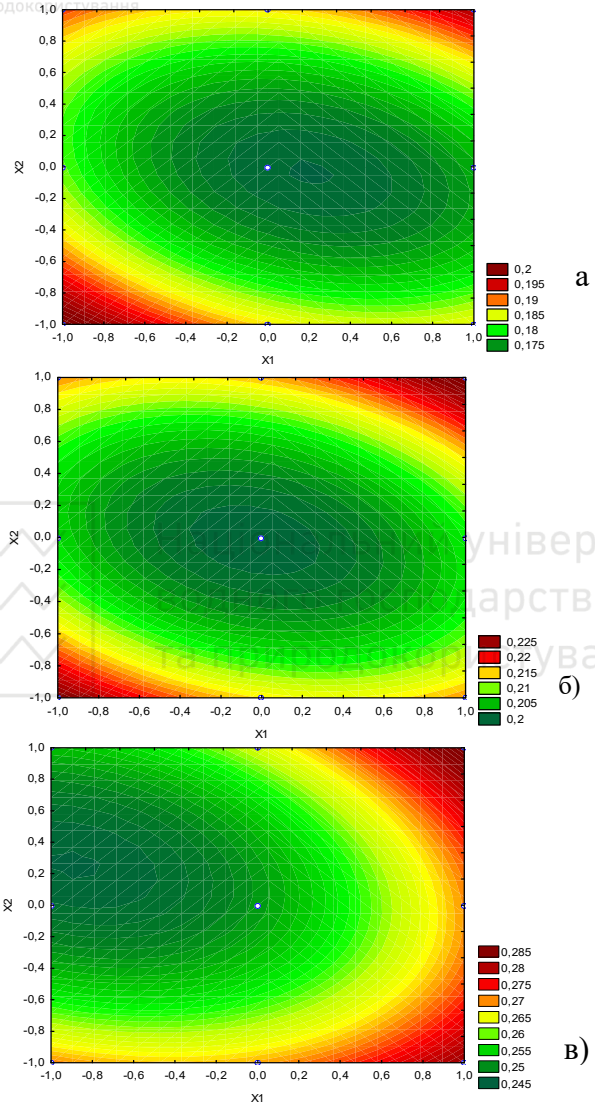


Рис. 1.5. Діаграми впливу ступеня наповнення цементного тіста мінеральним наповнювачем кварцовим піском (X_1) та його дисперсності (X_2) на водопотребу РПБ: а) – крупність заповнювача 0,63…1,25 мм;
б) – 0,315…0,63 мм; в) – 0,16…0,315 мм

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Максимально ефективна з позиції міцності РПБ суміш двох фракцій – 0,63…1,25 мм та 0,16…0,315 мм. Найбільше зниження міцності викликається максимальним зниженням крупності заповнювача (до 0,16…0,315 мм) і, відповідно, підвищенням водопотреби суміші.

Суттєвій зміні міцності сприяє наповнення цементу дисперсною мінеральною добавкою, в якості якої був використаний мелений кварцовий пісок. Як уже відмічалось, порошкова бетонна суміш на ненаповненому в'яжучому важко перемішувалась, не мала необхідної текучості, що ускладнювало її укладання. Внаслідок цього експериментальні зразки без наповнювача відрізнялись неоднорідністю, підвищеним повітря втягуванням і, як наслідок, зниженою густиною. Максимальні значення міцності на такому в'яжучому становили 90…92 МПа, при наступному співвідношенні фракцій: 0,16…0,315 мм – 25…40%; 0,315…0,63 мм – 30…40%; 0,63…1,25 мм – 40…70%. У даному випадку фракція 0,16…0,315 мм у деякій мірі бере на себе функцію дисперсного наповнювача цементного тіста, структуруючи бетонну суміш і полегшуючи вкладання.

Як показує аналіз моделі (2.2) ступінь наповнення цементного тіста меленим кварцовим піском (X_1) та питома поверхня меленого піску (X_2), за рахунок покращення текучості суміші та ущільнення бетону, а також структуроутворюючої дії на цементну матрицю викликають підвищення міцності РПБ від 90…92 МПа до 110…120 МПа. Від'ємний ефект взаємодії даних факторів вказує на зниження ефективного вмісту кварцового наповнювача з підвищенням його дисперсності. Скоріш за усе це можна пояснити значним підвищенням водопотреби та пористості цементної матриці. Такий висновок підтверджує також те, що взаємодія даних факторів стає більш помітною, коли заповнювач представлений дрібною фракцією піску (0,16…0,315 мм): максимальна у даному випадку міцність (70…72 МПа) досягається при мінімальній дисперсності кварцового наповнювача (2300...2700 см^2/г).

Максимальні значення міцності РПБ (110…120 МПа) можуть бути отримані при витраті меленого піску 180…200 кг/м^3 з питомою поверхнею 3500…4000 см^2/г.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Оптимальний гранулометричний склад заповнювача, що забезпечує дану міцність наступний: 0,16…0,315 мм – 0…5%; 0,315…0,63 мм – 30…35%; 0,63…1,25 мм – 60…65%.

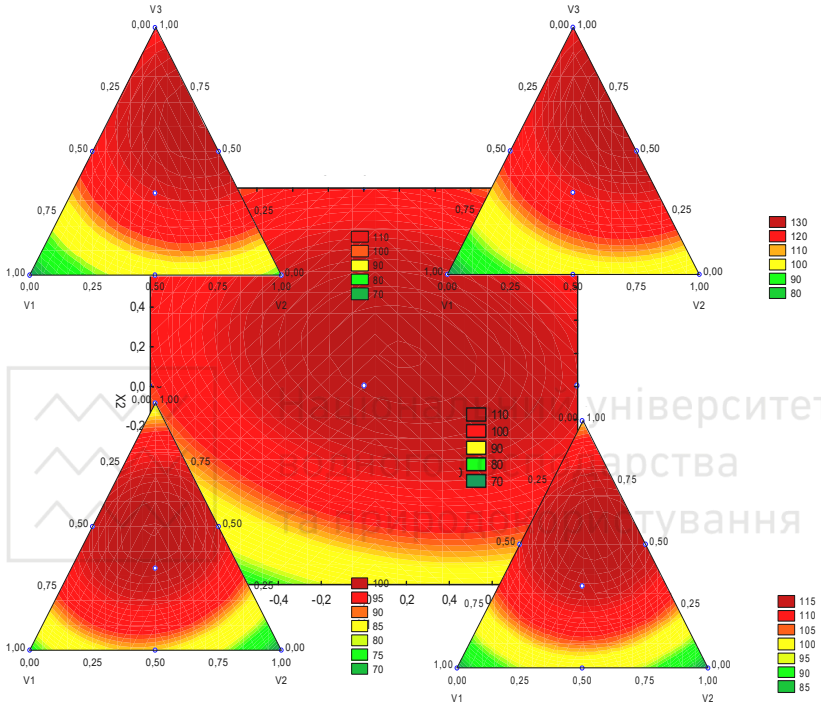


Рис. 1.6. Комплексна ізопараметрична діаграма впливу зернового складу заповнювача, вмісту та дисперсності наповнювача на міцність РПБ у віці 28 діб

З метою виконання оптимізації гранулометричного складу заповнювача, вмісту та дисперсності наповнювача у РПБ було розраховано показник, що характеризує питому витрату цементу на одиницю міцності. Даний показник був запропонований Ю.М. Баженовим та В. Калашниковим для визначення ефективних складів реакційно-порошкових бетонів:

$$Ц_f = Ц/fc,\ кг/МПа. \qquad (1.3)$$

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Аналізуючи розрахункові дані $Ц_f$ слід звернути увагу на те, що мінімальні значення показника при оптимальному, з позиції досягнення максимальної міцності, співвідношенні фракцій заповнювача РПБ практично співпадають. Максимально ефективні значення міцності РПБ становлять 105…110 МПа при максимальних витратах меленого наповнювача та питомій поверхні (2000...2200 см^2/г). Таким чином, підвищення тонкості помелу піску та підвищення витрати цементу хоч і дають можливість підвищити міцність до 125 МПа, однак є малоефективним чинниками з економічної точки зору. Мінімально досягнуті значення показника $Ц_f$ за результатами даного експерименту знаходяться в межах 7…8 кг/МПа. Як показано в роботах [17; 18], ефективні значення даного показника для РПБ становлять 4…5 кг/МПа, що дає можливість зробити висновок про необхідність використання при отриманні РПБ більш ефективних мінеральних добавок ніж використаний мелений кварцовий пісок.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

1.4. Вплив водов'яжучого відношення (В/В) та різних видів суперпластифікаторів на міцність реакційно-порошкових бетонів

Вплив водов'яжучого відношення. Вплив В/В на міцність РПБ при стиску вивчався на класичному складі бетону такого виду, що містив цемент (840 кг/м^3), мікрокремнезем SikaFume-HR/TU (360 кг/м^3), пісок оптимізованого гранулометричного складу фракції 0,16…1,25 мм (1200 кг/м^3) та суперпластифкатор Melflux 2141 f (2% віц маси цементу). Вплив В/В на міцність РПБ при стиску при різному терміну твердіння показано у табл. 1.4 та рис. 1.7. З рис. 1.7 чітко видно, що існує оптимальне відношення В/В, яке дає найвищу міцність на стиск РПБ (145,0 МПа на 90 діб). Більш низьке В/В ніж 0,2 викликає зниження міцності РПБ на стиск.

Зменшення міцності відбувається в основному через відсутність достатньої кількості води замішування для забезпечення необхідного ущільнення бетону і належної

Національний університет
водного господарства
та природокористування

гідратації.

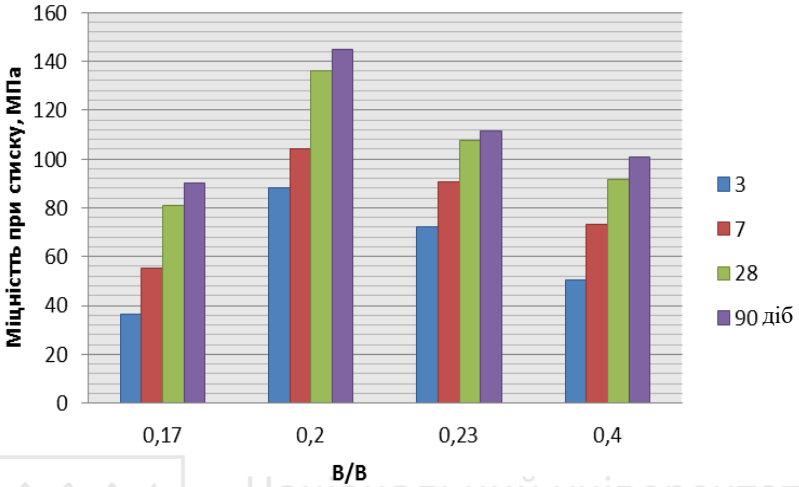


Рис. 1.7. Вплив водов'яжучого відношення на міцність РПБ у різному віці

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Таблиця 1.4

Вплив водов'яжучого відношення на міцність РПБ при різній рухомості бетонної суміші

Міцність РПБ при стиску у віці, МПа	Водов'яжуче відношення (В/В)			
	0,17	0,2	0,24	0,38
	Рухомість (по Суттарду), мм			
	10	25	30	35
3	36,4	88,1	72,1	50,4
7	55,3	104,2	90,7	73,3
28	81,1	136,2	107,6	91,8
90	90,1	145,0	111,5	100,8

Помітно значну кількість повітряних пустот у РПБ в результаті недоущільнення встановлено при В/В=0,17 при порівнянні зразків з В/В 0,2 і 0,24. При оптимальному В/В РПБ після твердіння отримується гомогенний і щільний камінь з мінімальною пористістю. Пуцоланова реакція, що зазвичай виникає в результаті реакції між гідрооксидом кальцію і

Національний університет
водного господарства
та природокористування

діоксидом кремнію, що міститься в активних мінеральних добавках, не може бути повною через низький вміст води. Подібні висновки отримані у роботі [19], де було відмічено, що непрогідратовані цементні частинки і зерна мікрокремнезему діють як наповнювачі і сприяють підвищенню щільності цементної матриці на макрорівні, що призводять до збільшення механічних властивостей на макрорівні, однак не у такій мірі, як частинки, що прогідратували і поєднались у нерозчинні сполуки. Отримані результати показують, що міцність при стиску збільшується як у ранньому так і більш пізньому віці твердіння. Відзначено, що міцність при стиску продовжує зростати від 28 днів до 90 днів. Встановлено, що РПБ демонструє більш значну кінетику наростання міцності порівняно зі звичайним бетоном. Швидкість наростання міцності для звичайного бетону через 28 діб суттєво уповільнюється, тоді як для РПБ спостерігається стійкий приріст і до 90 діб. Постійний приріст міцності РПБ відбувається в основному за рахунок безперервної пуцоланової реакції у пізньому віці, викликаної впливом мікрокремнезему.

Вплив вмісту та виду суперпластифікаторів. Визначення оптимальної кількості суперпластифікаторів має важливе значення для досягнення максимальної міцності РПБ. У деяких роботах відмічається [17], що виробництво зв'язної та текучої суміші для РПБ вимагало надзвичайно великих витрат суперпластифікатора порівняно з самоущільнюваним бетоном.

Було проведено дослідження ефективності різних видів суперпластифікуючих добавок на міцність РПБ. В якості добавок було використано: суперпластифікатор поліакрилатного типу Mapei Dynamon SP-3, та полікарбоксилатного типу Melflux 2651F, PCE-7, Muraplast FK 6330. Всі види пластифікуючих добавок використовувалися у вигляді водних розчинів (концентрації 25…30%). Витрати води визначалися із умови забезпеченості заданого розпливу 25…30 см по віскозиметру Суттарда. Результати випробувань наведені у табл. 1.5.

Задана рухомість суміші РПБ була забезпечена при В/В в межах від 0,18 до 0,24. Найбільше значення у виборі оптимального виду добавки для даного виду бетону має міцність на 1-шу та 28-му добу. Максимальну міцність на 28 добу (141 МПа) було досягнуто при використанні добавки

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Dynamon SP-3 (рис. 1.8, рис. 1.9) у кількості 2%, при цьому була забезпечена максимальна текучість і зв'язність суміші при В/В=0,2. Добавки Muraplast FK 6330 та Melflux 2651F при достатній міцності у 28 діб дещо знижували міцність у ранні терміни. При максимальному дозуванні добавок практично усі досліджені їх види суттєво знижували у першу чергу міцність на 1 добу, а такі як Muraplast FK 6330 і 28-му.

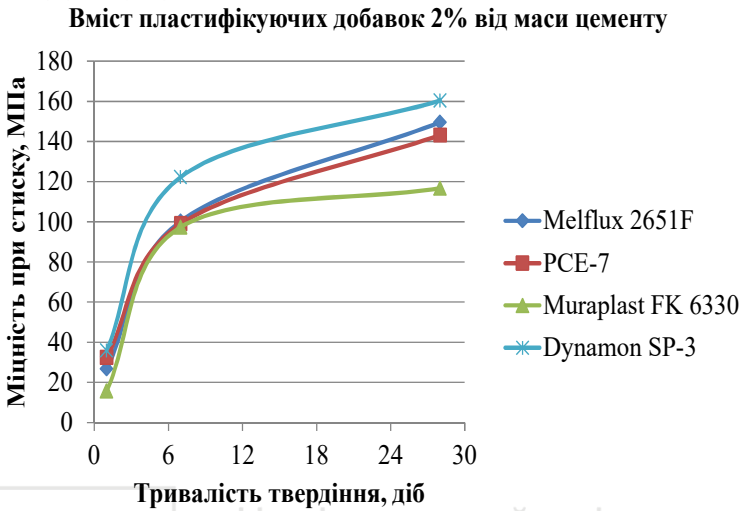
Таблиця 1.5

Вплив виду та кількості суперпластифікаторів на міцність РПБ

№	Вид добавки	Витрата СП, % від маси цементу	В/Ц	Розп-лив, см	Міцність бетону на стиску у віці, МПа		
					1 доба	7 діб	28 діб
1	Melflux 2651F	2	0,20	30	26,7	100,3	149,6
2		4	0,19	26	22,3	100,5	142,9
3	PCE-7	2	0,20	30	32,5	99,0	143,2
4		4	0,19	30	10,1	88,9	142,4
5	Muraplast FK 6330	2	0,24	30	15,7	97,4	116,7
6		4	0,21	28	12,7	91,1	112,2
7	Dynamon SP-3	2	0,20	30	35,9	122,3	160,4
8		4	0,18	30	17,3	102,1	151,4

На рис. 1.10 показано вплив дозування суперпластифікатора Dynamon SP-3 на міцність при стиску при постійному В/В (В/В=0,2) у різні терміни твердіння бетону. Чітко видно оптимальне дозування суперпластифікатора, що забезпечує найвищу міцність РПБ при стиску, яке становить 2,0% від маси цементу. Нижчий вміст суперпластифікатора ніж 2,0% – викликає суттєве зниження міцності РПБ на стиск. При більшому дозуванню СП ніж 2,0%, міцність на стиск РПБ змінюється, але, як правило, у меншій мірі. Порівнюючи значення міцності з кількістю суперпластифікатора 1% можна зробити висновок, що зниження міцності становить від 46% до 66% у діапазоні від 3 до 90 діб, що є досить значним показником. Це явище може бути обумовлено недостатньою кількістю СП для підвищення текучості суміші РПБ. Оскільки РПБ містить багато дрібних частинок, площа поверхні різко зростає в порівнянні з звичайним бетоном. Недостатній вміст СП знижує легкоукладальність за рахунок тертя при збільшенні площі поверхні заповнювача.

Національний університет
водного господарства
та природокористування



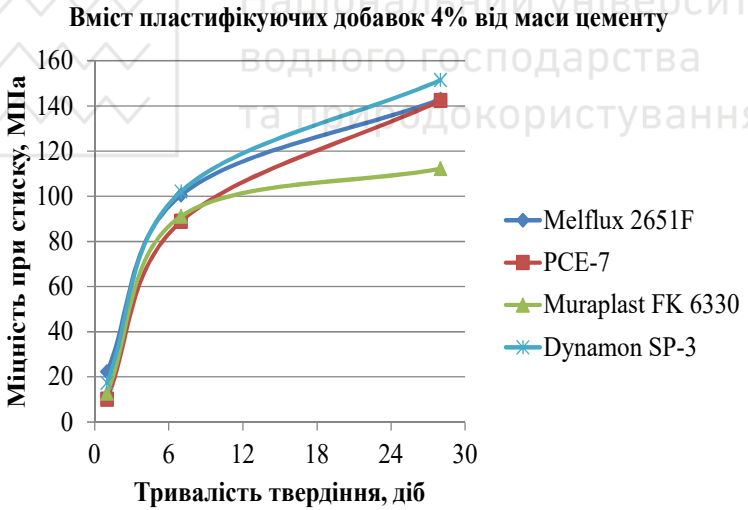
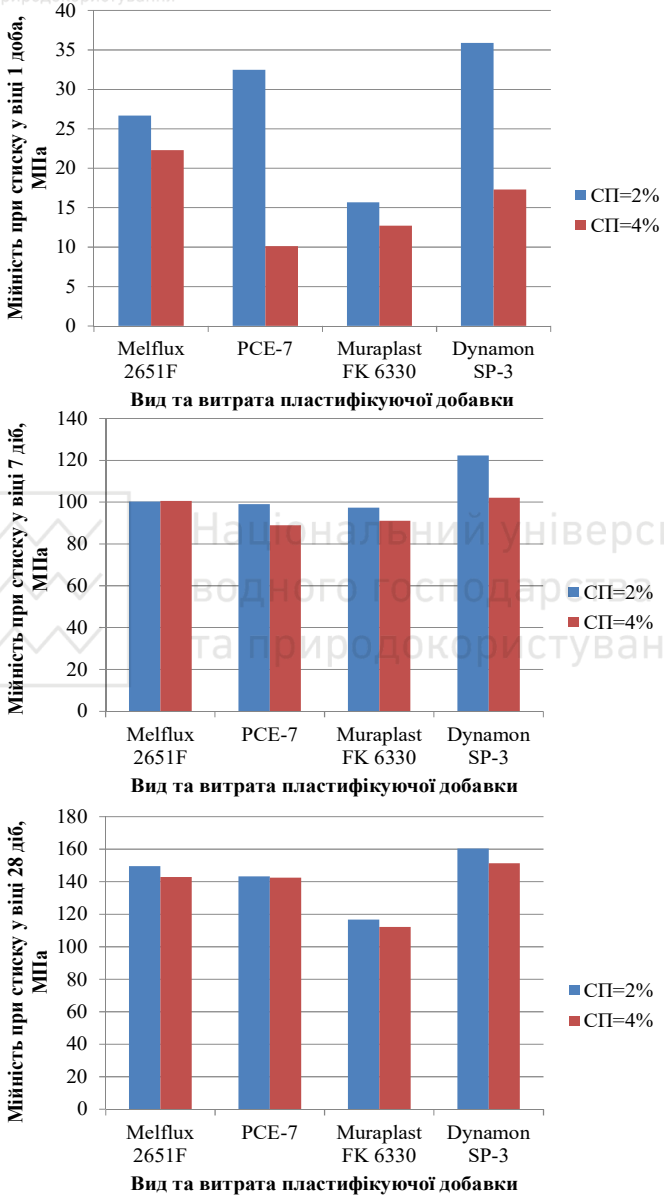


Рис. 1.8. Кінетика набору міцності РПБ з різними видами суперпластифікаторів

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Національний університет
водного господарства
та природокористування



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Рис. 1.9. Вплив суперпластифікаторів на міцність РПБ у різному віці твердіння

Національний університет
водного господарства
та природокористування

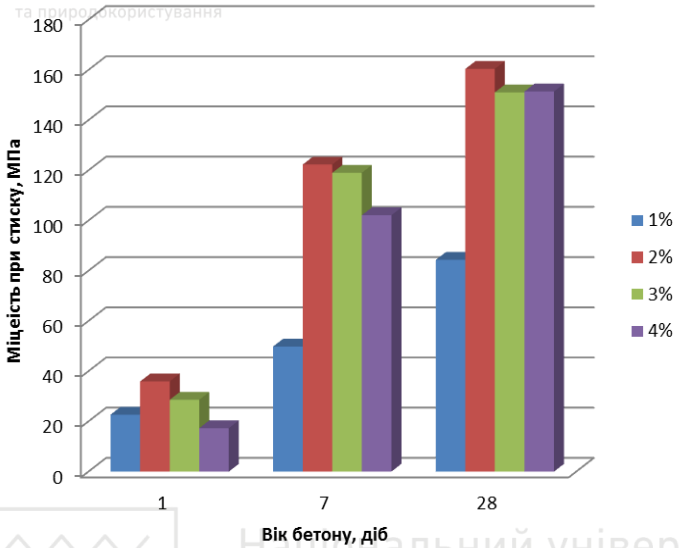


Рис. 1.10. Вплив кількості суперпластифікатора Dynamon SP-3 на міцність РПБ у різному віці

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Система, що вміщує цемент, воду і кремнезем має тенденцію до коагуляції. Суміш стає менш рухомою і дрібні частинки можуть легко флокулюватися по усьому об'єму цементному тіста, у якому залишаються пори і тому знижується міцність при стиск. При достатній кількості суперпластифікатора має місце значне підвищення міцності на стиск за рахунок диспергуючого ефекту СП у цементуючій матриці в суміші РПБ.

Надлишковий вміст добавки мав незначний вплив на реологію суміші, а також на максимальну міцність РПБ при стиску (у 28 та 90 діб). Хоча за результатами, показаними у роботі [17], при збільшенні вмісту суперпластифікатора спостерігається більше пластинчастих кристалів гідроксиду кальцію, однак вони не сприяють підвищенню міцності. Одним з недоліків надмірного використання СП є те, що він гальмує швидкість початкового твердіння. При дозуванні СП понад 3% зазвичай потрібно більше 36 годин, щоб отримати значну

Національний університет
водного господарства
та природокористування

міцність [1]. Зазначається, що передозування суперпластифікатора може призвести до проблем з хімічною несумісністю і надмірного сповільнення часу твердіння.

Таким чином, найбільш ефективними для РПБ із досліджених можна вважати суперпластифікатори Mapei Dynamon SP-3 та Melflux 2651F. Дані суперпластифікатори були вибрані для подальших більш детальних досліджень.

1.5. Вплив мінеральних добавок на міцність реакційно-порошкових бетонів

Метою роботи на даному етапі досліджень було встановлення можливості часткової чи повної заміни мікрокремнезему, як найбільш важкодоступного компоненту порошкових бетонів, більш поширеними мінеральними добавками.

В якості мінеральних добавок при проведенні експериментальних досліджень було використано мелений кварцовий пісок (МКП) з питомою поверхнею $S_п$=3786 см^2/г, гранітний аспіраційний пил (АГП) ($S_п$=2367 см^2/г), доменний гранульований шлак (ДГШ) ($S_п$=2725 см^2/г), зола виносу Бурштинської ТЕС (ЗВ) ($S_п$=2527 см^2/г), тонкомелений кремнезем (МТК) ($S_п$=21094 см^2/г). Для порівняння був також отриманий реакційно-порошковий бетон на мікрокремне-земі SikaFume-HR/TU (МК Sika) ($S_п$=23158 см^2/г). Порівняння усіх досліджених складів здійснювалось з порошковим бетоном, що не містить жодних мінеральних наповнювачів ні інертних, ні активних.

Під час експерименту визначалась водопотреба бетонної суміші до досягнення рухомості текучої суміші. Рухомість контролювалась шляхом вимірювання розпливу за віскозиметром Суттарда (25…30 см). З бетонної суміші виготовлялись зразки-куби 10×10×10 см та балки 4×4×16 см. Склади бетону наведені у табл. 1.6. В усіх точках експерименту було використано поліакрилатний суперпластифікатор Mapei Dynamon SR3. Визначали міцність при стиску та при згині у віці 1, 7, 28 діб твердіння у нормальних умовах та їх співвідношення.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Також для вибору ефективних складів реакційно-порошкових бетонів було розраховано показники витрат портландцементу на одиницю міцності КПБ (Ц/$f_{см}$). Результати експерименту наведені у табл. 1.6 та на рис 1.11…1.13.

Як видно з отриманих результатів, РПБ за заданим складом (табл. 1.7), виготовлений з високо текучих сумішей при максималь-ному вмісті мікрокремненему SikaFume-HR/TU 360 кг/м^3 на 28-му добу нормального твердіння досягає міцності при стиску 162,4 МПа, що узгоджується з відомими даними [4,8]. Часткова чи повна заміна мікрокремнезему даної марки іншими досліджуваними добавками дає можливість отримати бетон зі значеннями міцності, що знаходяться у діапазоні 104…160 МПа.

Міцність при згині для усіх досліджених серіях зразків знаходилась у межах від 18,3 до 32,2 МПа. Звертають на себе увагу досить високі значення співвідношення міцності РПБ при стиску до міцності при згині ($f_{cm}/f_{c.tf}$) – 4,0…5,0. Як відомо [20], даний показник характеризує стійкість бетону до утворення тріщин і його деформативність. Для звичайних бетонів співвідношення $f_{cm}/f_{c.tf}$ зазвичай знаходиться у межах 7…8, для дрібнозернистих – дещо нижче 5…6. Підвищена тріщиностійкість і деформативність РПБ є визначальною властивістю, котра дозволяє рекомендувати бетони такого типу для конструкцій, що працюють в умовах підвищених динамічних і ударних навантажень, характерних для захисних та фортифікаційних споруд.

Усі досліджені види мінеральних добавок впливають на міцність РПБ. Бетон, що містив лише інертні тонкомелені добавки (мелений пісок та аспіраційний гранітний пил) характеризувався максимальною міцністю при стиску 117 МПа.

Добавка аспіраційного гранітного пилу у більшій мірі знижує рухомість бетонної суміші ніж мелений пісок, ймовірно через присутність у його складі деякої кількості глини. Міцність при стиску у даному випадку знижується до 104…107 МПа.

Порівняно з інертними добавками зола-виносу та мелений гранульований шлак відрізняються значно більшим впливом на міцність, що помітно проявляється у пізні терміни твердіння.

Таблиця 1.6

Вплив різних видів мінеральних добавок на міцність реакційно-порошкових бетонів при стиску і при згині

№	Цемент кг/м^3	Пісок фракції 0,16…1,25 мм, кг/м^3	Мінеральна добавка, кг/м^3	Витрата води, л/м^3	В/Ц	Роз плив, см	Міцність бетону у віці діб					
							$f_{c.tf}^{1}$, МПа	f_{cm}^{1}, МПа	$f_{c.tf}^{7}$, МПа	f_{cm}^{7}, МПа	$f_{c.tf}^{28}$, МПа	f_{cm}^{28}, МПа
Мелений кварцовий пісок (МКП) ($S_п$=3786 см^2/г)												
1	1080	1200	120	240	0,22	30	7,57	49,8	22,34	71,0	26,8	117,6
2	840	1200	360	240	0,29	30	8,72	41,8	18,60	74,5	22,3	111,5
Аспіраційний гранітний пил (АГП) ($S_п$=2367 см^2/г)												
3	1080	1200	120	252	0,23	10	8,81	46,1	20,65	75,3	24,8	107,6
4	840	1200	360	240	0,29	25	8,19	35,8	21,27	71,8	25,5	104,4
Доменний гранульований шлак (ДГШ) ($S_п$=2725 см^2/г)												
5	1080	1200	120	240	0,22	15	6,19	36,1	20,83	82,4	24,9	113,8
6	840	1200	360	240	0,29	25	5,83	23,3	15,66	80,1	18,8	118,0
Зола виносу ТЕС (ЗВ) ($S_п$=2527 см^2/г)												
7	1080	1200	120	240	0,22	30	6,46	31,5	19,22	70,3	23,1	100,9
8	840	1200	360	240	0,29	30	4,76	22,8	15,22	68,5	18,3	114,5
	700		300	330	0,33							82,1
Тонкомелений кремнезем (ТК) ($S_п$=21094 см^2/г)												
9	1080	1200	120	240	0,22	30	7,65	26,9	12,46	76,5	19,9	110,3
10	840	1200	360	240	0,29	15	7,12	31,9	12,46	81,0	21,8	112,9
Мікрокремнезем SikaFume-HR/TU (МК Sika) ($S_п$=23158 см^2/г)												
11	1080	1200	120	240	0,22	30	10,1	47	25,6	95	29,7	143
12	840	1200	360	240	0,29	12	12,7	43,3	28,2	125,5	32,2	162,4
	700		300	330	0,33							121,1
Метакаолін ($S_п$=10 125 см^2/г)												
13	1080	1200	120	240	0,22	30	9,8	48,1	22,7	103,1	26,6	133,4
14	840	1200	360	270	0,33	10	7,8	27,2	17,2	78,5	20,1	102,4

Національний університет водного господарства та природокористування

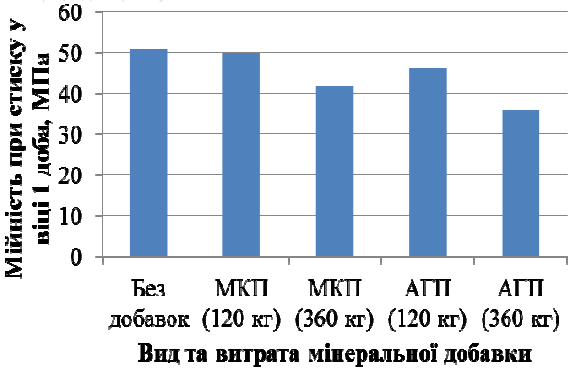
Таблиця 1.7

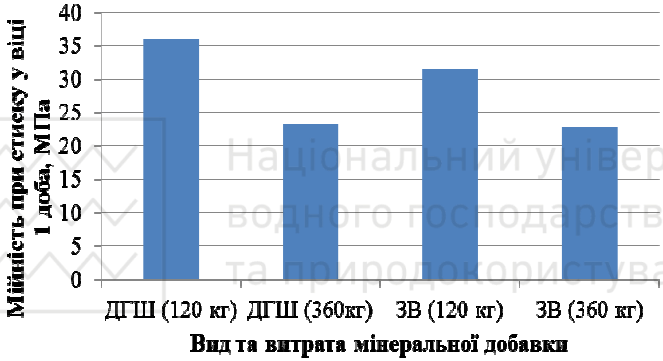
Вплив різних видів мінеральних добавок на критерії ефективності міцності

№	Цемент кг/м^3	Пісок фракції 0,16…1,25 мм, кг/м^3	Мінеральна добавка, кг/м^3	Витрата води, л/м^3	В/Ц	Роз плив, см	Міцність бетону у віці діб					
							f_{cm}^1/ $f_{c.tf}^1$	f_{cm}^7/ $f_{c.tf}^7$	f_{cm}^{28}/ $f_{c.tf}^{28}$	Ц/ f_{cm}^1, кг/МПа	Ц/ f_{cm}^7, кг/МПа	Ц/ f_{cm}^{28}, кг/МПа
Мелений кварцовий пісок (МКП) ($S_п$=3786 см^2/г)												
1	1080	1200	120	240	0,22	30	6,6	3,2	4,4	19,3	13,5	8,2
2	840	1200	360	240	0,29	30	4,8	4,0	5,0	17,9	10,0	6,7
Аспіраційний гранітний пил (АГП) ($S_п$=2367 см^2/г)												
3	1080	1200	120	252	0,23	10	5,2	3,6	4,3	20,8	12,8	8,9
4	840	1200	360	240	0,29	25	4,4	3,4	4,1	20,9	10,4	7,2
Доменний гранульований шлак (ДГШ) ($S_п$=2725 см^2/г)												
5	1080	1200	120	240	0,22	15	5,6	4,0	4,6	20,8	11,7	8,4
6	840	1200	360	240	0,29	30	4,3	5,1	6,3	22,5	9,3	6,3
Зола виносу ТЕС (ЗВ) ($S_п$=2527 см^2/г)												
7	1080	1200	120	240	0,22	30	4,9	3,7	4,4	23,2	13,7	9,5
8	840	1200	360	240	0,29	30	4,8	4,5	6,3	22,8	10,9	6,5
Тонкомелений кремнезем (ТК) ($S_п$=21094 см^2/г)												
9	1080	1200	120	240	0,22	30	3,5	6,1	5,6	35,8	12,6	8,7
10	840	1200	360	240	0,29	15	4,5	6,5	5,2	23,5	9,2	6,6
Мікрокремнезем SikaFume-HR/TU (МК Sika) ($S_п$=23158 см^2/г)												
11	1080	1200	120	240	0,22	30	2,7	3,7	4,8	40,0	11,4	7,6
12	840	1200	360	240	0,29	12	2,6	4,5	5,0	25,2	6,7	5,2
Метакаолін ($S_п$=10 125 см^2/г)												
13	1080	1200	120	240	0,22	30	4,9	4,5	5,0	22,5	10,5	8,1
14	840	1200	360	270	0,33	10	3,5	4,6	5,1	30,9	10,7	8,2

Національний університет водного господарства та природокористування

Національний університет
водного господарства
та природокористування





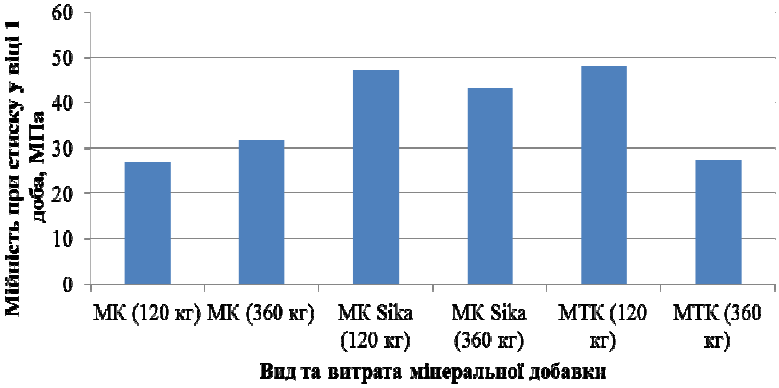


Рис. 1.11. Вплив тонкомелених мінеральних добавок на міцність РПБ у віці 1 доба

Національний університет
водного господарства
та природокористування

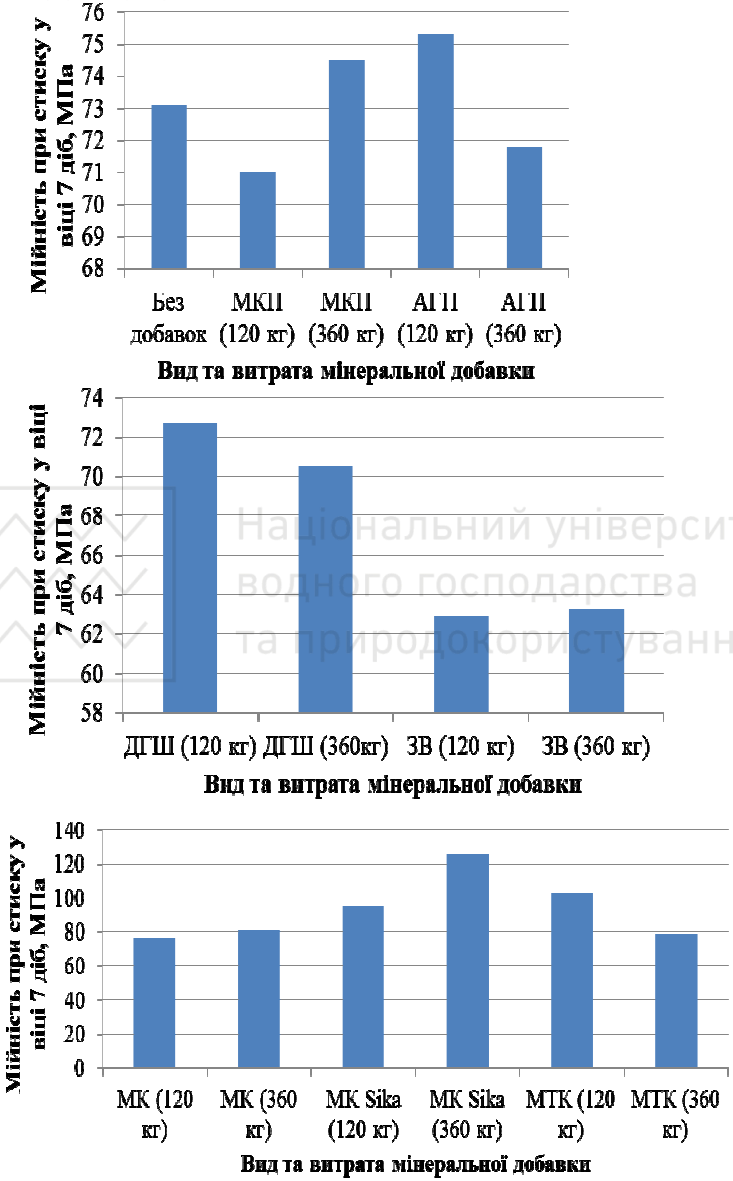
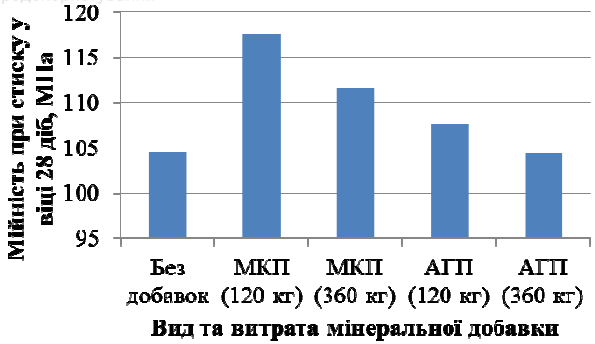


Рис. 1.12. Вплив тонкомелених мінеральних добавок на міцність РПБ у віці 7 діб

Національний університет
водного господарства
та природокористування



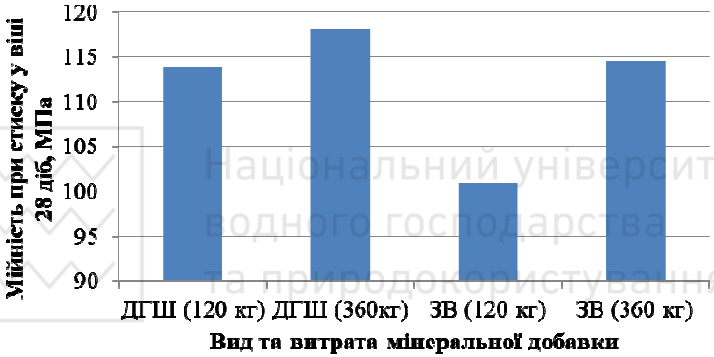


Рис. 1.13. Вплив тонкомелених мінеральних добавок на міцність РПБ у віці 28 діб

Так на 28 добу міцність при стиску становила 118 МПа – для шлаку і 114,5 МПа – для золи-виносу. На відміну від інертних добавок, де збільшення їх вмісту викликало

Національний університет
водного господарства
та природокористування

погіршення текучості та зниження міцності, у випадку золи і шлаку максимальна міцність досягалась при збільшенні вмісту добавок до 360 кг/м^3, причому у більш пізньому віці. У цементному камені РПБ внаслідок високих витрат цементу виділяється значна кількість гідрооксиду кальцію, з яким мінеральні добавки такі як зола чи шлак активно взаємодіють утворюючи нерозчинні сполуки. Зола-виносу внаслідок своєрідної форми зерен [19] проявляє деяку пластифікуючу дію, що дозволяє зберегти низькі значення В/Ц та щільну структуру цементного каменю навіть при високих витратах. Шлак у тих же умовах викликає зниження рухомості суміші, але позитивний вплив його на міцність більш значний.

Максимальне підвищення міцності було досягнуто за рахунок використання високоактивних добавок мікрокремнезему та метакаоліну. У найбільшій мірі проявив себе мікрокремнезем SikaFume-HR/TU (міцність на стиск при витраті 360 кг/м^3 – 162,4 МПа), дещо меншу ефективність з позиції міцності показала добавка метакаоліну (133,4 МПа). Тонкомелений кремнезем українського виробництва (м. Дніпро), котрий виробники позиціонують саме як аналог мікрокремнезему мав міцноість на рівні меленого піску.

Слід відмітити, що максимальна ефективність добавки метакаоліну спостерігається при витраті близько 10% від маси цементу, такий результат підтверджує дані отримані нами раніше, при дослідженні високоміцних бетонів [21]. Подальше підвищення кількості метакаоліну призводить до збільшення водопотреби бетонної суміші, внаслідок збільшення її в’язкості і міцність бетону знижується (рис. 1.14). Максимальною швидкістю твердіння відрізнялись серії, що містили мікрокремнезем (витрата 360 кг/м^3) та метакаолін (витрата 120 кг/м^3) (рис. 1.14). Найбільш повільно тверділи композиції, із золою-виносу та шлаком. Скоріше за все для даних композицій ефективним буде застосування теплової обробки. Характер впливу різних видів мінеральних добавок на міцність РПБ при згині майже такий як на міцність при стиску. Максимальну $f_{c.tf}$ мають композити, що містять мікрокремнезем (29…32 МПа), дещо нижчу (26…27 МПа) з метакаоліном та меленим піском.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

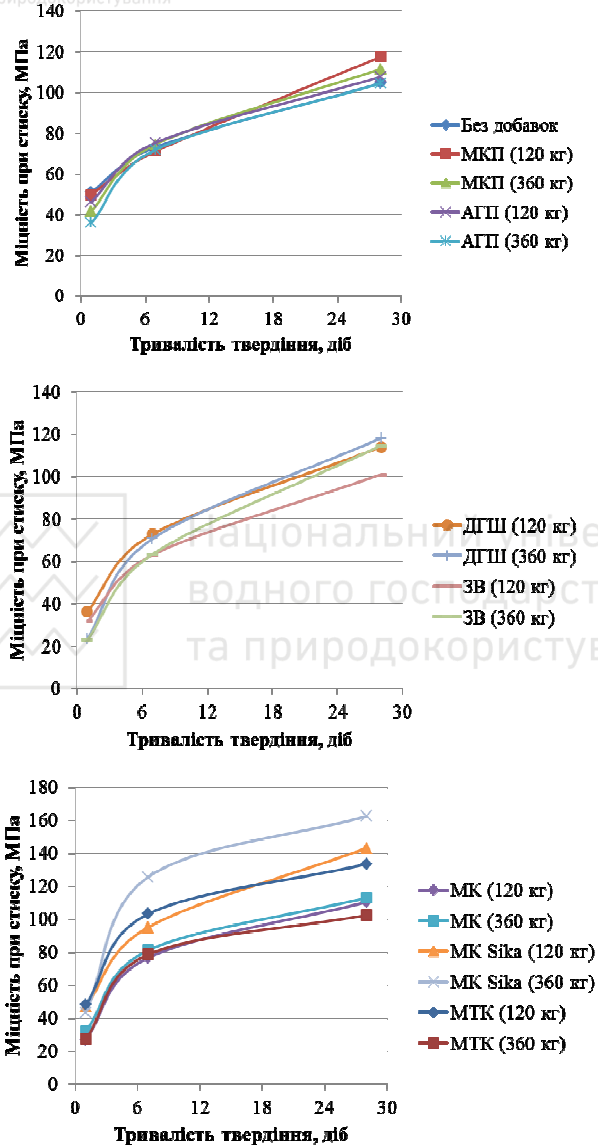


Рис. 1.14. Кінетика наростання міцності РПБ з різними тонкомеленими добавками

Національний університет
водного господарства
та природокористування

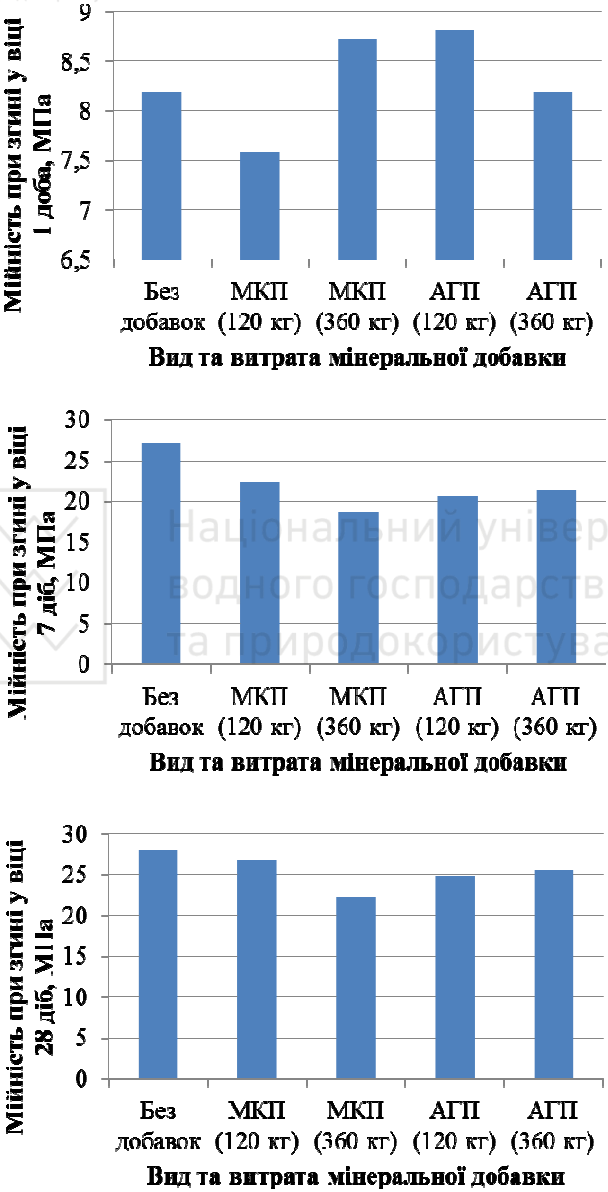


Рис. 1.15. Вплив мінеральних добавок на міцність РПБ при згині

Національний університет
водного господарства
та природокористування

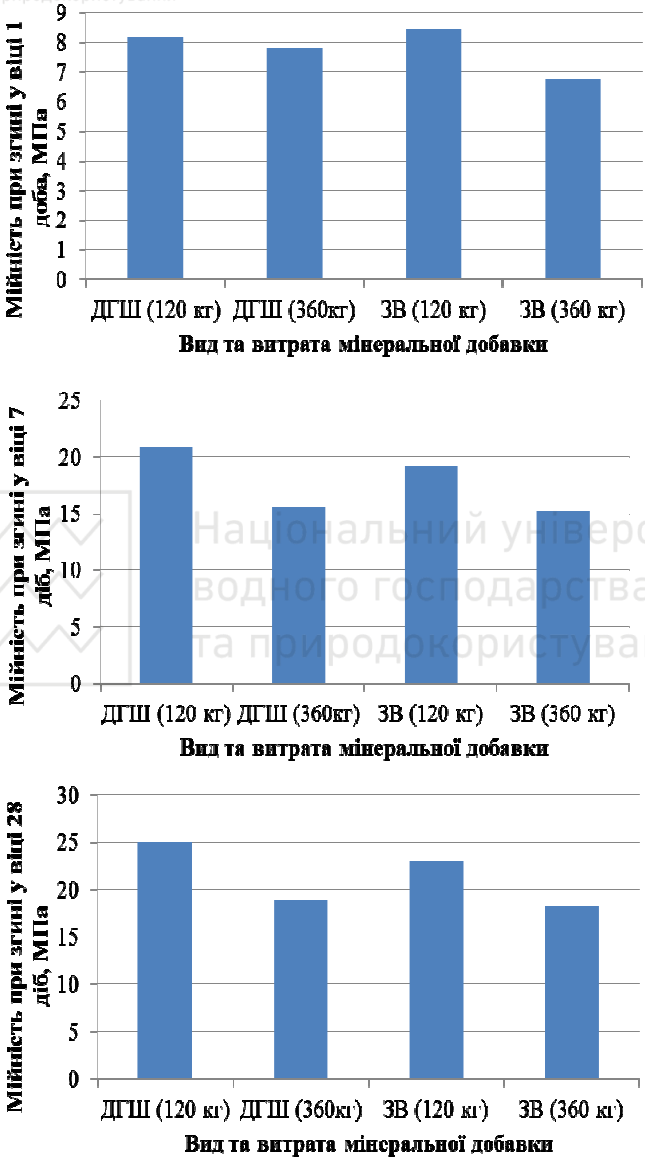
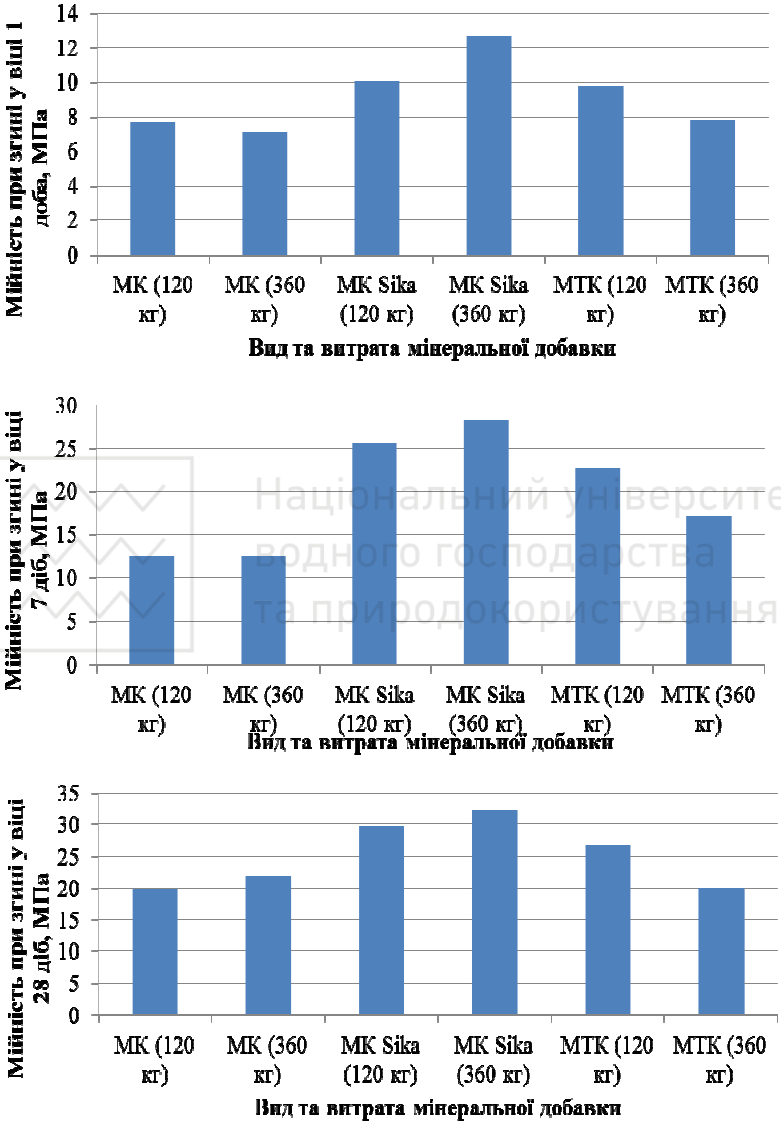


Рис. 1.16. Вплив золи-виносу та доменного шлаку на міцність РПБ при згині

Національний університет
водного господарства
та природокористування



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Рис. 1.17. Вплив активних мінеральних добавок на міцність РПБ при згині

Національний університет
водного господарства
та природокористування

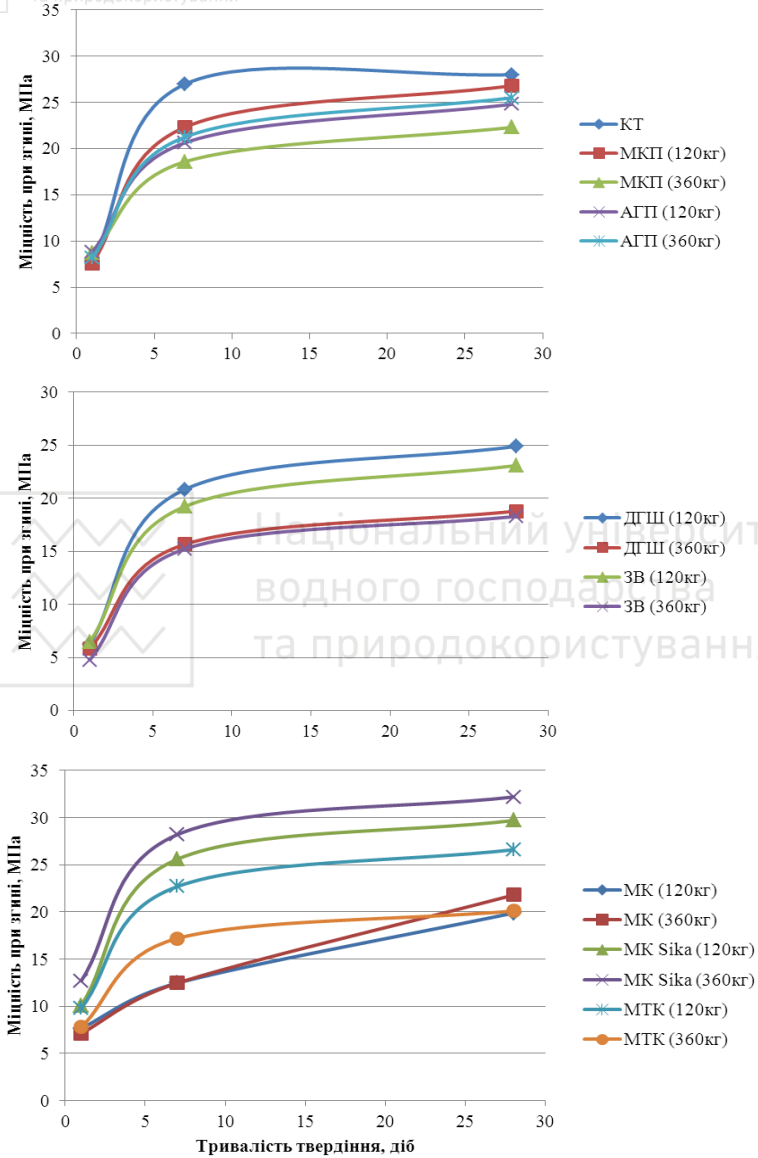


Рис. 1.18. Кінетика набору міцності РПБ з різними видами активних мінеральних добавок

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Найбільш ефективними складами з позиції виходу міцності з одного кілограми цементу $Ц_f$ виявились композиції, що містять підвищену кількість мікрокремнезему, золи-виносу, меленого шлаку та меленого піску (табл. 1.8).

Враховуючи орієнтовну вартість, використання таких добавок як зола-виносу, мелений шлак та мелений пісок найбільш виправдане з економічної точки зору.

З огляду про встановлену ефективність для РПБ, що не містить мікрокремнезем, мінеральних добавок різної активності як інертних, так і активних, проведено серію дослідів на встановлення впливу комплексних добавок на міцнісні властивості такого бетону.

При виконанні даної серії досліджень склад реакційно-здатного порошкового бетону не змінювався та був прийнятий наступним: витрата цементу – 840 кг/м^3, витрата мінеральної добавки – 360 кг/м^3, витрата піску оптимізованого складу фракції 0,16…1,25 мм – 1200 кг/м^3, витрата СП поліакрилатного типу Dynamon SP-3 – 2% від маси в'яжучого. Витрати води визначалися із умови забезпеченості заданого розпливу 25…30 см по віскозиметру Суттарда. В якості мінеральних добавок було використано мелений кварцовий пісок (МКП), доменний гранульований шлак (ДГШ) та зола-виносу ТЕС (ЗВ). Додатково до складу бетону вводились добавки метакаоліну та цеоліту в кількості 5, 10 та 15% від маси цементу. Отримані результати (табл. 1.7, 1.8) вказують на те, що найбільший вплив на міцність РПБ, що містять золу-виносу або доменний гранульований шлак, здійснює додаткове введення добавки метакаоліну – міцність бетону при стиску підвищується до 122…126 МПа (рис. 1.19–1.21). При цьому збільшення вмісту метакаоліну більше 10% від маси цементу є неефективним внаслідок суттєвого підвищення в'язкості сумішей і збільшення водопотреби. Найбільш ефективною добавкою в комплексі з метакаоліном можна вважати золу-виносу, міцність якої виявилась максимальною. Причиною у даному випадку можна вважати відомий [19] позитивний вплив золи на рухомість золовмісних бетонних сумішей, що деякою мірою компенсує підвищення в'язкості, характерне при введенні метакаоліну [22]

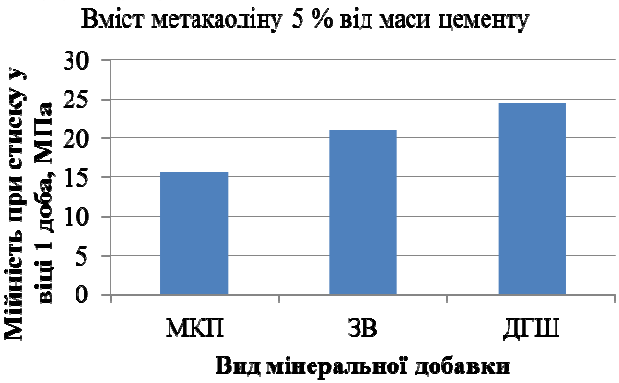
Таблиця 1.8

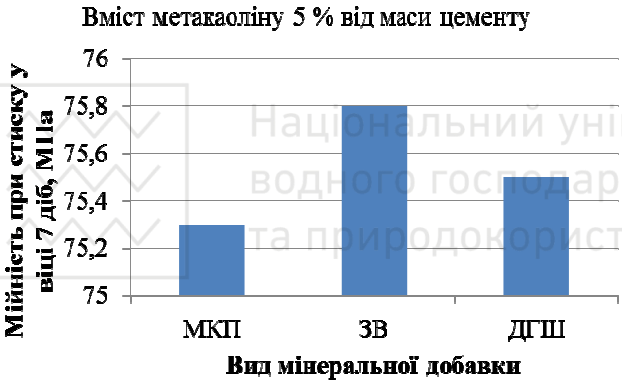
Дослідження сумісного впливу метакаоліну та інших мінеральних добавок на міцнісні характеристики реакційно-здатного порошкового бетону

№	Вид мінеральної добавки, кг/м^3	В/Ц	Роз-плив, см	Міцність бетону у віці діб					
				$f_{c.tf}^{1}$, МПа	f_{cm}^{1}, МПа	$f_{c.tf}^{7}$, МПа	f_{cm}^{7}, МПа	$f_{c.tf}^{28}$, МПа	f_{cm}^{28}, МПа
Вміст метакаоліну 5% від маси цементу									
1	Мелений кварцовий пісок (МКП)	0,29	30	7,12	15,7	16,29	75,3	22,36	113,2
2	Зола виносу ТЕС (ЗВ)	0,29	30	7,21	21,0	17,09	75,8	22,77	115,6
3	Доменний гранульований шлак (ДГШ)	0,29	30	6,32	24,4	16,82	75,5	22,26	114,0
Вміст метакаоліну 10% від маси цементу									
4	Мелений кварцовий пісок (МКП)	0,29	30	7,48	22,8	18,78	79,4	23,32	122,6
5	Зола виносу ТЕС (ЗВ)	0,29	30	7,65	29,2	18,87	79,9	25,28	126,2
6	Доменний гранульований шлак (ДГШ)	0,29	30	7,57	24,7	17,53	78,9	19,76	125,0
Вміст метакаоліну 15% від маси цементу									
7	Мелений кварцовий пісок (МКП)	0,29	30	6,94	15,3	15,49	71,6	21,21	107,5
8	Зола виносу ТЕС (ЗВ)	0,29	30	7,12	20,1	16,91	73,1	21,81	111,0
9	Доменний гранульований шлак (ДГШ)	0,29	30	6,68	19,1	16,02	72,2	20,90	107,8

Національний університет водного господарства та природокористування

Національний університет
водного господарства
та природокористування





Національний університет
водного господарства
та природокористування

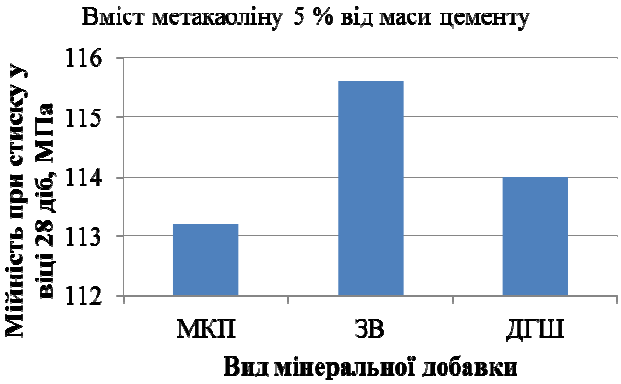
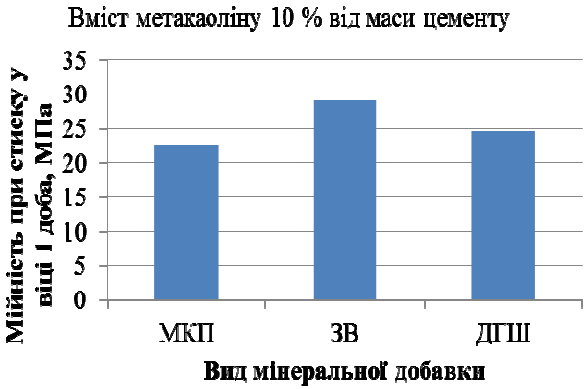
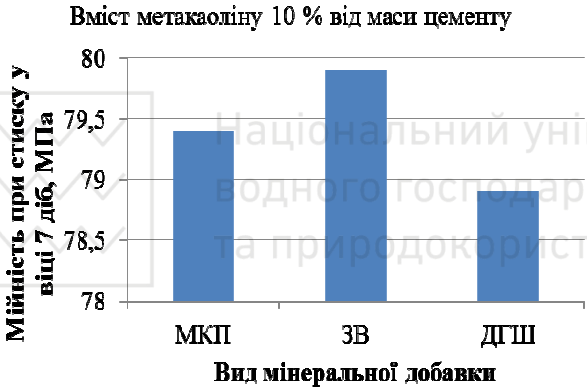


Рис. 1.19. Вплив 5% метакаоліну в комплексі з іншими мінеральними добавками на міцність при стиску РПБ

Національний університет
водного господарства
та природокористування





Національний університет
водного господарства
та природокористування

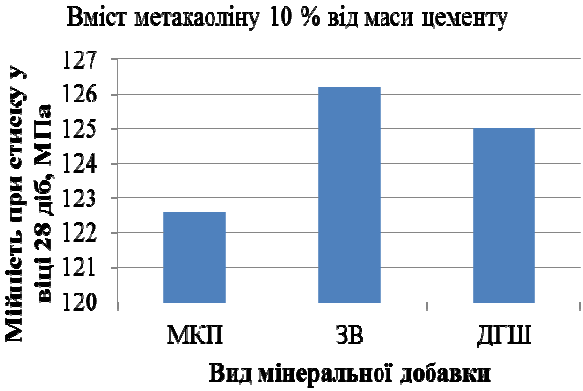
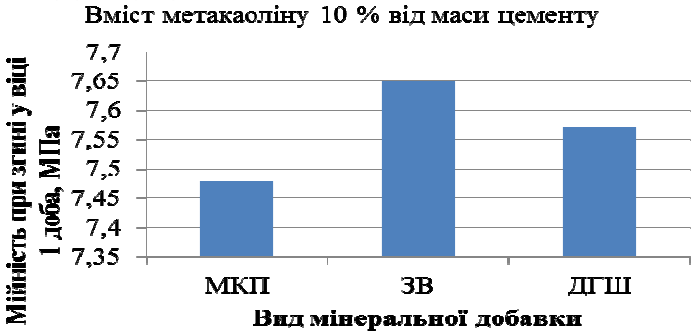


Рис. 1.20. Вплив 10% метакаоліну в комплексі з іншими мінеральними добавками на міцність при стиску РПБ

Національний університет
водного господарства
та природокористування



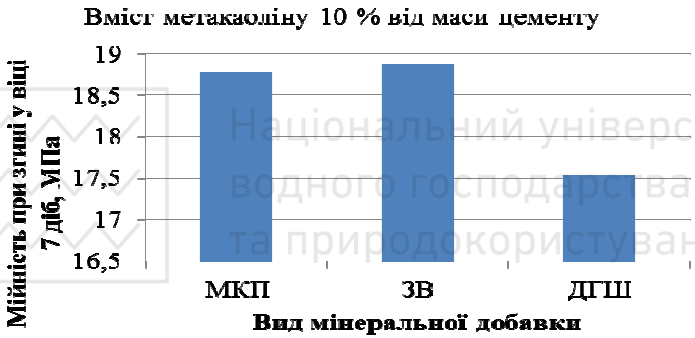


Рис. 1.21. Вплив 10% метакаоліну в комплексі з іншими мінеральними добавками на міцність РПБ при згині

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Ефективність досліджених комплексів мінеральних добавок з позиції збільшення міцності при згині аналогічна. Максимальні значення $f_{c.tf}$ (23…25 МПа) досягнуті при поєднанні метакаоліну у кількості 10% від маси цементу з золою-виносу Бурштинської ТЕС.

Однією з речовин, що містять в своєму складі значну кількість активного кремнезему і володіють високими адсорбційними властивостями, є цеолітовий туф, родовища якого розробляються на Закарпатті. Цеоліт – природний мінерал вулканічного походження клиноптіллолітового типу класу мікропористих каркасних алюмосилікатів з розміщеними у внутрішньокристалічному просторі обмінними катіонами лужних і лужноземельних металів і молекул води. Відомо [23], що цеолітові туфи проявляють пуцоланові властивості і здатні до реакцій заміщення з гідроксидом кальцію.

Як показують отримані результати (табл. 1.9, рис. 1.22, 1.23), бетони, що містили добавку цеоліту, відрізнялись підвищеною водопотребою (від В/Ц=0,31 – при вмісті цеоліту 5% від цементу до В/Ц=0,38…0,4 – при 15%). Відповідно міцність РПБ з цеолітом приймала нижчі значення, ніж з метакаоліном та іншими мінеральними добавками. Максимальні значення міцності при стиску знаходились у межах 93…97 МПа при вмісті цеоліту не більше 5% від цементу. Одночасне введення цеолітових туфів разом з суперпластифікаторами, що в значній мірі знижують водовміст, може створювати передумови для ефективного їх застосування в високоміцних бетонах, однак у даному випадку пластифікуючого ефекту використаного суперпластифікатора недостатньо.

Таблиця 1.9

Результати визначення впливу цеоліту на міцність РПБ

№	Вид мінеральної добавки, кг/м^3	В/Ц	Роз-плив см	Міцність бетону у віці діб					
				$f_{c.tf}^{1}$, МПа	f_{cm}^{1}, МПа	$f_{c.tf}^{7}$, МПа	f_{cm}^{7}, МПа	$f_{c.tf}^{28}$, МПа	f_{cm}^{28}, МПа
Вміст цеоліту 5% від маси цементу									
1	Мелений кварцовий пісок (МКП)	0,31	25	7,30	36,1	12,10	61,6	13,88	93,7
2	Зола виносу ТЕС (ЗВ)	0,31	30	9,35	39,0	12,19	68,0	18,42	96,3
3	Доменний гранульований шлак (ДГШ)	0,31	30	8,37	36,6	12,19	66,9	17,36	94,4
Вміст цеоліту 10% від маси цементу									
4	Мелений кварцовий пісок (МКП)	0,36	30	6,68	29,5	10,77	53,9	14,33	70,5
5	Зола виносу ТЕС (ЗВ)	0,34	30	8,28	33,5	12,02	66,4	17,09	88,7
6	Доменний гранульований шлак (ДГШ)	0,35	30	7,74	31,9	11,30	65,9	16,20	89,0
Вміст цеоліту 15% від маси цементу									
7	Мелений кварцовий пісок (МКП)	0,4	30	5,87	26,3	9,70	47,7	12,82	63,5
8	Зола виносу ТЕС (ЗВ)	0,38	30	7,03	30,1	10,77	59,8	15,66	80,0
9	Доменний гранульований шлак (ДГШ)	0,39	30	6,32	28,6	10,06	57,0	14,42	76,0

Національний університет водного господарства та природокористування

Національний університет
водного господарства
та природокористування

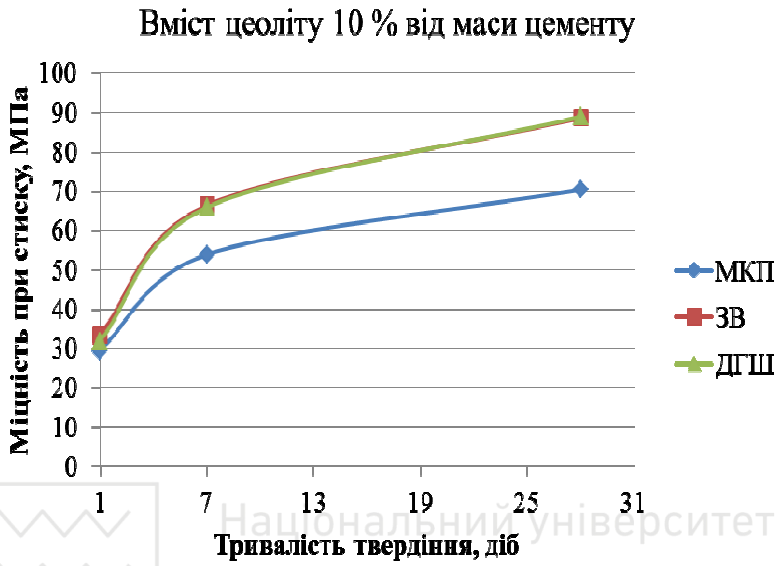


Рис. 1.22. Кінетика зміни міцності при стиску РПБ з вмістом цеоліту 10% від маси цементу

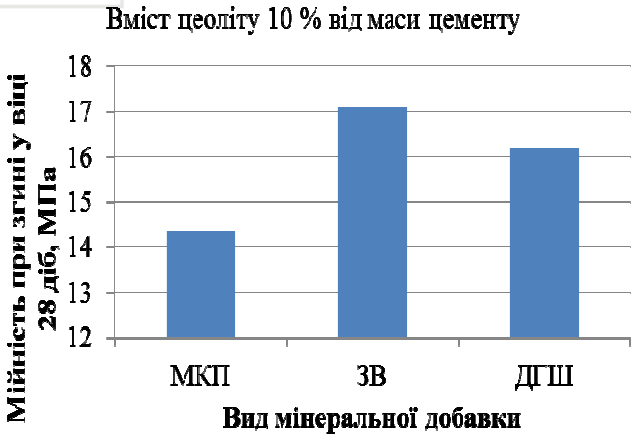


Рис. 1.23. Кінетика наростання міцності при згині РПБ, що містить 10% від маси цементу цеолітовий туф

Національний університет
водного господарства
та природокористування

1.6. Аналіз впливу комплексу технологічних факторів, що впливають на міцність реакційно-порошкових бетонів. Обґрунтування оптимальних складів

Завданням роботи на даному етапі досліджень було вивчення комплексного впливу на міцність реакційно-порошкових бетонів (РПБ), витрати цементу, вмісту активної мінеральної добавки та добавки суперпластифікатора.

Основні дослідження були виконані із застосуванням математичного планування експерименту. Для цього був реалізований трирівневий трифакторний план B_3 [16]. Умови планування та результати експериментальних досліджень наведені в табл. 1.10…1.13.

Для проведення експериментальних досліджень, було використано портландцемент ПЦ-І М500 виробництва ПАТ «Волинь-Цемент», м. Здолбунів. Кількість цементу варіювалась та складала 720, 840 та 960 кг/м^3 бетонної суміші. Додатково до складу бетону вводились активні мінеральні добавки, вміст яких змінювався в діапазоні від 20 до 40% від маси цементу. В якості активних мінеральних добавок, на даному етапі досліджень було використано золу виносу Бурштинської ТЕС та доменний гранульований шлак Криворізького металургійного комбінату.

Попередніми дослідженнями було встановлено, що введення даних добавок позитивно впливає на міцність РПБ, а їх вартість порівняно із вартістю мікрокремнезему та метакаоліну, як основних компонентів таких бетонів, є суттєво нижчою. Більш сильний вплив даних добавок на міцність реактивних порошкових бетонів, порівняно із іншими використаними добавками (мелений кварцовий пісок та гранітний аспіраційний пил) пояснюється їх підвищеною гідравлічною активністю.

Як заповнювач при виготовленні РПБ було використано кварцовий пісок Нетішинського кар'єру фракції 0,16…1,25 мм. Для максимального зменшення водопотреби і відповідного підвищення міцності РПБ, при замішуванні бетонних сумішей до їх складу вводилась добавка суперпластифікатора поліакрилатного типу Dynamon SP-3, вміст якої змінювався в

Національний університет
водного господарства
та природокористування

діапазоні 1…2% від маси в'яжучого у відповідності з прийнятими умовами планування експерименту. Витрати води в кожній точці плану визначалися із умови забезпеченості заданого розпливу 25…30 см по віскозиметру Суттарда.

Таблиця 1.10

Умови планування експерименту

№	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал
	Код	Натуральний вид	-1	0	+1	
1	X_1	Витрата цементу, кг/м^3	720	840	960	150
2	X_2	Відношення мінеральної добавки (наповнювача) до цементу (Н/Ц)	0,2	0,3	0,4	0,1
4	X_3	Витрата суперпластифікатора Dynamon SP-3, %	1	1,5	2	0,5

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Після проведення обробки і статистичного аналізу експериментальних даних отримані математичні моделі водоцементного відношення, та міцності РПБ на стиск та згин у віці 1, 7 та 28 діб у вигляді поліноміальних рівнянь регресії (табл. 1.11).

Графічні залежності, які ілюструють вплив технологічних факторів на водоцементне відношення та міцність бетону на стиск та згин у віці 1 та 28 діб нормального твердіння наведені на рис.1.24…1.28.

Дослідження показали, що до зменшення водоцементного відношення РПБ виготовлених із застосуванням, як золи виносу ТЕС так і доменного гранульованого шлаку, призводить збільшення витрати цементу та витрати пластифікуючої добавки.

Таблиця 1.11

Експериментально-статистичні моделі властивостей РПБ

РПБ виготовлені із використанням золи-виносу ТЕС		
Водопотреба бетону, л/м^3	$B = 234,7 + 23X_1 + 10,1X_2 - 10,1X_3 + 0,2X_1^2 + 1,7X_2^2 - 7,3X_3^2 + 1,5X_1X_2 - 1,5X_1X_3$	(1.4)
Водоцементне відношення	$В/Ц = 0,28 - 0,012X_1 + 0,012X_2 - 0,012X_3 + 0,002X_1^2 + 0,002X_2^2 - 0,008X_3^2$	(1.5)
Міцність на розтяг при згині у віці 1 доба, МПа	$f_{c.tf}^1 = 7,94 + 0,722X_1 - 0,19X_2 + 0,5X_3 + 0,065X_1^2 - 0,318X_2^2 - 0,205X_3^2 - 0,1X_1X_2 - 0,113X_2X_3$	(1.6)
Міцність при стиску у віці 1 доба, МПа	$f_{cm}^1 = 35,28 + 3,82X_1 - 1,3X_2 + 1,72X_3 - 2,2X_1^2 - 3,03X_2^2 - 1,23X_3^2 - 0,075X_1X_3 - 0,05X_2X_3$	(1.7)
Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб, МПа	$f_{c.tf}^7 = 14,38 + 0,455X_1 - 0,66X_2 + 0,611X_3 + 0,292X_1^2 - 1,06X_2^2 - 0,338X_3^2 + 0,01X_1X_2 - 0,015X_1X_3 + 0,045X_2X_3$	(1.8)
Міцність при стиску у віці 7 діб, МПа	$f_{cm}^7 = 64,55 + 4,38X_1 - 1,32X_2 + 2,92X_3 + 1,48X_1^2 - 2,12X_2^2 - 2X_3^2 - 3,5X_1X_3 + 0,95X_2X_3$	(1.9)
Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб, МПа	$f_{c.tf}^{28} = 23,21 + 0,55X_1 - 0,25X_2 + 0,14X_3 + 0,4X_1^2 - 0,6X_2^2 - 0,13X_3^2 + 0,4X_2X_3$	(1.10)
Міцність при стиску у віці 28 діб, МПа	$f_{cm}^{28} = 112,9 + 3,1X_1 - 0,7X_2 + 5,5X_3 - 1X_1^2 - 5,3X_2^2 - 3,5X_3^2 + 0,2X_1X_2 + 0,4X_1X_3 + 0,4X_2X_3$	(1.11)

Національний університет водного господарства та природокористування

продовження табл. 1.11

РПБ виготовлені із використанням доменного гранульованого шлаку		
Водопотреба бетону, л/м^3	$B = 246,3 + 23,3X_1 + 10,4X_2 - 10,5X_3 + 0,6X_1^2 + 2,1X_2^2 - 8,4X_3^2 + 1,5X_1X_2 - 2X_1X_3 - 0,8X_2X_3$	(1.12)
Водоцементне відношення	$В/Ц = 0,29 - 0,016X_1 + 0,013X_2 - 0,011X_3 + 0,006X_1^2 + 0,001X_2^2 - 0,009X_3^2$	(1.13)
Міцність на розтяг при згині у віці 1 доба, МПа	$f_{c.tf}^1 = 7,21 + 0,56X_1 - 0,2X_2 + 0,48X_3 + 0,095X_1^2 - 0,375X_2^2 - 0,105X_3^2 - 0,15X_1X_3 - 0,2X_2X_3$	(1.14)
Міцність при стиску у віці 1 доба, МПа	$f_{cm}^1 = 27,16 + 4,2X_1 - 3,4X_2 + 2,1X_3 + 0,181X_1^2 - 5,02X_2^2 - 0,82X_3^2 + 0,05X_1X_2 - 0,1X_1X_3 - 0,03X_2X_3$	(1.15)
Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб, МПа	$f_{c.tf}^7 = 12,33 + 0,42X_1 + 0,45X_2 + 0,51X_3 + 0,3X_1^2 - 0,91X_2^2 - 0,3X_3^2 + 0,02X_1X_2 - 0,2X_1X_3 + 0,1X_2X_3$	(1.16)
Міцність при стиску у віці 7 діб, МПа	$f_{cm}^7 = 75,37 + 5,7X_1 - 4,1X_2 + 3,1X_3 + 0,84X_1^2 - 4,96X_2^2 - 0,96X_3^2 - +0,35X_1X_3 + 0,95X_2X_3$	(1.17)
Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб, МПа	$f_{c.tf}^{28} = 23,0 + 0,651X_1 + 0,35X_2 + 0,2X_3 + 0,457X_1^2 - 0,698X_2^2 + 0,123X_3^2 + 0,3X_2X_3$	(1.18)
Міцність при стиску у віці 28 діб, МПа	$f_{cm}^{28} = 109,5 + 6,9X_1 - 5,2X_2 + 3,25X_3 - 3,5X_1^2 - 6,6X_2^2 - 2,25X_3^2 - 0,1X_1X_2 + 0,25X_1X_3 + 0,3X_2X_3$	(1.19)

Національний університет водного господарства

Національний університет
водного господарства
та природокористування

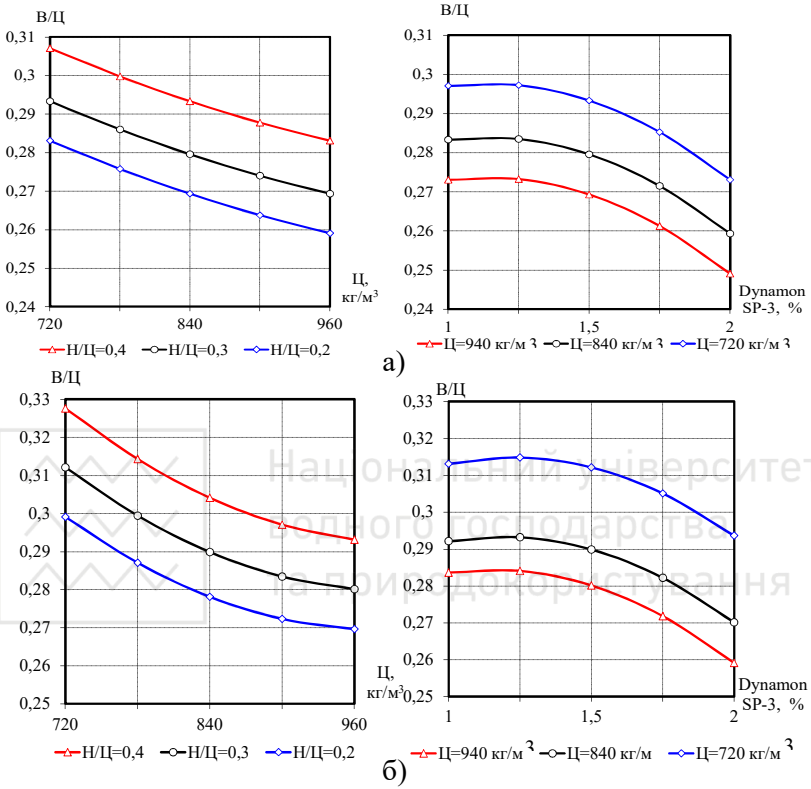


Рис. 1.24. Вплив технологічних факторів на водоцементне відношення РПБ виготовленого із застосуванням: а) золи виносу ТЕС; б) доменного гранульованого шлаку

При збільшенні вмісту даних речовин у складі РПБ зменшення В/Ц в середньому складає 8…12%. До деякого зростання В/Ц призводить збільшення вмісту наповнювача, що пов’язано із зменшенням загальної кількості цементу у в’яжучому. Також варто відмітити, що при використані золи виносу ТЕС, в якості активного мінерального наповнювача РПБ у всіх точках плану спостерігається зниження В/Ц в середньому на 5–7% у порівнянні із доменним гранульованим шлаком. Це

Національний університет
водного господарства
та природокористування

пояснюється сферичною формою частинок золи, а також їх зменшеною пористістю у порівняні із шлаком, що відповідно і призводить до додаткового пластифікуючого ефекту.

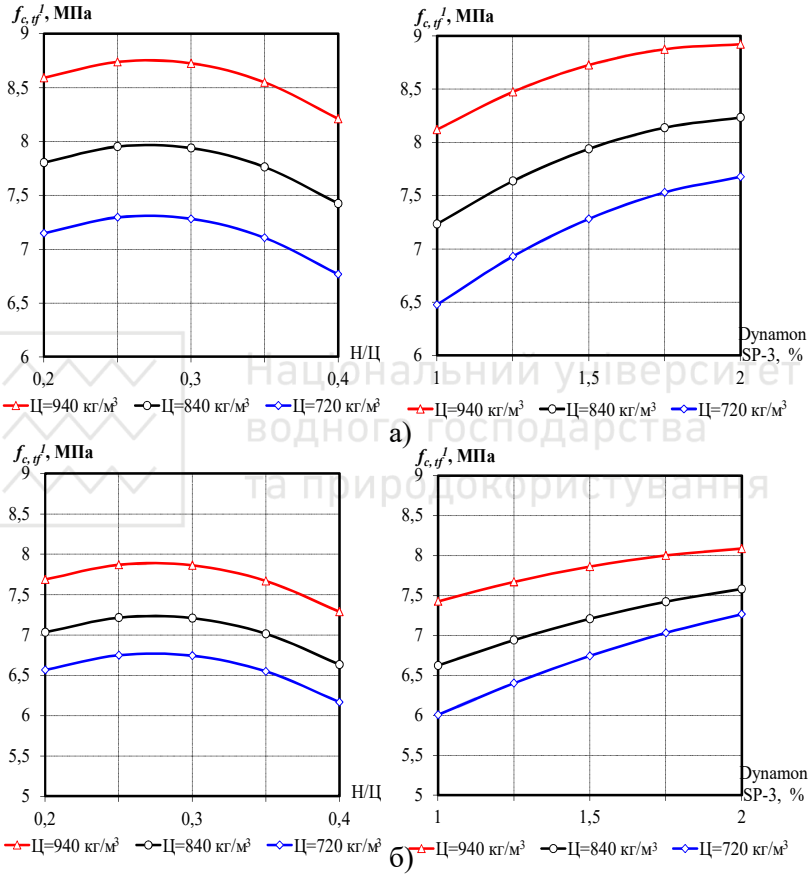


Рис. 1.25. Вплив технологічних факторів на міцність при згині РПБ у віці 1 доба: а) РПБ із застосуванням золи виносу ТЕС; б) РПБ із застосуванням доменного гранульованого шлаку

Національний університет
водного господарства
та природокористування

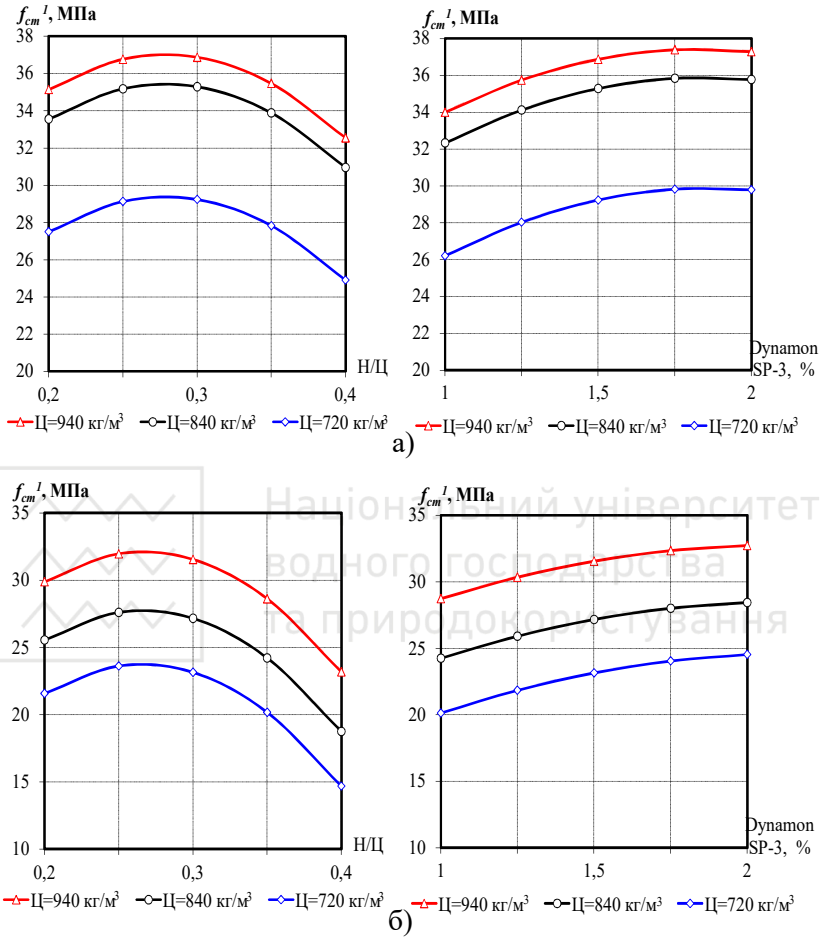


Рис. 1.26. Вплив технологічних факторів на міцність при стиску РПБ у віці 1 доба: а) РПБ із застосуванням золи виносу ТЕС; б) РПБ із застосуванням доменного гранульованого шлаку

Характер впливу варійованих факторів на міцнісні характеристики РПБ, як випливає з аналізу комплексу отриманих експериментально-статистичних моделей та

Національний університет
водного господарства
та природокористування

побудованих на їх основі графічних залежностей, суттєво не змінюється при збільшенні тривалості твердіння бетону.

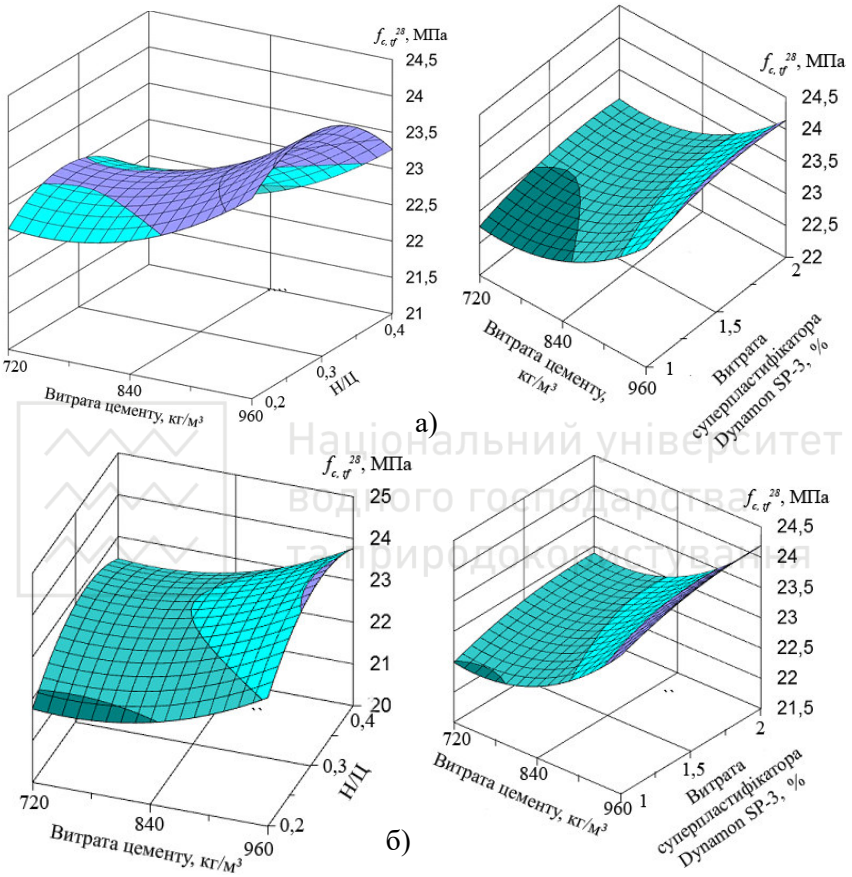


Рис. 1.27. Вплив технологічних факторів на міцність при згині РПБ у віці 28 діб: а) РПБ із застосуванням золи виносу ТЕС; б) РПБ із застосуванням доменного гранульованого шлаку

До суттєвого збільшення міцності бетону як на стиск так і на розтяг при згині призводить збільшення витрати цементу та

Національний університет
водного господарства
та природокористування

добавки суперпластифікатора Dynamon SP-3, що основним чином пов'язано із різким зниженням водоцементного відношення і відповідним збільшенням щільності зразків. Також до деякого зростання міцності призводить збільшення кількості активного мінерального наповнювача в діапазоні від 20 до 30 % від маси в'яжучого. Подальше збільшення його кількості призводить до різкого зниження міцності, яке викликане зменшенням кількості активної клінкерної складової у загальній масі в'яжучого. Вплив даного фактору на міцнісні характеристики РПБ носить екстремальний характер.

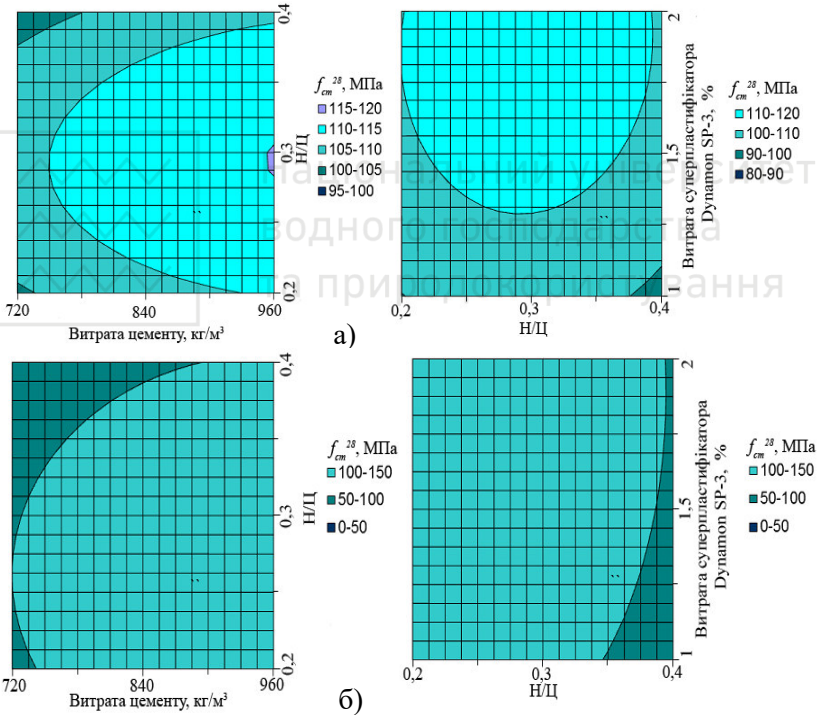


Рис. 1.28. Вплив технологічних факторів на міцність при стиску РПБ у віці 28 діб: а) РПБ із застосуванням золи виносу ТЕС; б) РПБ із застосуванням доменного гранульованого шлаку

Національний університет
водного господарства
та природокористування

В результаті аналізу комплексу отриманих експериментальних даних було встановлено, що більш ефективним активним мінеральним наповнювачем (із двох досліджуваних) для виготовлення реакційно-порошкових бетонів є зола виносу ТЕС. Внаслідок того, що основна маса золи представлена частиками сферичної форми, при введені її до складу бетону спостерігається деякий пластифікуючий ефект який призводить до зниження В/Ц і відповідного збільшення міцності. Заміна доменного гранульованого шлаку золю виносу ТЕС при однаковій кількості добавки призводить в середньому до збільшення міцності зразків на 2…5%. При цьому максимальна міцність при стиску 115,2 МПа та при згині 24,1 МПа РПБ спостерігається при наступному співвідношенні варійованих факторів: витрата цементу на максимальному рівні – 960 кг/м^3, співвідношення між кількістю наповнювача (золи виносу ТЕС) та кількістю цементу на середньому рівні – 0,3; витрата суперпластифікатора Dynamon SP-3 на максимальному рівні – 2% від маси в'яжучого.

На основі отриманих експериментально-статистичних моделей (1.4, 1.11, 1.12, 1.19) (табл. 1.11) побудовано номограми водопотреби та міцності РПБ (рис. 1.29, 1.30), виготовлених із застосуванням в якості активної мінеральної добавки золи виносу ТЕС та доменного гранульованого шлаку. Дані номограми в сукупності з комплексом отриманих моделей, можуть бути використані для проектування складів РПБ із заданою міцністю та рухомістю. При цьому методика розрахунку полягає в наступному:

1. Використовуючи номограму міцності на стиск наведену на рис. 1.29 або 1.30, залежно від виду використаної мінеральної добавки, визначаємо витрати суперпластифікатора, цементу та активної мінеральної добавки, які будуть забезпечувати задану міцність РПБ на стиск у віці 28 діб.

2. Використовуючи номограму водопотреби наведену на рис. 1.29 або 1.30, від виду використаного активного наповнювача, при попердньо визначених витраті суперпластифікатора, цементу та наповнювача, встановлюємо

Національний університет
водного господарства
та природокористування

витрату води яка буде забезпечувати отримання бетонної суміші з рухомістю 25…30 см по віскозиметру Суттарда.

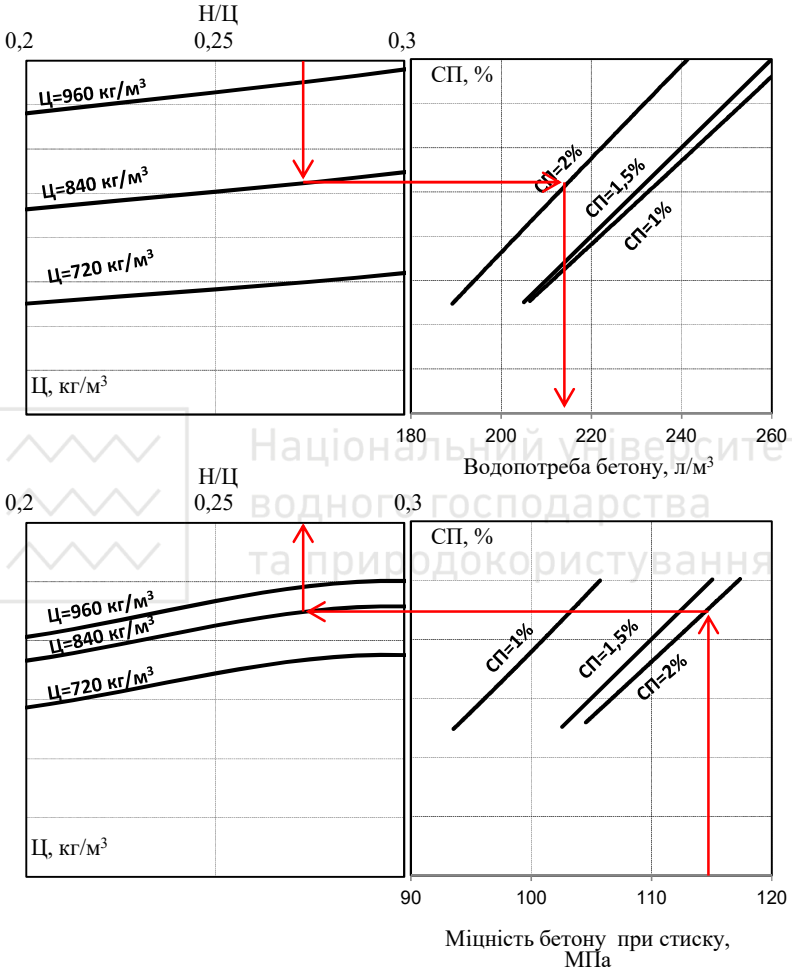


Рис. 1.29. Номограма водопотреби та міцності при стиску РПБ виготовлених із використанням золи виносу ТЕС

Національний університет
водного господарства
та природокористування

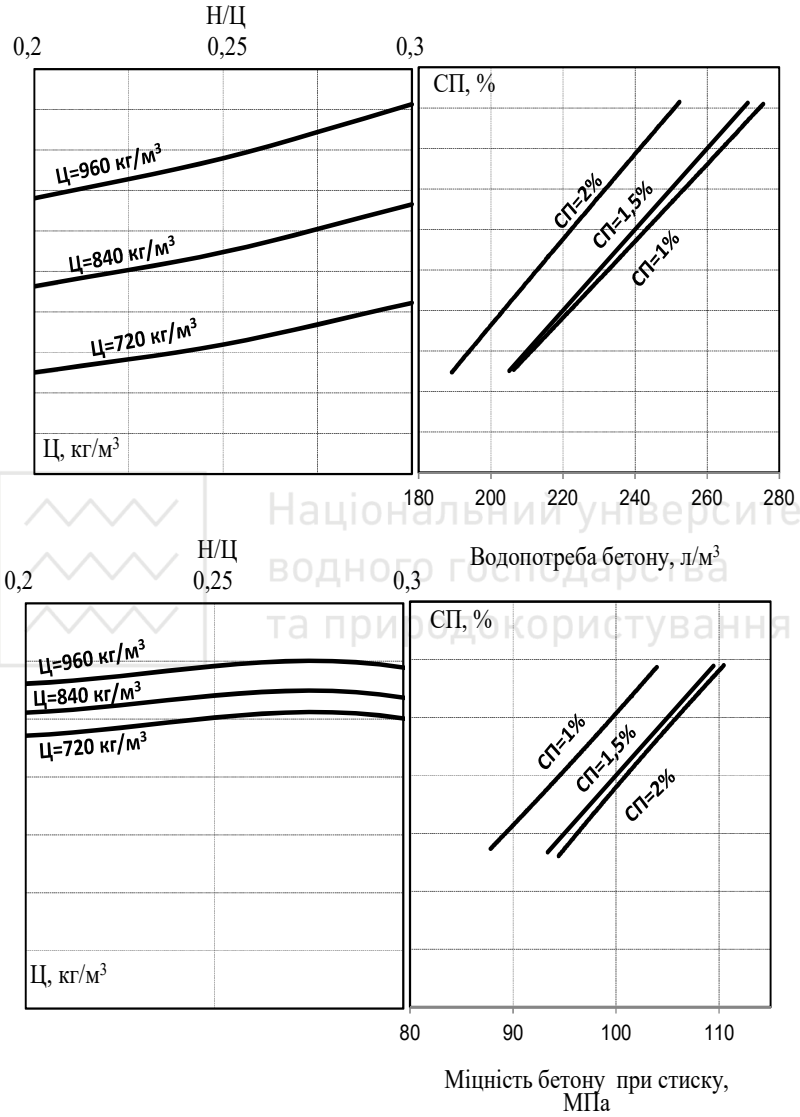


Рис. 1.30. Номограма водопотреби та міцності при стиску РПБ виготовлених із використанням доменного гранульованого шлаку

Національний університет
водного господарства
та природокористування

3. Витрату заповнювачів можна розрахувати, знаючи об'єм цементного тіста ($V_{ц.т}$) в бетонній суміші.

Об'єм цементного тіста, л/м^3:

$$V_{ц.т} = \frac{Ц}{\rho_ц} + \frac{Н}{\rho_н} + В \,. \qquad (1.20)$$

Об'єм піску, л/м^3:

$$V_п = 1000 - V_{ц.т} \,. \qquad (1.21)$$

Маса піску $П$, кг/м^3 :

$$П = \rho_п V_п \,. \qquad (1.22)$$

У наведених вище формулах $\rho_ц$, $\rho_н$, $\rho_п$ – дійсна густина відповідно цементу ($\rho_ц \approx 3{,}1$ кг/л), наповнювача та піску.

Приклад розрахунку

Розрахувати склад РПБ, виготовленого із застосуванням в якості активного мінерального наповнювача золи виносу ТЕС, з 28-добовою міцністю на стиск 115 МПа та рухомістю 25…30 см по віскозиметру Суттарда. В якості пластифікуючої добавки використовується суперпластифікатор Dynamon SP-3. Дійсна густина цементу $\rho_ц$=3,1 г/см^3, дійсна густина золи виносу ТЕС $\rho_н$=2,8 г/см^3, дійсна густина піску $\rho_п$=2,65 г/см^3.

1. Використовуючи номограму міцності при стиску наведену на рис. 1.29, графічним методом встановлюємо, що для забезпечення заданої міцності при стиску 115 МПа мінімально можлива витрата цементу складатиме – 840 кг/м^3, вміст напонювача – 27,5% від маси цементу, витрата суперпластифікатора Dynamon SP-3 – 2% від маси в'яжучого.

2. Використовуючи номограму водопотреби наведену на рис. 1.29 встановлюємо, що при такому компонетному складі бетону мінімально можлива кількість води, при якій буде забезпечена задана рухомість бетонної 25…30 см по віскозиметру Суттарда буде складати – 215 л/м^3.

3. Витрату заповнювачів розрахуємо, знаючи об'єм цементного тіста ($V_{ц.т}$) в бетонній суміші.

Об'єм цементного тіста, л/м^3:

Національний університет
водного господарства
та природокористування

$$V_{ц.т} = \frac{Ц}{\rho_ц} + \frac{Н}{\rho_н} + В = \frac{840}{3,1} + \frac{231}{2,8} + 215 = 568,5 \text{ л/м}^3.$$

Об'єм піску, л/м^3:

$$V_п = 1000 - V_{ц.т} = 1000 - 568,5 = 431,5.$$

Маса піску *П*, кг/м^3 :

$$П = \rho_п V_п = 2,65 \cdot 431,5 = 1143 \text{ кг/м}^3.$$

Отриманий за розрахунками бетон має наступний склад: цемент – 840 кг/м^3, вода – 215 л/м^3, пісок фракції 0,16…1,25 – 1143 кг/м^3. Витрата суперпластифікатора Dynamon SP-3 складає 2% від маси в'яжучого.

Таким чином дослідження показали можливість виготовлення високоміцних реактивних порошкових бетонів, в яких у якості активних мінеральних добавок використано золу виносу та доменний гранульований шлак, вартість яких є суттєво нижчою ніж вартість мікрокремнезему та метакаоліну, як основних компонентів таких бетонів.

За результатами досліджень було побудовано номограми, які, в сукупності з комплексом отриманих моделей (табл. 1.11), можуть бути використані для проектування складів РПБ з комплексом заданих властивостей.

1.7. Вплив температурних режимів твердіння на міцність реакційно-порошкових бетонів

Дослідженнями [24] встановлено, що на властивості РПБ суттєвий вплив має застосування додаткового тиску при формуванні, зміна температурних умов твердіння, а також спільне використання тиску та температури.

Показано [24], що застосування тиску має такі позитивні впливи: зменшення втягнутого повітря, видалення надлишку води і компенсування хімічної усадки. Подібні явища були відмічені і у інших роботах, де досліджували міцність при стиску, коли зразки піддавалися заданому навантаженню. Встановлено, що повітряні і водні порожнини, присутні в РПБ без додаткового тиску, при застосуванні заданого тиску суттєво знижуються. Як відомо суттєво збільшує міцність на стиск

Національний університет
водного господарства
та природокористування

бетону його формування в сталевих трубах. Такий спосіб також ефективний і для РПБ. Встановлено, що обмеження твердіння РПБ за рахунок використання сталевих труб значно підвищує його міцність на стиск, а також його поздовжню деформацію. Аналогічний результат був отриманий у роботі [10] – міцність при стиску, а також ударна в'язкість бетону значно покращилася з використанням обойми із сталевої труби.

Встановлено, що термічна обробка РПБ після формування є досить ефективною з позиції прискорення пуцоланової реакції мікрокремнезему і кварцу, суттєво змінінює мікроструктуру РПБ, а також позитивно впливає на процес видалення надлишкової води. Термічна обробка після тужавлення змінює співвідношення CaO/SiO_2 і H_2O/CaO, тим самим сприяючи утворенню тобермориту ($Ca_5Si_6O_{16}(OH)_2 \times 4H_2O$) при температурах до 200° С), і ксоноліту ($Ca_6Si_6O_{17}(OH)_2$ при температурі 250° С і вище). Присутність ксоноліту в РПБ при 250° С було підтверджено дослідженнями. Помічено, що підвищення температури прискорює процес гідратації в ранньому віці і підвищує міцність матеріалу на стиск. Однак швидкий процес гідратації призводить до швидкого наростання аутогенної усадки у ранньому віці.

Була виконана серія досліджень з метою визначення впливу теплової обробки на процес твердіння і міцність РПБ з використанням золи-виносу та доменного шлаку. При виконанні всіх експериментальних досліджень склад РПБ не змінювався та був наступним: витрата цементу – 840 кг/м^3, витрата мінеральної добавки – 360 кг/м^3, витрата піску фракції 0,16…1,25 мм – 1200 кг/м^3, витрата суперпластифікатора поліакрилатного типу Dynamon SP-3 – 2% від маси в’яжучого. Витрати води визначалися із умови забезпеченості заданого розпливу 25…30 см за віскозиметром Суттарда. В якості мінеральних добавок на даному етапі досліджень було використано мелений кварцовий пісок (МКП), доменний гранульований шлак (ДГШ) та золу виносу ТЕС (ЗВ). Додатково до складу бетону вводились добавки метакаоліну в кількості 10% від маси цементу. Теплова обробка проводилась у лабораторній пропарювальній камері за наступним режимом:

Національний університет
водного господарства
та природокористування

попереднє витримування – 2 год; підйом температури зі швидкістю 25° С/год; ізотермічна витримка – 8 год, охолодження. Після ТВО визначали міцність зразків при стиску через 2 год, у віці 7 та 28 діб (табл. 1.12, рис. 1.31).

Ефективне забезпечення вологісних умов твердіння є необхідним для забезпечення достатньої гідратації для зменшення пористості необхідного рівня, особливо для бетону такої високої міцності, яка досягається у РПБ. Поряд з пропарюванням у роботах багатьох дослідників дяля забезпечення максимальної гідратації і пуцоланової реакції у РПБ застосовується твердіння у середовищі гарячої води. Для визначення ефективності твердіння досліджуваних нами складів РПБ здійснювалось витримування серій зразків у воді при температурі 50 та 80° С.

Пропарювання РПБ при температурі 50° С спричиняє підвищення міцності при стику на 1 добу всередньому у 2,5…3 рази, на 28 добу – на 1,5…2%. Підвищення температури ізотермічного прогріву однозначно викликає підвищення міцності РПБ. Порівняно зі зразками, що тверділи у нормальних умовах, пропарювання при 80° С спричиняє підвищення міцності на 1 добу у 3,5…4 р., на 28 добу – на 4…5%. Як відомо тепловологісна обробка суттєво активізує пуцоланову активність різних мінеральних добавок. Отримані результати показують, що застосування пропарювання значно підвищує ефект підвищення міцності, що викликають добавки золи-виносу та доменного шлаку (табл. 1.13, рис. 1.32). Порівняно з цими добавками ефект меленого кварцового піску значно нижчий. У деяких роботах відмічається про можливий позитивний вплив термічної обробки на ефективність меленого кварцу як мінеральної добавки, викликає утворення гідросилікатів кальцію, однак у даних дослідженнях температура твердіння РПБ перевищувала 250° С, в нашому ж випадку при температурах 50…80° С теплова обробка сприяє лише прискоренню процесів взаємодії гідрооксиду кальцію з аморфним кремнеземом золи та шлаку. Позитивний вплив пропарювання відображається також і на міцності при згині (табл. 1.12, рис. 1.31).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

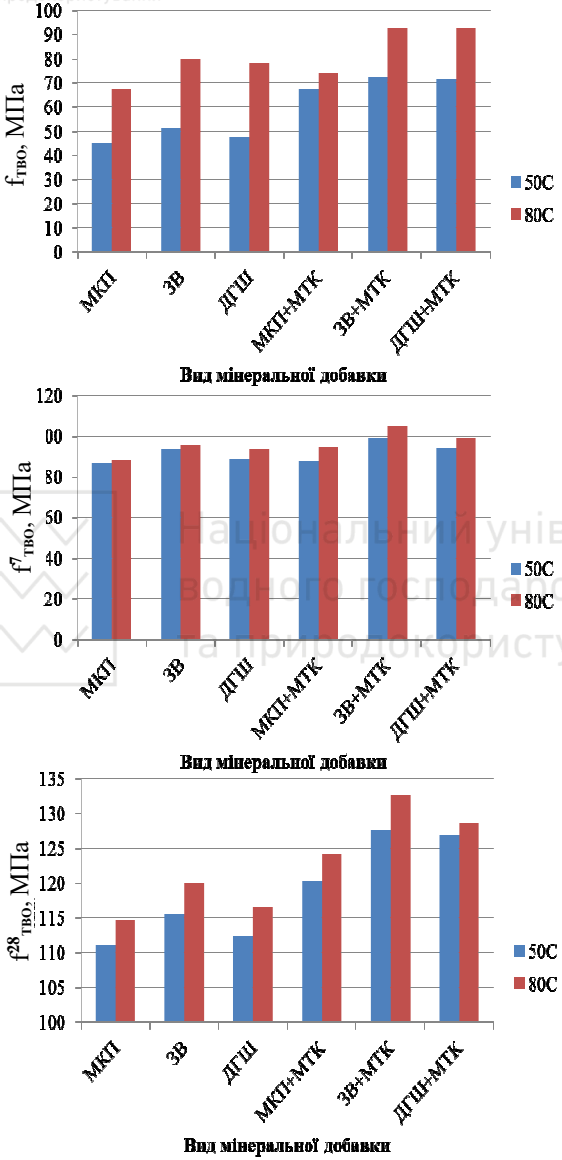


Рис. 1.31. Вплив виду мінеральних добавок та температури пропарювання на міцність РПБ

Таблиця 1.12

Вплив тепловологісної обробки пропарюванням на міцність на міцнісні характеристики РПБ

№	Вид мінеральної добавки, кг/м^3	В/Ц	Роз-плив, см	Міцність бетону у віці діб					
				$f_{c.tf}^{тво}$, МПа	$f_{cm}^{тво}$, МПа	$f_{c.tf}^{7}$, МПа	f_{cm}^{7}, МПа	$f_{c.tf}^{28}$, МПа	f_{cm}^{28}, МПа
Температура ізотермічної витримки 50˚С									
1	Мелений кварцовий пісок (МКП)	0,29	30	13,89	45,1	19,44	86,8	19,62	111,0
2	Зола виносу (ЗВ)	0,29	30	14,64	51,2	22,45	93,7	24,14	115,6
3	Доменний гранульований шлак (ДГШ)	0,29	30	14,63	47,3	21,52	89,1	22,42	112,4
4	Мелений пісок (МКП)+метакаолін (МТК	0,29	30	15,38	67,6	20,94	87,6	22,32	120,3
5	Зола виносу (ЗВ)+метакаолін (МТК)	0,29	30	17,38	72,4	24,40	99,2	26,47	127,6
6	Доменний гранульований шлак (ДГШ)+метакаолін (МТК)	0,29	30	16,71	71,4	22,37	94,4	23,74	126,8
Температура ізотермічної витримки 80˚С									
1	Мелений кварцовий пісок (МКП)	0,29	30	14,46	67,1	22,21	88,3	22,53	114,7
2	Зола виносу (ЗВ)	0,29	30	19,90	79,7	24,07	96,1	25,39	120,0
3	Доменний гранульований шлак (ДГШ)	0,29	30	19,90	78,3	23,30	93,8	24,83	116,5
4	Мелений кварцовий пісок (МКП)+метакаолін (МТК)	0,29	30	20,83	74,0	22,80	94,9	23,43	124,2
5	Зола виносу (ЗВ)+метакаолін (МТК)	0,29	30	26,15	92,6	27,23	105,3	28,48	132,6
6	Доменний гранульований шлак (ДГШ)+метакаолін (МТК)	0,29	30	24,43	92,6	24,53	99,1	26,20	128,6

Національний університет водного господарства та природокористування

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Максимальні значення міцності РПБ при випробуванні зразків отримані (табл. 1.13, рис. 1.32) при твердінні у воді з температурою 80° С. РПБ, що містив комплексну мінеральну добавку – метакаолін 10% та золу-виносу (10%) на 28 добу твердіння досягнув міцності при стиску 145 МПа, при згині – 30,8 МПа, що на 15…17% вище ніж міцність бетону такого ж складу, що твердів при нормальних умовах.

Твердіння РПБ у воді при підвищеній температурі як показують результати багатьох досліджень створює значно кращі умови для гідратації цементного каменю у присутності значної кількості активних мінеральних добавок. Так максимальні значення міцності при випробуванні серій зразків з (табл. 1.13, рис. 1.32) отримані при твердінні у воді з температурою 80° С. РПБ, що містив комплексну мінеральну добавку метакаолін 10% та золу-виносу (10%) на 28 добу твердіння досягнув міцності при стиску 145 МПа, при згині – 30,8 МПа, що на 15…17% вище ніж міцність бетону такого ж складу, що твердів при нормальних умовах.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Таблиця 1.13

Вплив тепловологісної обробки у гарячій воді на міцнісні характеристики РПБ

№	Вид мінеральної добавки, кг/м^3	В/Ц	Розп-лив, см	Міцність бетону у віці, діб					
				$f_{зг}^{ТВО}$, МПа	$f^{ТВО}$, МПа	$f_{зг}^{7}$, МПа	f^{7}, МПа	$f_{зг}^{28}$, МПа	F^{28}, МПа
Температура ізотермічної витримки 50° С									
1	Мелений кварцовий пісок (МКП)	0,29	30	14,36	46,2	20,17	89,4	20,21	114,3
2	Зола виносу (ЗВ)	0,29	30	15,44	52,2	23,48	98,4	25,17	121,7
3	Доменний гранульований шлак (ДГШ)	0,29	30	15,22	48,3	22,20	92,6	23,11	117,2
4	Мелений кварцовий пісок (МКП)+ метакаолін (МК)	0,29	30	16,06	68,9	21,73	90,2	22,88	124,4
5	Зола виносу (ЗВ)+ метакаолін (МК)	0,29	30	18,42	73,6	25,85	106,2	27,66	135,8
6	Доменний гранульований шлак (ДГШ)+ метакаолін (МК)	0,29	30	17,56	72,7	23,46	96,3	24,66	133,6
Температура ізотермічної витримки 80° С									
1	Мелений кварцовий пісок (МКП)	0,29	30	15,14	71,7	24,56	94,4	25,53	119,6
2	Зола виносу (ЗВ)	0,29	30	21,64	91,0	26,92	103,9	27,21	134,4
3	Доменний гранульований шлак (ДГШ)	0,29	30	21,15	84,6	26,43	99,7	27,08	126,9
4	Мелений кварцовий пісок (МКП)+ метакаолін (МК)	0,29	30	22,56	81,2	23,45	103,6	24,61	138,3
5	Зола виносу (ЗВ)+ метакаолін (МК)	0,29	30	28,91	103,9	29,09	115,7	30,82	145,9
6	Доменний гранульований шлак (ДГШ)+ метакаолін (МК)	0,29	30	26,27	103,0	26,75	108,8	28,17	143,9

Національний університет водного господарства та природокористування

Національний університет
водного господарства
та природокористування

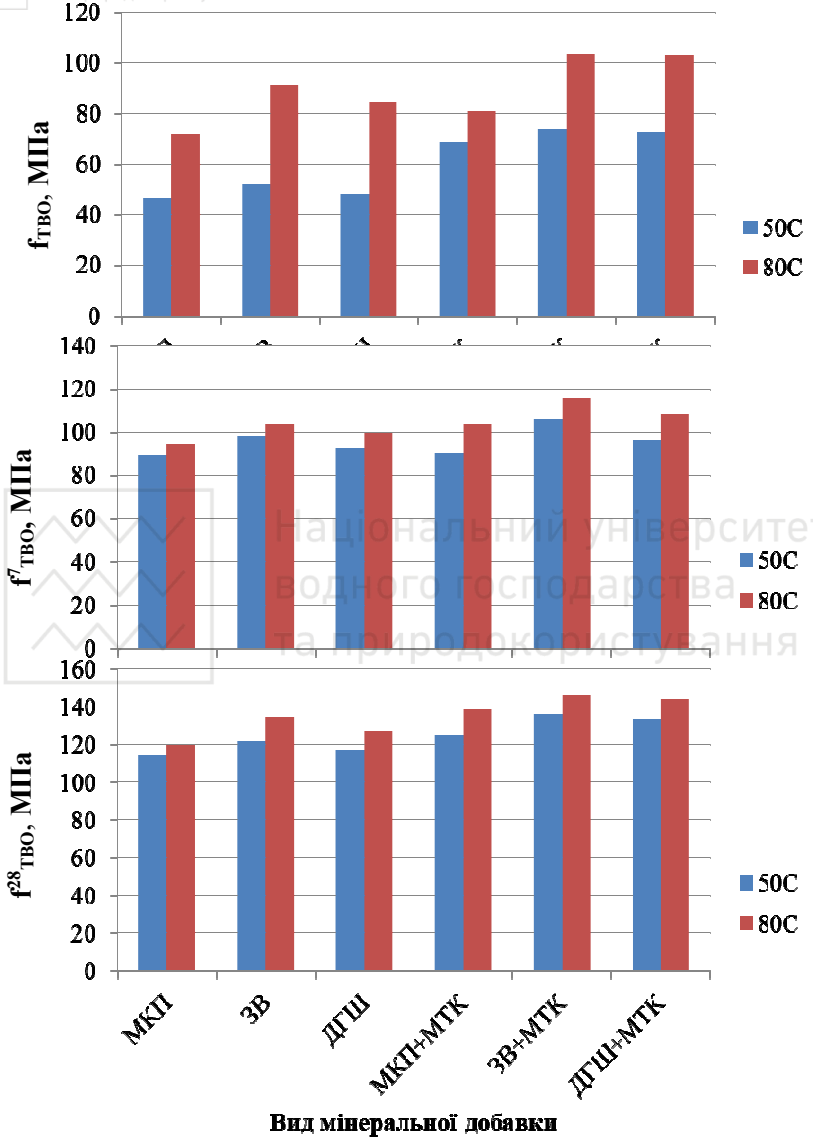


Рис. 1.32. Вплив температури витримування у воді та виду мінеральних добавок на міцність РПБ

Національний університет
водного господарства
та природокористування

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Kwan, A. H. K. Development of High Performance Concrete for Hong Kong. *Materials Science and Technology in Engineering Conference – Now, New and Next*. 2003. URL: http://www.hkpc.org/hkiemat/mastec03_notes/03.pdf (дата звернення: 11.01.2022).

2. Aitcin P. C. The durability characteristics of high performance concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*. 2003. Vol. 25, pp. 409–420.

3. Cyr M. F. and Shah S. P. Advances in concrete technology. *Advances in Building Technology*. 2002. Vol. 1, pp. 17–27.

4. Shannag M. J. High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume. *Cement & Concrete Composites*. 2000. Vol. 22, pp. 399–406.

5. Ma J. X. and Schneider H. Properties of Ultra-High-Performance Concrete. *LACER*. 2002. Vol. 7, pp. 25–32.

6. Young J. F. Macro-Defect-Free Cement: A Review. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc*. 1991. Vol. 179, pp. 101–121.

7. Dauriac C. Special concrete may give steel stiff competition. *The Seattle Daily Journal of Commerce*. 1997. URL: http://www.djc.com/special/concrete97/10024304.html (дата звернення: 11.01.2022).

8. Lee N. P. and Chisholm D. H. Study Report Reactive Powder Concrete. *BRANZ*. 2005. Vol. 146, pp. 1–29.

9. Shaheen E. and Shrive N. G. Optimization of Mechanical Properties and Durability of Reactive Powder Concrete. *ACI Materials Journal*. 2006. Vol. 103, No. 6, pp. 444–451.

10. Chan Y. W. and Chu S. H. Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. *Cement and Concrete Research*. 2004. Vol. 34, No. 7, pp. 1167–1172.

11. Jungwirth J. Structural Behaviour of Tension Members Constructed of Ultra-high Performance Fibre Reinforced Concrete : PhD Thesis. *Structural Concrete Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland*. 2005.

12. Lee M. G., Wang Y. C. and Chiu C. T. A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material. *Construction and Building Materials*. 2007. V. 21, pp. 182–189.

13. Liu C. T. and Huang J. S. Highly flowable reactive powder mortar as a repair material. *Construction and Building Materials*.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

2008. Vol. 22, No. 6, pp. 1043–1050.

14. Collepardi M., Collepardi S., Troli R. and Coppola L. Innovative Concretes (SCC, HPC and RPC) in the Field of Architectural, Civil and Environmental Engineering. *ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology Proceedings* : Proceedings of the Sixth CANMET. 2003.

15. Washer G., Fuchs P., Graybeal B. A. and Hartmann J. L. Ultrasonic Testing of Reactive Powder Concrete. *IEEE Transactions on ultrasonic, ferroelectrics and frequency control*. 2004. Vol. 51, No. 2, pp. 193–201.

16. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін, В. В. Житковський. Рівне : НУВГП, 2011. 174 с.

17. Баженов Ю. М., Демьянова В. С., Калашников В. И. Модифицированные высоко-качественные бетоны. М. : Ассоциация строительных вузов, 2006. 368 с.

18. Обеспечение оптимальной топологии самоуплотняющихся бетонных смесей для высокопрочных бетонов / В. И. Калашников, С. В. Ананьев, В. П. Архипов, М. Н. Мороз, В. М. Володин, Д. М. Валиев. *Новые энерго- и ресурсосберегающие наукоемкие технологии в производстве строительных материалов*. Пенза, 2009. С. 46–51.

19. Дворкин Л. И., Соломатов В. И., Выровой В. Н. Цементные бетоны с минеральными наполнителями / под ред. Дворкина Л. И. Киев : Будивэлник, 1991. 136 с.

20. Реакційно-порошкові бетони і матеріали на їх основі / Л. Й. Дворкін, О. М. Бордюженко, В. В. Житковський, Д. В. Кочкарьов, В. В. Марчук. Рівне : НУВГП, 2020. 304 с.

21. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони : монографія / Л. Й. Дворкін, Є. М. Бабич, В. В. Житковський, О. М. Бордюженко, Д. В. Кочкарьов, С. В. Філіпчук, І. В. Ковалик, Т. В. Ковальчук, М. М. Скрипник. Рівне : НУВГП, 2017. 331 с.

22. Дворкін Л. Й., Лушнікова Н. В., Рунова Р. Ф., Троян В. В. Метакаолін в будівельних розчинах і бетонах : монографія. Київ : Вид-во КНУБіА, 2007. 214 с.

23. Дворкін Л. Й. Житковський В. В., Лушнікова Н. В. Ефективні литі бетони з добавкою цеолітових туфів. *Вісник НУВГП*. 2004. Вип. 4(28). Ч. 2. С. 25–32.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

2. БУДІВЕЛЬНІ СУМІШІ НА ОСНОВІ РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВИХ БЕТОНІВ

2.1. Передумови використання РПБ у будівельних сумішах

Сухі будівельні суміші (СБС) стають все більше актуальними в будівництві завдяки ряду переваг у порівнянні із товарними розчиновими сумішами. В ряді випадків, стає неефективною експлуатація великих заводів з виробництва товарних розчинових сумішей внаслідок підвищення транспортних витрат. Використання СБС сприяє підвищенню продуктивності праці і якості робіт, зниженню витрат на транспортування і зберігання, скороченню технологічних операцій. Можливість управління основними властивостями СБС шляхом зміни вмісту різних компонентів створює широкий асортимент необхідних для зведення споруд матеріалів і тим самим дозволяє використовувати їх при виконанні всіх видів робіт.

Реакційно-порошкову бетонну суміш до замішування водою можна розглядати, як суху суміш, що містить в'яжуче (портландцемент), дисперсний наповнювач (дрібний пісок, зола та інші мінеральні добавки) та суперпластифікатор, а також добавки-модифікатори. Ці суміші забезпечують високу міцність, адгезійну здатність та довговічність бетонів та розчинів у різних умовах експлуатації. Коректуючи склади РПБ різними компонентами можна досягати властивостей сухих розчинових та бетонних сумішей різного призначення.

В сухі суміші доцільно вводити порошкоподібні поліакрилатні або полікарбоксилатні суперпластифікатори.

На основі пропонованих складів РПБ можливим є отримання сухих будівельних сумішей наступного функціонального призначення:

- для захисного («бронювального») шару конструкцій,
- для ремонту та поновлення поверхонь та споруд (РМ1, РМ2, РМ3);
- для улаштування теплозберігаючих огороджувальних конструкцій (МР 4);

Національний університет
водного господарства
та природокористування

- для улаштування стяжок та покриттів підлог (СТ1, СТ2, СТ3, ПО1, ПО2, ПО3);
- для штукатурення теплоізоляційними розчинами (ШТ3);
- для улаштування жорсткої та еластичної гідроізоляції та гідроізоляції систем теплоізоляції (ГІ1, ГІ2, ГІ3),
- зведення споруд 3D-принтером та ін.

Наведені в табл. 2.1 типові склади РПБ, які є найбільш доступними і ефективними [1].

Таблиця 2.1

Типові склади РПБ та їх міцнісні характеристики

№	Склад, кг/м^3*							СП	РК, см	Міцність РПБ, МПа					
										на згин, у віці			на стиск, у віці		
	Ц	П	ГП	МП	ДГШ	З	Вода			1 доба	7 діб	28 діб	1 доба	7 діб	28 діб
1	1000	1000	-	-	-	-	200	MELFLUX 2651 (0,5% від цем)	25	9,2	30,5	30,5	57,2	71,4	98,0
2	900	1000	-	100	-	-	200		30	8,5	25,1	19,6	56,0	69,4	101,6
3	700	1000	-	300	-	-	200		30	9,8	20,9	14,9	47,0	72,8	96,4
4	900	1000	100	-	-	-	210		10	9,9	23,2	15,6	51,8	73,6	93,0
5	700	1000	300	-	-	-	200		25	9,2	23,9	12,5	40,2	70,2	90,2
6	900	1000	-	-	100	-	200		15	9,2	23,4	22,3	51,8	92,6	98,4
7	700	1000	-	-	300	-	200		30	8,8	17,6	20,3	37,4	90,0	102,0
8	900	1000	-	-	-	100	200		30	9,5	21,6	14,5	46,6	79,0	87,2
9	700	1000	-	-	-	300	200		30	7,6	17,1	13,3	36,8	77,0	99,0

* - Ц – портландцемент, П – пісок фракції 0.16…1,25, ГП – гранітний аспіраційний пил, МП – мелений пісок, ДГШ – доменний гранульований шлак, З – зола-виносу.

Вимоги до перерахованих сумішей, для яких за ДСТУ Б В.2.7-126-2011 нормуються властивості, наведені в табл. 2.2.

Як вихідні матеріали для отримання СБС були використані:

– РПБ характеристики компонентів якого наведені в попередньому розділі;

Національний університет
водного господарства
та природокористування

– кварцовий пісок фракції 0,16…1,25 з модулем крупності $М_{кр}$ – 1,6…1,9;

– керамзит фракції 0…5 мм, насипної густини 690 кг/м^3 (марка 700) з водопоглинанням 14,5%, міцністю при стисканні у циліндрі 3,6 МПа (марка П150);

– перлітовий пісок фракції 0,16…1,25 мм з насипною густиною 95 кг/м^3 (марка 100);

– спінені полістирольні гранули ТзОВ ПІІ «Ізотерм-С» розміром 3–5 мм з насипною густиною 10,5 кг/м^3; густина зерен – 15,5 кг/м^3;

– суперпластифікуюча добавка «Melflux 2651F»;

– редиспергований полімерний порошок (РПП)

– Neolith P 4400 (вініловий ефір версатієвої кислоти) FAR SPA (Італія),

– Dairen DA 1400 (сополімер – вінілацетат-етилен) DCC (Тайвань),

– ПВА – полімер вінілацетату.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Таблиця 2.2

Вимоги до розчинових сумішей та розчинів на їх основі

Назва показника	Значення показників для сумішей													
	МР4	СТ1	СТ2	СТ3	ПО1	ПО2	ПО3	РМ1	РМ2	РМ3	ШТ3	ГІ1	ГІ 2	ГІ 3
Суміші														
Крупність заповнювача, мм, не більше	2,5	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	4,0	2,5	1,25	1,25	1,25	0,63	0,63	0,63
Розчинові суміші														
Рухомість, см, не менше	6	8	8	8	-	-	-				8			
Розтічність, см, не менше	-	-	-	-	17	17	-				-			
Термін придатності, хв, не менше	60	20	20	20	20	20	-	30	30	30	60	60	120	120
Розчини														
Міцність зчеплення після витримування в повітряно-сухих умовах , МПа, не менше	0,2	0,2	0,5	0,5	1,0	1,0	1,5	2,0	2,0	0,8		1,0	0,5	0,08 ПП*; 0,015 МВ*
Границя міцності на стиск, МПа, не менше: -через три доби -через 28 діб	5	5 15	5 20	10 35	7 25	10 35	20 50	5,0 35,0	6,0 30,0	4,0 20,0	2,5	12	-	4
Границя міцності на розтяг при згині через 28 діб, МПа, не менше		3,5	4,5	6,0	5,0	5,0	7,0	5,0	5,0	5,0	1,2			

Національний університет водного господарства та природокористування

продовження табл. 2.2

Назва показника	Значення показників для сумішей													
	МР4	СТ1	СТ2	СТ3	ПО1	ПО2	ПО3	РМ1	РМ2	РМЗ	ШТЗ	ГІ1	ГІ 2	ГІ 3
Стираність, г/см^2, не більше		-	-	-	0,7	0,7	0,7							
Усадка, мм/м, не більше		2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,2	1,2	2,0		2	-	-
Морозостійкість, циклів, не менше	25-75	-	-	50	-	75	75	75	75	-		50	50	50
Теплопровідність, Вт/(м·К), не більше	0,35										0,3			
Водопоглинання за 24 год, кг/м^2, не більше											0,8	-	-	0,6
Паропроникність, мг/м·год·Па, не менше											0,1	0,03	-	0,1 МВ;* 0,04 ПП*
Тріщиностійкість	Відсутність тріщин на шарі товщиною, яка дорівнює максимально рекомендованій													

Примітка - * ПП – пінополістирол, МВ – мінеральна вата.

МР 4 – Улаштування теплозберігаючих огороджувальних конструкцій; СТ1, СТ2, СТЗ – Улаштування стяжок підлог; ПО1, ПО2, ПОЗ – Улаштування покриттів підлог; РМ1, РМ2 – Ремонт поверхонь з бетону на основі цементу; РМЗ – Ремонт поверхонь з розчинів на основі мінеральних в'яжучих; ШТЗ – Штукатурення ніздрюватих бетонів; ГІ 1 – Улаштування жорсткої гідроізоляції; ГІ 2 – Улаштування еластичної гідроізоляції; ГІ 3 – Улаштування гідроізоляції систем теплоізоляції.

Національний університет водного господарства та природокористування

Національний університет
водного господарства
та природокористування

2.2. Дослідження впливу полімеру на властивості СБС

При замішуванні сухої суміші у воді редиспергованi полімерні порошки перетворюються в клейову полімерну дисперсію, яка при затвердінні розчину створює «гумові містки» в його порах і на межі з основою. Вони мають міцність при розриві не менше 5 МПа і еластично армують цементний камінь, а також здатні не тільки суттєво збільшити адгезію розчинів до основи, але і значно згладити такі недоліки цементного каменю, як підвищену крихкість, низьку граничну розтяжність, схильність до утворення тріщин, малий опір динамічним навантаженням. Варто відзначити, що полімер хімічно не взаємодіє з в'яжучими і іншими компонентами, а лише виконує роль гнучких зв'язків, надаючи штучному каменю підвищену еластичність. За допомогою дисперсних порошків сухим сумішам надаються і деякі спеціальні властивості [2; 3].

На першому етапі дослідження проводили порівняння впливу редиспергованих полімерних порошків (РПП) різної природи Neolith P 4400 (вініловий ефір версатієвої кислоти), Dairen DA 1400 (сополімер – вінілацетат-етилен) та ПВА. При цьому розчини отримували шляхом перемішування суміші РПБ, піску, полімеру та води. Склад РПБ в даному і послідуючих випадках був наступний: ПЦ-І – 35%, зола-виносу – 15%, пісок фр. 0,16…1,25 мм – 50%, суперпластифікатор MELFLUX 2651F 0,5% (від маси цементу). Частка полімеру складала 0, 10 та 20% від маси РПБ, В/Ц було сталим в кожній точці та становило 0,48. Склади досліджуваних СБС на основі РПБ з використанням РПП приведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Склади досліджуваних сумішей на основі РПБ

№	Тип полімеру	Склад сухої суміші, % мас			Вода замішування, %
		РПП	РПБ	Пісок	
1	-	0	50	50	12
2	Neolith P 4400	2,5	50	47,5	12
3		5,0	50	45	12

Національний університет
водного господарства
та природокористування

продовження табл. 2.3

№	Тип полімеру	Склад сухої суміші, % мас			Вода замішування, %
		РПП	РПБ	Пісок	
4	Dairen DA 1400	2,5	50	47,5	12
5		5,0	50	45	12
6	ПВА	2,5	50	47,5	12
7		5,0	50	45	12

Рухомість розчинових сумішей визначали за зануренням стандартного конусу (ЗК), границю міцності на розтяг при згині ($f_{m.tf}$) та границю міцності на стиск ($f_{m.}$) розчину визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-239 у віці 1, 3 та 28 діб, при використанні зразків призм розміром (40х40х160 мм), які тверднули у повітряно-сухих умовах. Отримані експериментальні результати наведені в табл. 2.4 та на рис. 2.1...2.3.

Таблиця 2.4

Результати випробувань впливу РПП на властивості розчинів

№	ЗК, см	Міцність при згині ($f_{m.tf}$), МПа, у віці			Міцність при стиску($f_{m.}$), МПа, у віці		
		1 доба	7 діб	28 діб	1 доба	7 діб	28 діб
1	6,0	2,8	6,1	8,4	6,2	25,9	40,2
2	11,0	2,4	6,8	9,0	5,4	18,4	37,4
3	13,0	1,9	6,3	10,1	4,2	15	32,6
4	10,0	2,2	6,5	8,8	4,9	18,4	36,6
5	12,0	1,6	5,9	9,8	3,8	15	32,2
6	11,5	2,1	6,2	8,8	4,6	18,4	37,0
7	13,5	1,6	5,1	9,2	3,4	15	31,8

Аналізуючи отримані результати можна прийти до висновків, що введення РПП спричиняє значне збільшення рухомості розчинової суміші по зануренню конуса (ЗК) з 6 см до 10…11,5 см при постійній водопотребі та вмісті полімеру 2,5% від маси суміші. При подальшому підвищенні кількості РПП та ПВА до 5% спостерігаємо незначне збільшення рухомості до 12…13,5 см (рис. 2.1).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

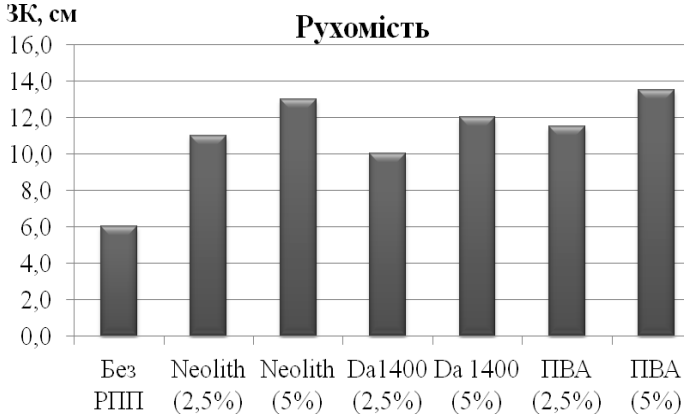


Рис. 2.1. Рухомість розчинових сумішей при використанні РПП

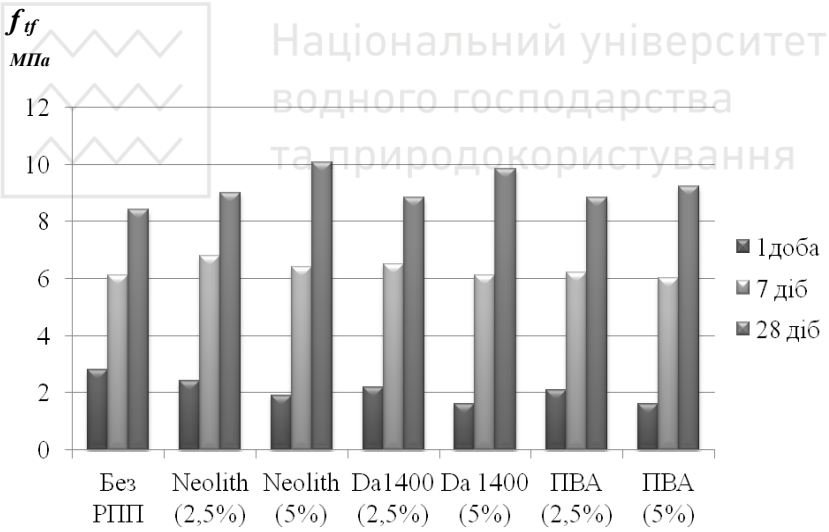


Рис. 2.2. Міцність розчинів на згин ($f_{m.\ tf}$) при використанні РПП

Полімерні порошки мають неоднозначний вплив на міцність як на стиск так і на згин у різні терміни твердіння. Згідно отриманих даних (табл. 2.4. та рис. 2.2, 2.3) введення полімерів усіх видів уповільнює твердіння на ранніх стадіях, як

Національний університет
водного господарства
та природокористування

при згині так і при стиску. Причому при наближенні до 28 добового віку РПП чинять позитивний вплив. Міцність при згині у віці 28 діб зростає у порівнянні з складом без полімерної добавки на 8…12% при частці РПП 2,5% та на 8…12% і 10…15% у віці 7 та 28 діб відповідно при збільшенні добавки до 5%. Найвищі результати (10,1 МПа) отримані при використанні РПП Neolith P 4400 у кількості 5% від маси СБС.

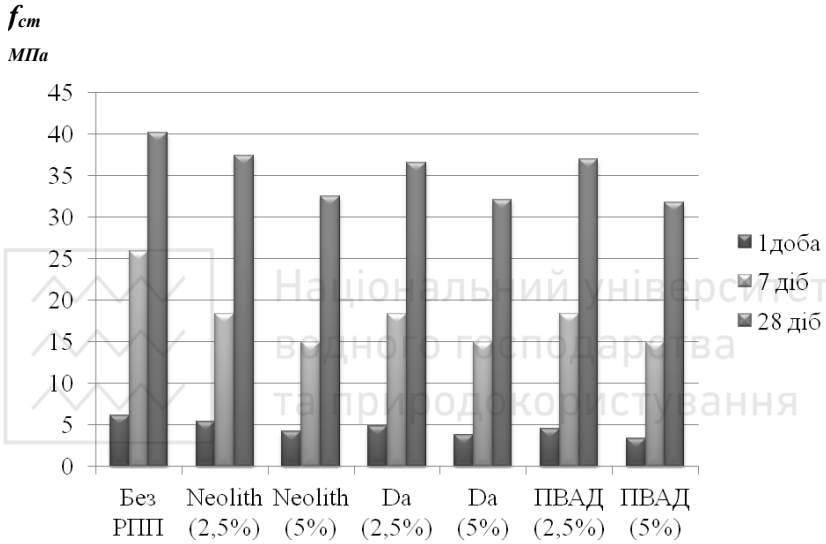


Рис. 2.3. Міцність розчинів на стиск (f_m) при використанні РПП

Вплив РПП на міцність при стиску є дещо іншим. Він чинить здебільшого негативний вплив, при помірних дозуваннях (до 2,5%) в віці 28 діб міцність падає на 7…10%. За подальшого зростання вмісту полімеру (до 5%) в композиції міцність останньої на стиск знижується на 16…20%. Вплив на ранню міцність при стиску, у порівнянні з марочною, є більш вагомим і супроводжується спадом на 35…45% у порівнянні зі зразком без полімерної добавки.

Подальші дослідження проводили з використанням РПП Neolith P 4400.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

2.3. Ремонтні суміші на основі РПБ

Під час експлуатації бетонні та залізобетонні конструкції і споруди піддаються дії агресивних середовищ, сейсмічним, ударним та іншим руйнівним впливам, які можуть викликати пошкодження і руйнування будівельних конструкцій [4; 5]. З кожним роком кількість бетонних і залізобетонних споруд, що руйнуються зростає, що призводить до необхідності створення методів і матеріалів для їх відновлення та захисту від агресивного навколишнього середовища.

Необхідність ремонту і захисту бетонних конструкцій визначається умовами експлуатації і термінами служби бетону, залізобетонних конструкцій і виробів.

Для збільшення терміну служби будівельних конструкцій застосовують дві групи методів захисту. До першої групи відносяться всі способи захисту поверхні будівельних конструкцій. До другої групи належать всі способи і методи по створенню більш довговічного матеріалу будівельних конструкцій.

Для поверхневого захисту матеріали на мінеральній основі знаходять все більше застосування за рахунок їх переваг перед матеріалами на органічних в'яжучих. Серед переваг мінеральних матеріалів слід відзначити такі якості, як високу міцність, морозостійкість, паропроникність, стійкість до впливу агресивних середовищ і нескладну технологія нанесення.

Отримання необхідних складів сухих будівельних сумішей на основі РПБ виконувалося шляхом додавання до їх базової рецептури РПБ (ПЦ-35%, зола-виносу – 15%, пісок фр. 0,15…0,63 – 50%, суперпластифікатор 0,5% від цементу) компонентів залежно від призначення та необхідних характеристик СБС.

Для вивчення впливу факторів складу сумішей на основні властивості будівельних розчинів були виконані алгоритмізовані експерименти відповідно до трирівневого трифакторного плану B_3 [6]. Умови планування експериментів наведені в табл. 2.5.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Таблиця 2.5

Умови планування експериментів при дослідженні ремонтних сумішей на основі РПБ

Фактори впливу		Рівні варіювання			Інтервал
Натуральний вид	Кодований вид	–1	0	+1	
Вміст РПБ, кг/т	X_1	500	650	800	150
Вміст золи, кг/т	X_2	0	50	100	50
Вміст РПП, кг/т	X_3	0	10	20	10

Як вихідні параметри вибрано рухомість розчинової суміші за зануренням конуса (ЗК), водопоглинання (W), міцність при стиску (f_{cm}), згині (f_{ctn}) у віці 1, 7 та 28 діб зразків, які тверднули у повітряно-сухих умовах та адгезійну міцність (f_{adh}) розчинів. Випробування проводили згідно з чинними нормативними документами ДСТУ Б В.2.7-239 та ДСТУ Б В.2.7-126-2011.

Матриця планування та отримані експериментальні результати досліджень наведені в табл. 2.6 та табл. 2.7 відповідно.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Таблиця 2.26

Матриця планування досліджень ремонтних сумішей

Точка плану	Кодовані значення факторів			Склад розчину, кг/т				
	X_1	X_2	X_3	РПБ	З	РПП	Пісок	Вода
1	1	1	1	800	100	0	100	120
2	1	1	-1	800	100	20	80	120
3	1	-1	1	800	0	0	200	120
4	1	-1	-1	800	0	20	180	120
5	-1	1	1	500	100	0	400	120
6	-1	1	-1	500	100	20	380	120
7	-1	-1	1	500	0	0	500	120
8	-1	-1	-1	500	0	20	480	120
9	1	0	0	800	50	10	140	120
10	-1	0	0	500	50	10	440	120
11	0	1	0	650	100	10	240	120
12	0	-1	0	650	0	10	340	120

Національний університет
водного господарства
та природокористування

продовження табл. 2.6

13	0	0	1	650	50	0	300	120
14	0	0	-1	650	50	20	280	120
15	0	0	0	650	50	10	290	120
16	0	0	0	650	50	10	290	120
17	0	0	0	650	50	10	290	120

У ході досліджень в кожній точці виготовляли розчини на основі РПБ з постійно водопотребою, що становила 120 л/т сухої суміші.

Таблиця 2.7

Експериментальні результати досліджень ремонтних СБС на основі РПБ

Точка плану	ЗК, см	Густина ρ_0, кг/м^3	Водопоглинання (W),%	Міцність на згин (f_{ctn}), МПа, у віці діб			Міцність на стиск (f_{cm}), МПа, у віці діб			Адгезія (f_{adh}), МПа
				1	7	28	1	7	28	
1	12,8	2320	0,9	6,29	14,52	18,7	41,4	51,4	73,1	2,49
2	8,4	2410	1,5	7,09	14,08	16,6	49,8	66,6	82,6	0,73
3	10,8	2230	2,1	5,49	12,1	16,8	28,8	39,2	59,9	2,19
4	5,4	2320	2,8	5,89	11,44	14,1	40,4	46,9	70,0	0,59
5	14,3	2272	1,4	3,49	9,57	13,9	13,5	27,6	40,7	1,79
6	10,5	2350	3,5	5,89	7,0	7,4	32,2	33	46,6	0,41
7	13,5	2110	2,6	3,09	8,8	13,5	11,5	24,3	36,3	1,53
8	8,7	2200	3,9	5,09	6,1	6,4	20,8	35	42,8	0,33
9	10,5	2300	1,6	6,64	13,2	17,3	38,8	52,1	69,7	1,20
10	12,9	2223	2,7	4,84	8,69	11,1	18,8	28,2	39,9	0,55
11	12,2	2316	1,8	5,64	11,88	16	28,9	43	60,6	1,10
12	10,3	2160	3,0	4,84	10,78	14,5	23,1	39,7	52,1	0,90
13	11,8	2233	1,6	4,49	11,99	16,6	20,1	40,6	53,4	2,10
14	7,2	2330	2,7	5,89	10,12	12	36,8	42,6	61,4	0,40
15	10,9	2285	2,0	5,44	11,11	15,2	24,3	41	56,0	1,10
16	11,0	2280	2,2	5,5	11,55	15,2	25	41,2	57,3	0,95
17	10,5	2290	2,1	5,3	11,22	15,1	25,3	42	56,9	1,00

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Статистична обробка експериментальних даних дозволила отримати коефіцієнти рівнянь регресії рухомості, водопоглинання, середньої густини, міцності при стиску та згині, а також адгезійної здатності досліджуваних розчинових сумішей та розчинів, які наведені в табл. 2.8.

Аналізуючи коефіцієнти рівнянь регресії рухомості сумішей по зануренню конуса (табл. 2.23) досліджені фактори можна розмістити по величині впливу в наступний спадаючий ряд $X_3>X_2>X_1$, також спостерігається несуттєвий вплив ефектів взаємодії цих факторів. При цьому підвищення вмісту РПП та золи має позитивний ефект, а збільшення кількості РПБ навпаки. Аналіз взаємодій коефіцієнтів рівнянь однозначно показує, що при збільшенні кількості РПБ в поєднанні зі зменшенням частки золи має місце деяке падіння рухомості. Позитивно на рухомість розчинових сумішей впливає спільне збільшення витрат РПП і золи.

Таблиця 2.8

Коефіцієнти рівнянь регресії

Коефіцієнти	Рухомість ЗК, см	Середня густина розчину ρ_0, кг/м^3	Водопоглинання (W),%	Міцність на згин (f_{ctn}), МПа, у віці діб			Міцність на стиск (f_{cm}), МПа, у віці діб			Адгезія (f_{adh}), МПа
				1 доба	7 діб	28 діб	1 доба	7 діб	28 діб	
B_0	10,87	2275	2,12	5,44	11,4	15,15	25,77	41,7	56	0,98
B_1	-1,2	42,5	-0,53	0,9	2,40	3,12	10,24	11,81	14,9	0,26
B_2	0,95	44,8	-0,53	0,4	0,78	0,74	4,12	4,66	4,25	0,1
B_3	2,3	-44,5	-0,57	-0,7	0,70	2,30	-6,47	-3,10	-4,1	0,76
B_{11}	0,76	0,51	0,02	0,3	-0,4	-0,99	2,44	-1,69	-1,24	-0,08
B_{22}	0,34	-23,0	0,24	-0,20	-0,03	0,11	-0,36	-0,5	0,31	0,05
B_{33}	-1,4	20,5	-0,03	-0,25	-0,3	-0,84	2,09	-0,25	1,41	0,3
B_{12}	0,3	-16,5	-0,11	0,10	0,43	0,37	1,08	2,59	2,20	0,01
B_{13}	0,13	-1,5	0,26	0,40	-0,37	-1,11	1,00	-2,10	-0,88	0,1
B_{23}	-0,25	1,5	-0,09	-0,10	-0,04	-0,15	-0,78	-1,53	0,15	0,04

Вплив факторів складу на середню густину є дещо іншим. Вони всі мають практично однакову величину впливу, однак, якщо РПБ та зола при збільшенні їх частки викликають підвищення густини, то РПП – призводить до її зменшення. Це

Національний університет
водного господарства
та природокористування

пояснюється залученням повітря в розчин в присутності порошку Крім того, рівномірно розподілене повітря надає пластифікуючого ефекту розчиновим сумішам, що в свою чергу призводить до збільшення рухомості.

Аналіз отриманих коефіцієнтів рівнянь міцнісних показників (табл. 2.8) показує, що у діапазоні варіювання досліджуваних факторів, розчинів, які містять РПБ, як і слід було очікувати, найбільш помітний вплив чинять витрати РПБ та полімерного порошку. Спостерігається суттєвий вплив ефектів взаємодії факторів. Зокрема: вміст РПБ та золи призводять до росту міцності при стиску в усі терміни твердіння, а РПБ та полімерного порошку до зростання міцності на згин у віці 28 діб. Визначальним фактором для збільшення адгезійної здатності є наявність РПП. Досягнення високих міцнісних та інших якісних показників розчинових сумішей та розчинів можливе при відповідній оптимізації складів розчинів.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

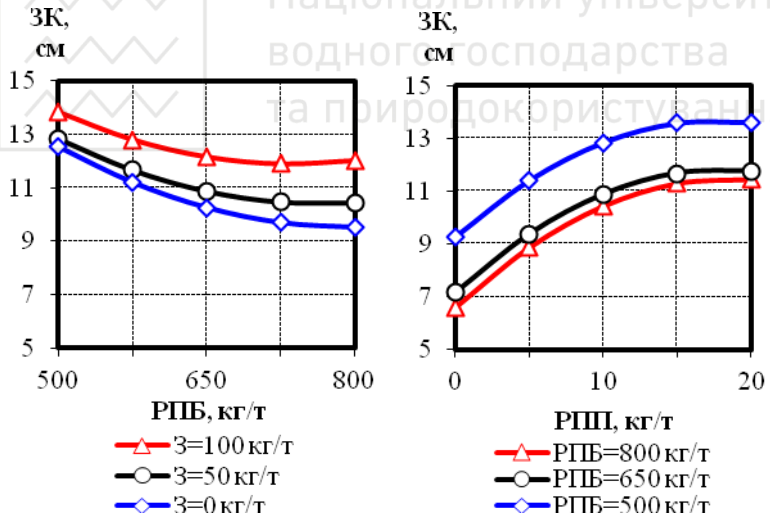


Рис. 2.4. Графічні залежності рухомості ремонтних розчинових сумішей на основі РПБ від факторів складу

Для аналізу отриманих рівнянь регресії побудовані двофакторні графічні залежності, які ілюструють вплив

Національний університет
водного господарства
та природокористування

факторів складу на властивості розчинових сумішей та розчинів (рис. 2.4...2.13).

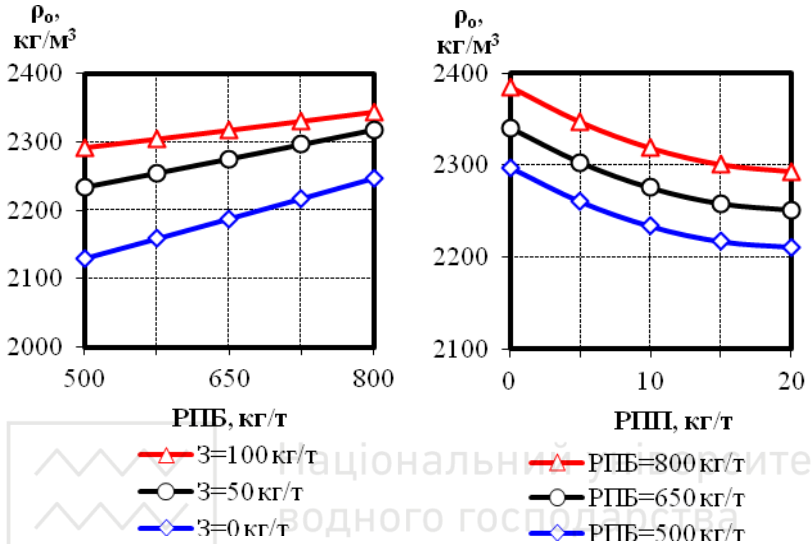


Рис. 2.5. Графічні залежності середньої густини ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

Введення РПП до складу розчину призводить до зниження середньої густини, що добре видно на рис. 2.5. Це супроводжується залученням повітря в розчин в присутності водорозчинного полімеру. Густина в порівнянні з еталоном знизилася для різних дозувань РПП на 7–11%. Крім того, рівномірно розподілене повітря надало пластифікуючого ефекту розчиновим сумішам, що виразилося в збільшенні глибини занурення конуса з 6…9 см до 11…13,5 см при максимальному дозуванні РПП у межах варіювання (рис. 2.4).

При цьому встановлено, що локалізація повітряних пор якісно не залежить від дозування РПП в межах 0–2%.

Збільшення дозування РПП Neolith P 4400 до 2% маси суміші супроводжує зменшення водопоглинання на 50…60% при максимальному вмісті РПБ (800 кг) та майже в 2 рази при помірній витраті РПБ (500 кг).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Низький водовміст розчинових сумішей на основі досліджуваних РПБ, підвищена відносна густина цементного каменю, інтенсивна гідратація та тверднення обумовлюють відповідні особливості порової структури розчинів. Аналіз даних, приведених в табл. 2.7 і на рис. 2.6 показує, що як варто було очікувати, збільшення вмісту РПБ та золи в розчинових сумішей призвело до суттєвого зменшення водопоглинання, як характеристики відкритої капілярної пористості за рахунок зменшення водовмісту.

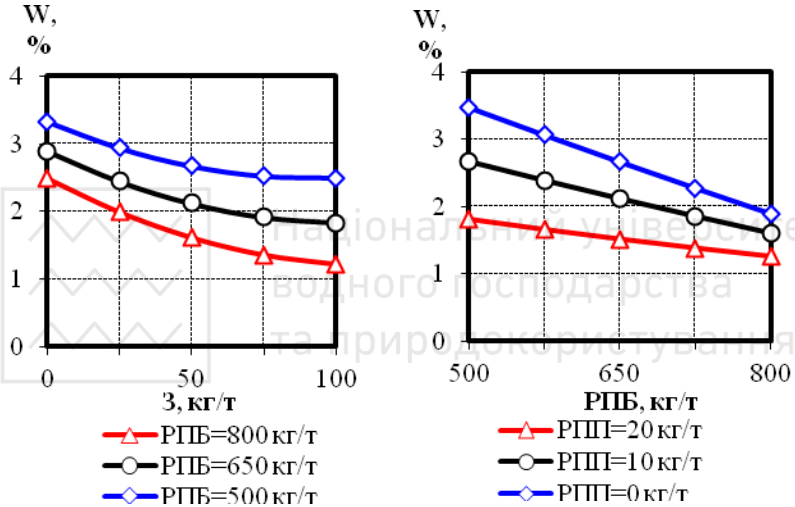


Рис. 2.6. Графічні залежності водопоглинання ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

Важливим наслідком введення РПП Neolith P 4400 в суміші є покращення структури порового простору за рахунок зменшення розміру пор та підвищення однорідності їхнього розподілення. Зменшення товщини водних прошарків на зернах в'яжучого обумовлює зменшення середнього радіуса капілярів, а однорідності їхнього розподілення сприяє адсорбція на активних центрах твердої фази.

В процесі плівкоутворення в твердіючому розчині утворюються полімерні плівки, що закривають мікропори і полімерні «містки», що з'єднують краї мікротріщин внутрішніх дефектів.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

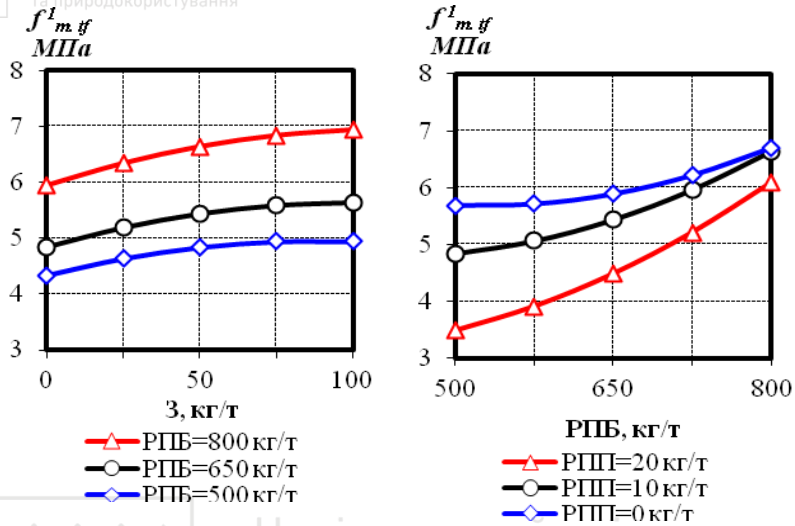


Рис. 2.7. Графічні залежності міцності при згині у віці 1 доби ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

Національний університет
водного господарства
та природокористування

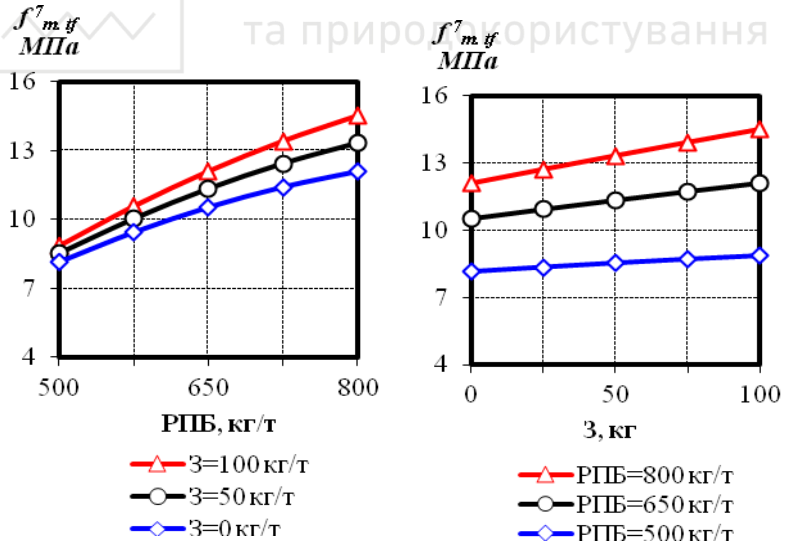


Рис. 2.8. Графічні залежності міцності при згині у віці 7 діб ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

Національний університет
водного господарства
та природокористування

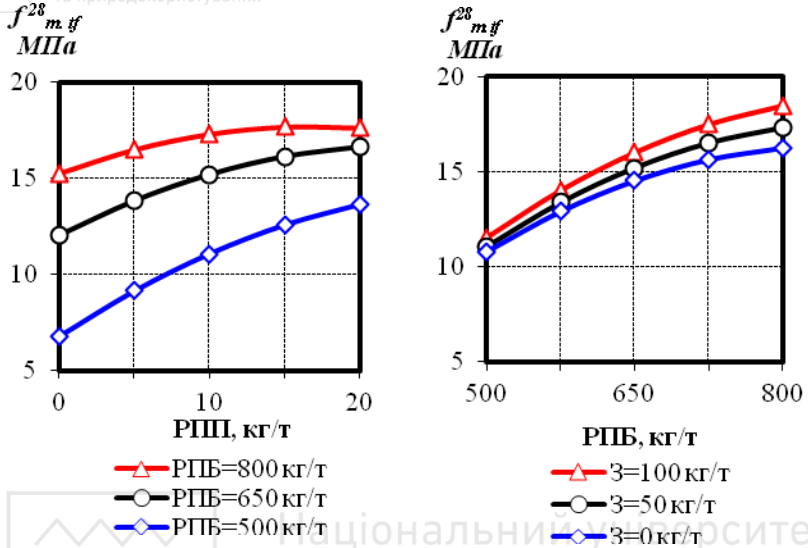


Рис. 2.9. Графічні залежності міцності при згині у віці 28 діб ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Це вказує на те, що існує певний оптимум вмісту РПБ та РПП в розчині, при якому зберігається суцільність цементного гелю в структурі, полімер же заповнює найдрібніші пори і капіляри, а також обволікає цементні зростки і частинки заповнювача.

Аналізуючи отримані графічні залежності, що зображені на рис. 2.7…2.9 можна зробити висновок, що у межах варіювання факторів на міцність розчинів при згині визначальним є вміст РПБ Збільшення кількості РПБ з 500 до 800 кг дозволяє підвищувати ранню міцність на 40…50% та марочну на 30…40% при збільшеному вмісті РПБ та золи-виносу, а в сумішах з пониженим вмістом РПБ спостерігається ріст міцності на 8–12%. Зниження вмісту золи у вибраних межах також може знижувати, або практично не впливати на міцність.

Збільшення вмісту РПП в складі суміші може викликати як збільшення так і деяке зниження міцності розчинів. Влив РПП на 1-добову міцність розчинів спричиняє негативний

Національний університет
водного господарства
та природокористування

ефект, що нівелюється при максимальній витраті РПБ та помірній до 1% кількості полімерного порошку. У віці 7 та 28 діб Neolith P 4400 має екстремальний вплив при максимальному вмісті РПБ.

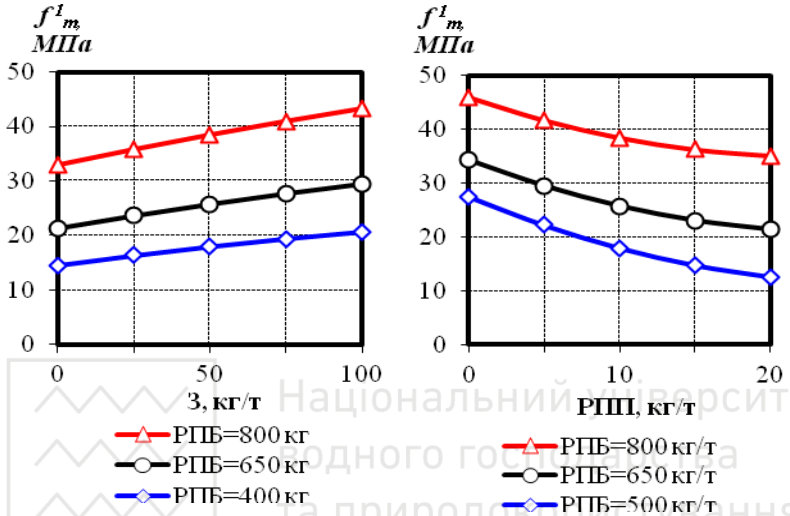


Рис. 2.10. Графічні залежності міцності при стиску у віці 1 доби ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

Збільшення міцності розчинів на згин при вмісті РПП 1% відзначається при одночасному збільшенні вмісту золи-виносу та зменшенні РПБ.

Аналіз отриманих графічних залежностей (рис. 2.10) свідчить про те, що у діапазоні варіювання досліджуваних факторів на міцність розчинів при стиску у віці 1 доби, визначальною є витрата РПБ. Збільшення вмісту РПБ з 500 до 800 кг/т дозволяє підвищувати міцність на 50…70% при витраті золи 0…50 кг. Збільшення понад 50 кг/т супроводжує подальший ріст міцності у віці 1 доби у 2…2.2 рази. Вплив введення золи-виносу має менш значний ефект, збільшення її вмісту до 50 кг/т дозволяє підвищувати міцність розчинів на 10…15% при помірних витратах РПБ (400…500 кг/т) та 25…30% при максимальному вмісті в межах варіювання. Це пояснюється формуванням щільної

Національний університет
водного господарства
та природокористування

структури за рахунок початкової міцності контактів, рівномірного розподілу часток зерен в'яжучого і заповнювача та активації кристалізаційних процесів. Вплив добавки має менш значний ефект, при чому введення РПП Neolith P 4400 у кількості 10% призводить до зниження ранньої міцності на 25…30% при максимальній частці РПБ та на 70…100% за умови збільшення вмісту РПП до 20%. Це пояснюється надлишковою кількістю залученого повітря до складу суміші, а також сповільненням процесів гідратації цементного каменю у присутності полімерів.

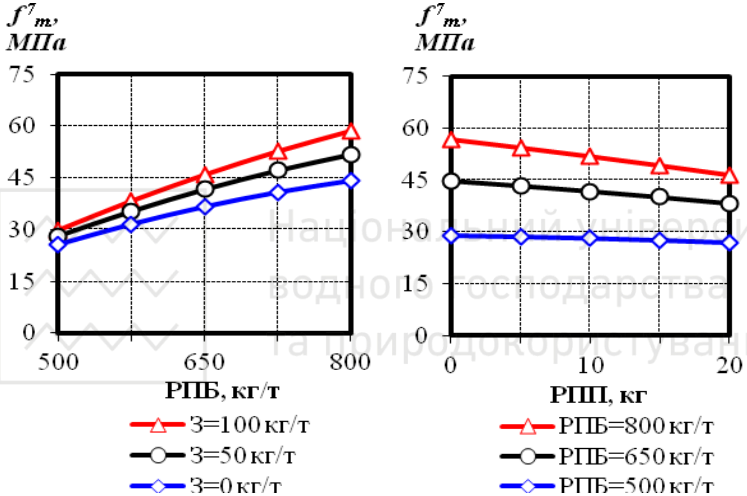


Рис. 2.11. Графічні залежності міцності при стиску у віці 7 діб ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

Проаналізувавши отримані графічні залежності (рис. 2.11, 2.12) маємо, що у досліджуваному діапазоні зміни факторів складу сухих сумішей, можливе отримання розчинів з 28-добовою міцністю при стиску 36,6…82,6 МПа. В 7-добовому віці міцність розчинів сягає 65…82% марочної 28-добової міцності. Міцність закономірно знижується при зміні складів сумішей, що призводять до збільшення водоцементного відношення. В цьому плані особливо суттєво відчувається вплив витрати РПБ та золи.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

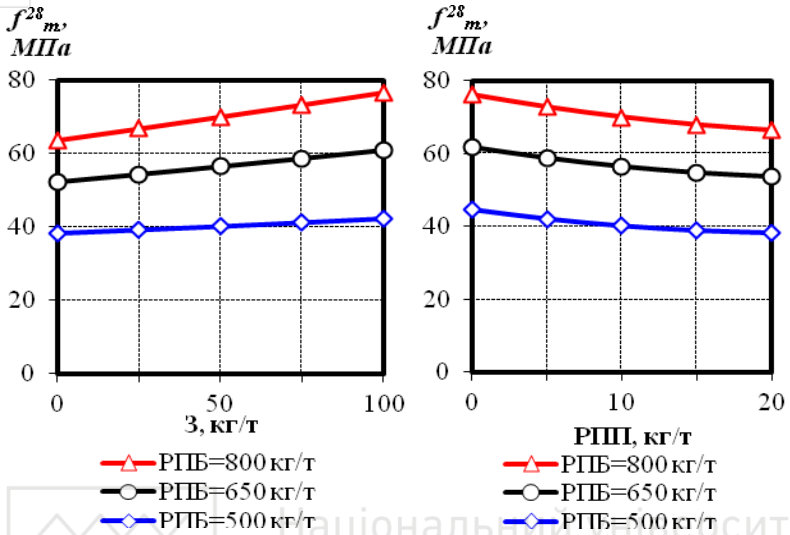


Рис. 2.12. Графічні залежності міцності при стиску у віці 28 діб ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

Національний університет
водного господарства
та природокористування

На графіках як 7-и так і 28-добової міцності найбільш значні лінійні ефекти проявляються для факторів X_1 і X_4, тобто витрат РПБ і золи-виносу.

Збільшення вмісту дисперсних компонентів (РПБ, зола-виносу) суміші може викликати збільшення 28-добової міцності розчинів. Ріст міцності розчинів при збільшенні вмісту РПБ бетону більш вагомий при підвищеному вмісті золи. Деяке збільшення міцності розчинів при збільшенні вмісту золи-виносу відзначається при підвищеному вмісту РПБ. При недостатньому вмісті останнього в розчинових сумішах зростання міцності практично не спостерігається. Зниження міцності притаманне при максимальному дозуванні у розчиновій суміші РПП, що пояснюється значною кількістю залученого повітря в складі досліджуваної суміші. Добавка Neolith P 4400 при максимальній частці РПБ призводить до зниження марочної міцності на 12…17% у порівнянні зі складом без полімеру та на 8…12% при мінімальній витраті РПБ.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Позитивний вплив золи та РПБ на міцність розчинів може бути суттєво зменшений чи зведений до нуля при неоптимальній витраті полімерного порошку.

Досягнення певних значень міцнісних показників розчинів можливе при різних співвідношеннях факторів, які характеризують вміст основних компонентів. При цьому спільне введення дисперсних компонентів позитивно позначається на міцності розчину навіть при незмінному водовмісті, що можна пояснити створенням кращих умов для ущільнення та взаємодії між частинками у твердіючому розчині.

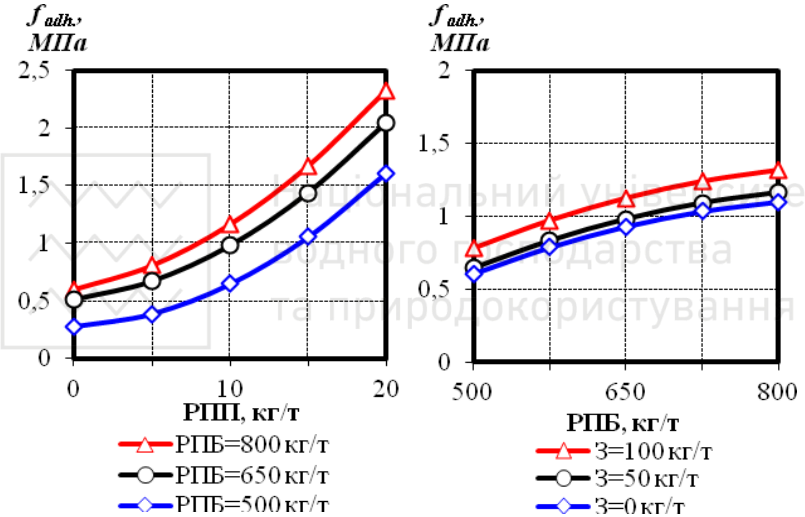


Рис. 2.13. Графічні залежності адгезійної міцності ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

Аналіз отриманих даних табл. 2.7, 2.8 та рис. 2.13 свідчить, що застосування в ремонтних розчинах як основного компоненту РПБ дає можливість забезпечити в досліджуваному діапазоні достатньо високі значення адгезійної міцності (до 2,5 МПа), що значно перевищують нормативні. Визначальним фактором є вміст РПП, введення якого в кількості до 2% за інших рівних умов дозволяє підвищити адгезійну міцність розчину в 3…4 рази або на 0,9…1,6 МПа.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Підвищення кількості золи-виносу у складі ремонтних розчинів до 50 кг супроводжує збільшення міцності зчеплення з основою на 8…12% ,а при подальшому збільшенні вмісту золи до 100 кг/т – 25…30% за умови зменшення частки РПБ та 15…20%. Такий вплив згаданих технологічних факторів на адгезію можна пояснити впливом не тільки пористості контактного шару, але й ступеня змочування розчином основи.

Суперпластифікатор Melflux у складі реакційно-порошкового бетону позитивно впливає на адгезію розчинів як в результаті зміни їх поверхневої енергії, так і в результаті зміни якісних характеристик контактного шару, насамперед в результаті збільшення його змочуваності і зменшення вмісту надлишкової вологи.

2.4. Гідроізоляційні суміші на основі РПБ

Надійність експлуатації будівельних об'єктів багато в чому залежить від їх гідроізоляції.

Просочування води відбувається через пори. Пористість є невід'ємною складовою цементної матриці. Так, при В/Ц=0,5 об’єм пор розмірами від 1 нм до 1 мм становить 46% об’єму цементного каменю. Чим вище В/Ц, тим в більшій кількості утворюються пори [4; 7; 8].

Важливим є вибір цементів, які повинні містити мінімум компонентів, які при гідратації і його твердінні перетворяться в водорозчинні сполуки. Вирішальну роль для досягнення високих фізико-механічних характеристик відіграють інертні наповнювачі. Важливий не тільки мінералогічний і фракційний склад, а й конфігурація частинок наповнювачів, а також відсутність в них капілярних пор.

Заповнювачі і наповнювачі не повинні містити водорозчинних компонентів [9; 10]. Їх наявність підвищує гідрофільність розчину, веде до росту В/Ц. При виборі наповнювачів рекомендується перевіряти їх водопоглинання і розчинність в нейтральному і лужному середовищі. Інертні наповнювачі не повинні містити компонентів, що змінюються в об’ємі при контакті з водою. Винятком є кольматаційні гідроізоляційні суміші. Ситові

Національний університет
водного господарства
та природокористування

характеристики інертних наповнювачів повинні забезпечувати максимально щільну упаковку.

Для вивчення впливу факторів складу гідроізоляційних сумішей на основі РПБ на їх властивості були виконані алгоритмізовані експерименти відповідно до трирівневого двофакторного плану B_2 [6]. Умови планування експериментів наведені в табл. 2.9.

Таблиця 2.9

Фактори впливу		Рівні варіювання			Інтервал
Натуральний вид	Кодований	–1	0	+1	
Частка РПБ, % по масі	X_1	25	37,5	50	12,5
Вміст Neolith P 4400, % мас	X_2	1	1,5	2	0,5

Як параметри фіксували водопоглинання, водонепроникність, міцність при стиску та згині розчинів. Границю міцності на розтяг при згині та стиск розчину у віці 1, 7 та 28 діб, які тверднули у повітряно-сухих умовах, а також водопоглинання визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-234. Водонепроникність визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-126:2011.

Матриця планування та склад гідроізоляційних сумішей, а також експериментальні результати наведено в табл. 2.10…2.12 відповідно.

Таблиця 2.10

Матриця планування та склад гідроізоляційних сумішей

№ з/п	Кодовані значення		Натуральні значення		Витрати матеріалів на 1т суміші			Вода замішування, л
	X_1	X_2	РПБ, %	РПП, %	РПБ, кг	РПП, кг	Пісок, кг	
1	1	1	50	2	500	20	480	140
2	1	-1	50	1	500	10	490	155
3	-1	1	25	2	250	20	730	150
4	-1	-1	25	1	250	10	740	175
5	1	0	50	1,5	500	15	485	150
6	-1	0	25	1,5	250	15	735	155
7	0	1	37,5	2	375	20	605	125
8	0	-1	37,5	1	375	10	615	140
9	0	0	37,5	1,5	375	15	610	135
10	0	0	37,5	1,5	375	15	610	135
11	0	0	37,5	1,5	375	15	610	135

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Після статистичної обробки результатів експериментів (табл. 2.11), виконаних згідно 12), які можна розглядати як характеристики впливу на якісні показники властивостей розчинів досліджуваних факторів в певному діапазоні їх варіювання.

Таблиця 2.11

Експериментальні результати дослідження гідроізоляційних сумішей

Точка плану	Водопоглинання у віці 28 діб,%	Міцність, МПа						Водонепроникність, у віці 28 діб, МПа
		на згин, у віці			на стиск, у віці			
		1 доба	7 діб	28 діб	1 доба	7 діб	28 діб	
1	1,4	2,1	4,3	6,50	4,0	8,0	18,0	1,0
2	2,7	3,1	3,4	5,94	7,0	15,0	24,0	0,8
3	3,2	1,2	2,7	3,67	2,0	4,2	7,5	0,6
4	4,1	1,9	2,1	2,24	3,0	7,5	10,0	0,4
5	2,0	2,4	3,6	5,98	6,0	12,0	22,0	0,8
6	3,5	1,5	1,9	3,02	2,6	4,5	9,0	0,4
7	2,6	1,8	3,9	4,89	3,3	6,0	14,0	0,8
8	3,9	2,6	2,9	4,21	5,3	10,0	17,0	0,4
9	3,2	2,1	3,2	4,62	4,3	8,5	15	0,6
10	3,3	2,1	3,3	4,60	4,0	8,0	16	0,6
11	3,3	2,0	3,2	4,50	4,0	8,0	16	0,6

Статистична обробка експериментальних даних дозволила отримати коефіцієнти рівнянь регресії водопоглинання, а також міцності при стиску та згині досліджуваних розчинових сумішей та розчинів, наведені в табл. 2.12.

Аналіз коефіцієнтів рівнянь регресії показників властивостей гідроізоляційних розчинів дозволяє оцінити фактори за величиною ефекту їхнього впливу. На досліджувані властивості більш суттєвий вплив чинить вміст РПБ у порівнянні з добавкою полімерного порошку Neolith 4400 при збільшенні їх витраті в діапазоні варіювання. Згідно отриманих даних спостерігається суттєвий вплив ефектів взаємодії факторів. Очевидно, що досягнення високих фізико-механічних показників розчинів можливе при відповідній оптимізації вмісту РПБ та РПП у їх складі.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Таблиця 2.12

Коефіцієнти рівнянь регресії

Коефіцієнти	Водопоглинання у віці 28 діб W,%	Міцність на згин, МПа, у віці			Міцність на стиск, МПа, у віці		
		1 доби	7 діб	28 діб	1 доби	7 діб	28 діб
b_0	3,24	2,06	3,19	4,55	4,19	8,05	15,77
b_1	-0,78	0,50	0,77	1,58	1,57	3,13	6,25
b_2	-0,58	-0,42	0,42	0,44	-1,0	-2,38	-1,92
b_{11}	-0,46	0,2	-0,38	-0,02	-0,06	0,39	-0,42
b_{22}	0,04	0,14	0,27	0,03	-0,06	0,14	-0,42
b_{12}	-0,1	-0,08	0,08	-0,22	-0,50	-0,93	-0,88

Таким чином, аналіз отриманих рівнянь регресії показує, що отримання гідроізоляційних сумішей на основі РПБ, що включає ПЦ, золу-виносу, суперпластифікатор та дрібний пісок, є ефективним технологічним прийомом, який дозволяє підвищити якісні характеристики гідроізоляційних розчинів.

Для аналізу отриманих експериментально-статистичних моделей побудовані двофакторні графічні залежності, які відображають вплив факторів складу на властивості розчинів (рис. 2.14…2.17).

Про ступінь впливу факторів складу розчинів свідчать результати визначення параметрів водопоглинання (рис. 2.14, табл. 2.11). Водопоглинання розчину більш помітно зменшується по мірі збільшення вмісту РПБ у суміші у порівнянні з РПП. Вміст порошкової бетонної суміші в межах 650...800 кг/т є достатнім для забезпечення низького водопоглинання при мінімальній та максимальній витраті полімерного порошку, яке становить 1,4…3,9% відповідно.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

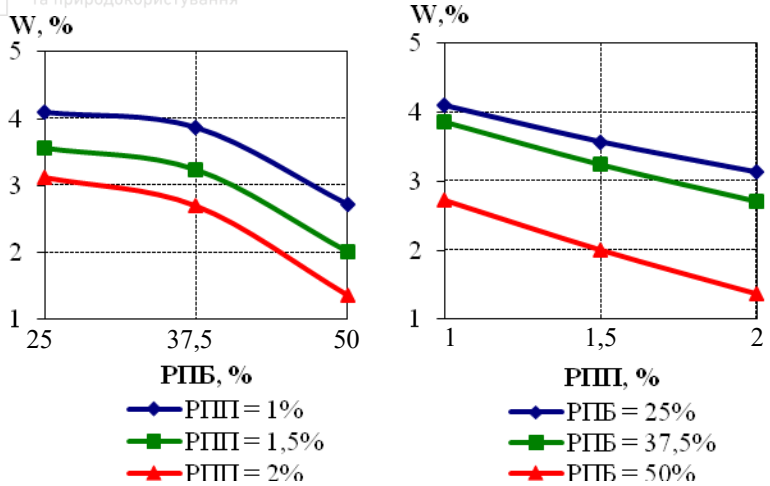


Рис. 2.14. Графічні залежності водопоглинання гідроізоляційних розчинів на основі РПБ від факторів складу

Національний університет
водного господарства
та природокористування

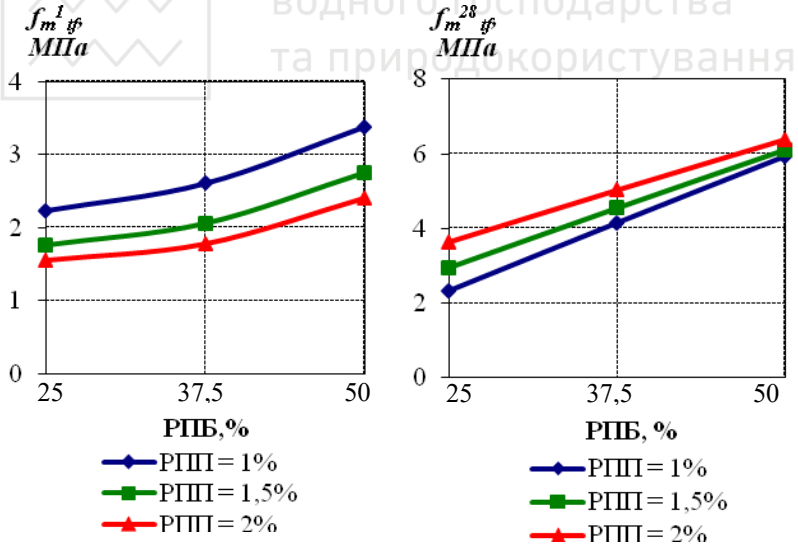


Рис. 2.15. Графічні залежності міцності при згині у віці 1 доби (а) та 28 діб (б) гідроізоляційних розчинів на основі РПБ

Національний університет
водного господарства
та природокористування

З отриманих даних чітко видно негативний вплив на міцність розчинів, як при стиску так і при згині у віці 1 доби, збільшення вмісту добавки РПП (рис. 2.15, а, рис. 2.16, а). Разом з тим, варто відмітити, що при підвищенні вмісту полімеру спостерігається позитивний вплив на міцність при згині у віці 28 діб. Ефект взаємодії факторів є негативним, хоча вклад його на величину міцності не дуже значний.

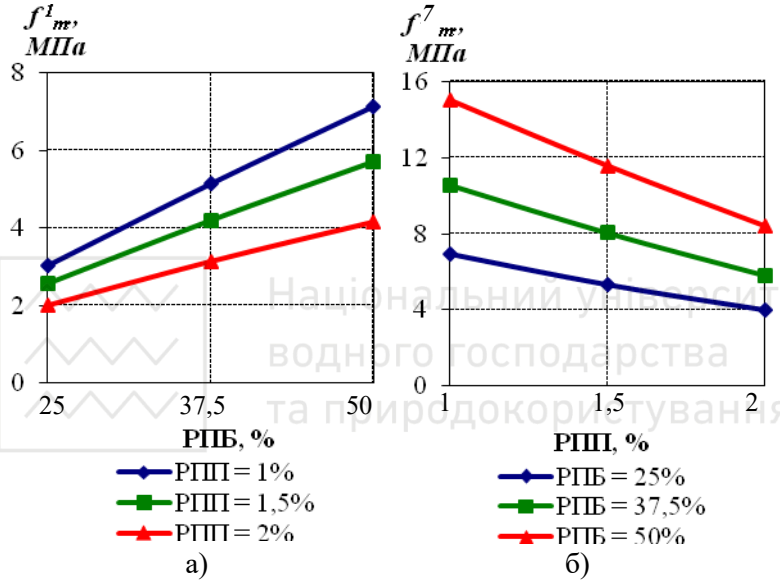


Рис. 2.16. Графічні залежності міцності при стиску у віці 1 доби (а) та 7 діб (б) гідроізоляційних розчинів на основі РПБ

Вплив досліджуваних факторів на показник міцності є у певній мірі лінійним, про що свідчать незначні квадратичні коефіцієнти рівнянь регресії. Особливо характерно це проявляється для міцності на згин у віці 28 діб на стиск в усі терміни твердіння. Збільшення кількості РПБ від 400 до 800 кг/т призводить до збільшення 1-ої добової міцності на стиск в 1.8…2 рази, а 28-и добової в 2,4 рази. Для міцності при згині приріст міцності, що зумовлений збільшенням витрати РПБ, більш низький 50…60% та 70…80%, відповідно при РПП 1% та 2%.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

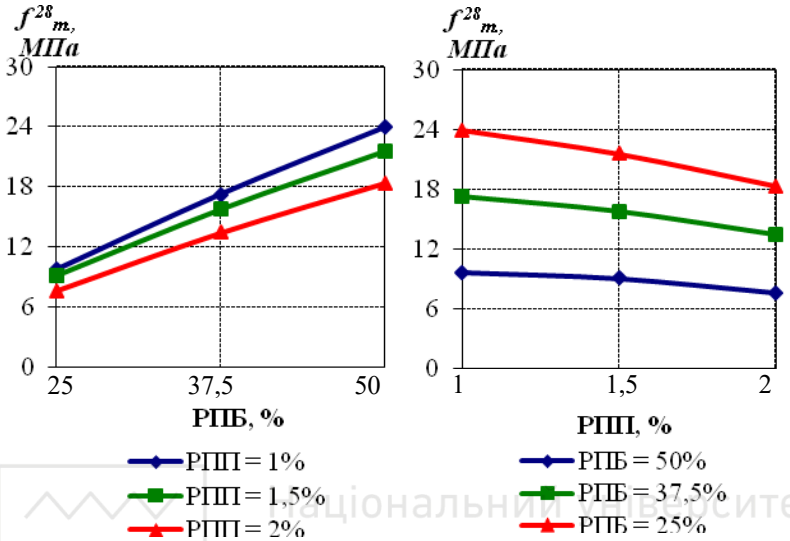


Рис. 2.17. Графічні залежності міцності при стиску у віці 28 діб гідроізоляційних розчинів на основі РПБ

Як випливає з характеру взаємодії підвищений вміст полімерної добавки більш позитивно впливає на міцність розчину на згин при меншій витраті РПБ.

Водонепроникність розчинів у вирішальній мірі залежить від особливостей його пористої структури. Якщо на міцність бетону основний вплив має загальна пористість, то водонепроникність є функцією відкритої наскрізний пористості. Рядом дослідників [8; 11] зазначено, що основними шляхами проникнення води в розчин є пори седиментаційного походження, утворення яких найбільш характерно для бетонів і розчинів з підвищеною рухомістю за рахунок високого вмісту води. Седиментація залежить головним чином від в'язкості цементного тіста, а основною седиментаційною характеристикою розчинової суміші є її водовідділення.

Зола-виносу робить істотний вплив на в'язкість пластифікованого цементного тіста і водовідділення бетонної суміші. За рахунок золи-виносу, що вводиться до складу РПБ

Національний університет
водного господарства
та природокористування
зменшується кількість мікропор і має місце кольматація відкритих пор.

Основним чинником, що визначає величину водонепроникності є водоцементне відношення. Різке зменшення водонепроникності при В/Ц менше 0,25...0,4 може бути пояснено як зменшенням загальної пористості, так і перерозподілом співвідношення між різними типами пор.

Водонепроникність гідроізоляційних розчинових сумішей на основі РПБ у віці 28 діб за рахунок вибору оптимальних значень факторів та їх поєднань може досягати значення W=0,6…1,0 МПа.

Із збільшенням тривалості твердіння водонепроникність підвищується в результаті незворотної зміни структури порового простору і збільшення об’єму твердої фази в цементному камені .

За даними В.В. Стольнікова [11; 12] при достатньому вологісному режиму твердіння підвищення водонепроникності розчинів в пізні терміни значно більше, ніж відносний приріст міцності на стиск. При цьому найбільше збільшення водонепроникності відзначено за інших рівних умов для бетонів і розчинів з вищими значеннями В/Ц і менше з низькими значеннями В/Ц. З метою визначення впливу РПБ на водонепроникність був визначений характер пористості зразків на основі золовмісних РПБ з різним вмістом РПП в їх складі. Було доведено, що введення РПП у кількості 1% незначно зменшує кількість відкритих капілярних пор. Із збільшенням вмісту Neolith P 4400 до 2% загальна кількість капілярних пор суттєво зменшується. Однак підвищений вміст РПБ (800 кг/т) призводить до значного зменшення еквівалентного радіуса пор, що зумовлює зниження проникності затверділого розчину.

Особливості порової структури розчинів та низьке водопоглинання є визначальними для їх водонепроникності. В процесі твердіння розчинів утворюються полімерні плівки, що закривають мікропори і полімерні «містки», що з'єднують краї мікротріщин внутрішніх дефектів.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Гідроізоляційні суміші на основі РПБ характеризуються високими марками за водонепроникністю W6-W10, що дозволяє їх використовувати в різних конструкціях.

2.5. Поризовані та теплоізоляційні суміші на основі РПБ

У сучасних економічних умовах в Україні у зв'язку з високою ціною на енергоносії все більшої актуальності набуває проблема енергозбереження. Вирішення цієї проблеми досягається застосуванням ефективних поризованих та теплоізоляційних матеріалів.

Легкі поризовані розчини. Для зменшення теплопровідності розчинів до їх складу вводять легкі заповнювачі (спучений перлітовий, вермикулітовий та інші піски), або застосовують добавки-поризатори. Однак міцність таких розчинів часто буває недостатньою (марки не вище М50...М75), до того ж для її забезпечення необхідна підвищена (до 500 кг/м^3) витрата портландцементу.

Для досягнення достатньої міцності при необхідній рухомості розчинової суміші, як показали наші дослідження, можна використовувати в якості основного компоненту реакційно-порошкові бетонні. Такі суміші доцільно виготовляти у вигляді готових до використання сухих будівельних сумішей (СБС), або змішуванням РПБ з необхідною кількістю легкого заповнювача та піску, як в заводських умовах, так і безпосередньо на будівельному майданчику.

Для підвищення термічного опору конструкцій при зведенні будівель та споруд доцільно використовувати поризовані роозчини. Поризовані розчини на основі сухих сумішей при відповідності їх властивостей необхідним вимогам можуть успішно використовуватись для влаштування «теплих підлог», у якості штукатурних, а також як мурувальні розчини при застосуванні стінових матеріалів з підвищеними теплоізоляційними властивостями (поризовані керамічні блоки, піно-, газобетонні блоки і т.п.). Ефект від застосування таких матеріалів зростає, якщо теплопровідність розчину для кладки не поступається аналогічному показнику стінового матеріалу.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Як відомо, традиційні цементно-піщані мурувальні розчини мають високу теплопровідність (0,8–0,9 Вт/м·К), що особливо негативно відображається в кладці з поризованих блоків (0,16 Вт/м·К), які вони скріплюють, в результаті чого в такій конструкції в місцях шва утворюються «містки холоду». При застосуванні таких розчинів збільшення товщини швів до 10 мм призводить до зниження середнього термічного опору конструкції приблизно на 20%.

Зазвичай традиційна технологія передбачає нанесення мурувальних розчинів шаром 10...20 мм. Сучасні технології дозволяють виготовляти стінові камені та блоки з мінімальними (до 1 мм) відхиленнями геометричних розмірів від стандартних, що дає можливість використовувати тонкошарову кладку з товщиною шва 1...5 мм і призводить до суттєвої економії розчину. Розчини для тонкошарової кладки повинні мати теплопровідність, яка наближається до теплопровідності пористих стінових матеріалів. Поряд зі зменшенням теплових витрат такі розчини повинні забезпечувати високу адгезію до основи, водо- та морозостійкість.

З метою вивчення впливу факторів складу на міцнісні характеристики полегшених розчинів на основі РПБ, а також встановлення оптимальних параметрів їх виготовлення основні дослідження були виконані із застосуванням математичного планування експериментів. Для цього був реалізований трирівневий трьохфакторний план B_3 [6], умови планування експериментів якого наведені в табл. 2.13.

Як добавка-поризатор розчинів був застосований піноутворювач UFAPORE CC85 виробництва фірми Bang & Bonsomer концерну Мареі. Даний поризатор є сумішшю аніоноактивних ПАР. Рекомендоване дозування добавки при введенні в мурувальні розчини – 0,02...0,05% маси в’яжучого. Окрім пластифікації та підвищення морозостійкості розчину добавка поризатору дещо знижує водовідділення і седиментаційне розшарування розчинових сумішей [3].

Для підвищення ефективності введення суперпластифікаторів, а також при виконанні робіт у холодну

Національний університет
водного господарства
та природокористування

пору року, при температурах нижче 5° С доцільне введення прискорювача тверднення Na_2SO_4.

Таблиця 2.13

Умови планування експериментів при дослідженні поризованих розчинів

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варію-вання
Натуральний вид	Кодований вид	–1	0	+1	
Відношення цементу до заповнювача, (РПБ/Зап.)	X_1	1:3	1:2	1:1	-
Вміст добавки Ufapore у розчині, %	X_2	0,04	0,075	0,11	0,035
Вміст Na_2SO_4, у розчині, % від РПБ	X_3	0	1	2	1

У ході досліджень виготовляли розчини на основі РПБ, у яких в якості заповнювача використовували золу-виносу та кварцовий пісок. Рухомість розчинів становила 180 мм за розпливом на віскозиметрі Суттарда. Для розчинової суміші визначали водов'яжуче відношення, яке забезпечує необхідну рухомість, для отриманих розчинів – середню густину та міцність на стиск зразків-кубів з ребром 70,7 мм, які тверднули у повітряно-сухих умовах у віці 3 та 28 діб згідно з ДСТУ Б В.2.7-126:2011. Основні експериментальні результати досліджень мурувальних поризованих розчинів на основі РПБ наведені в табл. 2.14 та на рис. 2.18…2.21.

Після проведення обробки і статистичного аналізу експериментальних даних отримані математичні моделі у вигляді поліноміальних рівнянь регресії, які наведені в табл. 2.15, і відповідні графічні залежності середньої густини та міцності у віці 3 та 28 діб на рис. 2.19…2.213.

Таблиця 2.14

Експериментальні результати досліджень поризованих розчинів

№	Фактори			В/Ц		ρ_o, кг/м^3		Міцність у віці, МПа, діб				Теплопровідність λ, Вт/(м·К)		Коефіцієнт конструктивної якості ККЯ*	
	РПБ/Зап	Ufaporte, %	Na_2SO_4, %	Заповнювачі											
				Зола	Пісок	Зола	Пісок	Зола		Пісок		Зола	Пісок	Зола	Пісок
								3	28	3	28				
1	1:1	0,11	2	0,4	0,34	1180	1320	8,9	15,4	10,2	17,7	0,32	0,36	0,013	0,013
2	1:1	0,11	0	0,38	0,32	1170	1310	8,1	14,0	9,2	16,0	0,32	0,36	0,012	0,012
3	1:1	0,04	2	0,51	0,43	1340	1490	12,7	21,9	14,7	25,4	0,36	0,41	0,016	0,017
4	1:1	0,04	0	0,5	0,43	1320	1470	11,7	20,1	13,6	23,3	0,36	0,40	0,015	0,016
5	1:3	0,11	2	0,55	0,47	1360	1550	6,1	10,5	7,0	12,1	0,37	0,42	0,008	0,008
6	1:3	0,11	0	0,53	0,45	1350	1540	5,7	9,8	6,5	11,2	0,37	0,42	0,007	0,007
7	1:3	0,04	2	0,66	0,56	1400	1590	7,8	13,4	9,0	15,5	0,38	0,43	0,010	0,010
8	1:3	0,04	0	0,64	0,54	1390	1580	7,0	12,0	7,9	13,6	0,38	0,43	0,009	0,009
9	1:1	0,075	1	0,45	0,38	1210	1370	10,0	17,2	11,4	19,6	0,33	0,37	0,014	0,014
10	1:3	0,04	1	0,65	0,55	1390	1580	7,4	12,7	8,6	14,7	0,38	0,43	0,009	0,009
11	1:2	0,11	1	0,45	0,38	1200	1380	8,4	14,5	9,5	16,4	0,33	0,38	0,012	0,012
12	1:2	0,04	1	0,53	0,45	1290	1470	11,7	20,2	13,6	23,4	0,35	0,40	0,016	0,016
13	1:2	0,075	2	0,5	0,43	1250	1440	10,9	18,8	12,3	21,2	0,34	0,39	0,015	0,015
14	1:2	0,075	0	0,48	0,41	1240	1430	9,9	17,1	11,4	19,7	0,34	0,39	0,014	0,014
15	1:2	0,075	1	0,49	0,42	1250	1450	10,3	17,8	11,7	20,3	0,34	0,39	0,014	0,014
16	1:2	0,075	1	0,5	0,43	1250	1440	10,3	17,7	11,6	20,0	0,34	0,39	0,014	0,014
17	1:2	0,075	1	0,49	0,42	1240	1440	10,2	17,5	11,7	20,1	0,34	0,39	0,014	0,014

* – відношення міцності розчину при стиску у віці 28 діб до його середньої густини

Національний університет водного господарства та природокористування

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Таблиця 2.15

Експериментально-статистичні моделі властивостей поризованих розчинів на основі РПБ

Заповнювач	Експериментально-статистичні моделі	
Середня густина, кг/м^3		
зола	$\rho_{0\,(з)} = 1246–67\cdot x_1–48\cdot x_2+6\cdot x_3–28{,}8\cdot x_1x_2+1{,}3\cdot x_1x_3–$ $–1{,}3\cdot x_2x_3+59\cdot x_1^2+4\cdot x_2^2+4\cdot x_3^2$	(2.1)
пісок	$\rho_{0\,(п)} = 1440–88\cdot x_1–50\cdot x_2+6\cdot x_3–31{,}3\cdot x_1x_2+1{,}3\cdot x_1x_3–$ $–1{,}3\cdot x_2x_3+43{,}5\cdot x_1^2–6{,}5\cdot x_2^2+3{,}5\cdot x_3^2$	(2.2)
Міцність на стиск у віці 3 діб, МПа		
зола	$f_{cm}^{28}{}_{(з)} = 10{,}3+1{,}75\cdot x_1–1{,}36\cdot x_2+0{,}41\cdot x_3–0{,}54\cdot x_1x_2+$ $+0{,}08\cdot x_1x_3–0{,}08\cdot x_2x_3–1{,}64\cdot x_1^2–0{,}25\cdot x_2^2+0{,}09\cdot x_3^2$	(2.3)
пісок	$f_{cm}^{3}{}_{(п)} = 11{,}76+2{,}01\cdot x_1–1{,}64\cdot x_2+0{,}46\cdot x_3–0{,}69\cdot x_1x_2+$ $+0{,}06\cdot x_1x_3–0{,}09\cdot x_2x_3–1{,}79\cdot x_1^2–0{,}24\cdot x_2^2+0{,}06\cdot_{x3}^2$	(2.4)
Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа		
зола	$f_{cm}^{28}{}_{(з)} = 17{,}77+3{,}02\cdot x_1–2{,}34\cdot x_2+0{,}7\cdot x_3–0{,}94\cdot x_1x_2+$ $+0{,}14\cdot x_1x_3–0{,}14\cdot x_2x_3–2{,}83\cdot x_1^2–0{,}43\cdot x_2^2+0{,}16\cdot x_{32}$	(2.5)
пісок	$f_{cm}^{28}{}_{(п)} = 20{,}26+3{,}49\cdot x_1–2{,}78\cdot x_2+0{,}81\cdot x_3–1{,}15\cdot x_1x_2+$ $+0{,}13\cdot x_1x_3–0{,}18\cdot x_2x_3–3{,}15\cdot x_1^2–0{,}4\cdot x_2^2+0{,}15\cdot x_3^2$	(2.6)

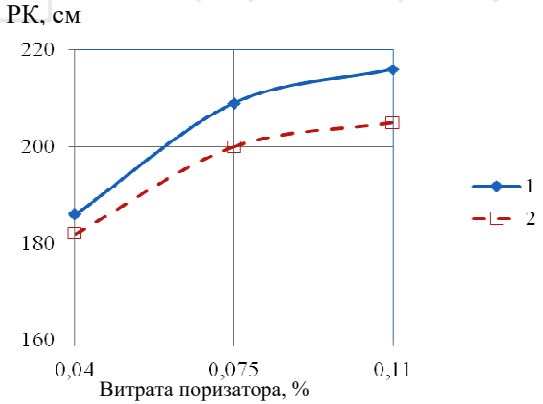


Рис. 2.18. Залежність розпливу конуса(РК) поризованих розчинів від витрати поризатора та виду заповнювача, (1 – заповнювач – зола-виносу; 2 – заповнювач – кварцовий пісок)

Аналізуючи отримані дані, можна відмітити, що поризація розчинів помітно збільшує їх рухомість згідно табл. 2.14 та

Національний університет
водного господарства
та природокористування

рис. 2.18. Водопотреба розчинових сумішей для досягнення необхідної легкоукладальності суттєво зменшується при збільшенні кількості добавки-пороутворювача, але до певної межі, яка залежить від середньої густини отриманої розчинової суміші та співвідношення «РПБ:заповнювач». При однаковому вмісті пороутворювача зменшення співвідношення «РПБ:Заповнювач» від 1:1 до 1:2 незначно зменшує водопотребу розчинової суміші, у якій заповнювачем є зола-виносу. При цьому водов'яжуче відношення дещо збільшується. Подальше збільшення співвідношення «РПБ:Заповнювач» до 1:3 та використання як заповнювача кварцового піску зменшує водопотребу та збільшує рухомість розчинової суміші. Зниження водопотреби при цьому пропорційне збільшенню кількості добавки-пороутворювача та вмісту заповнювача в суміші за інших рівних умов.

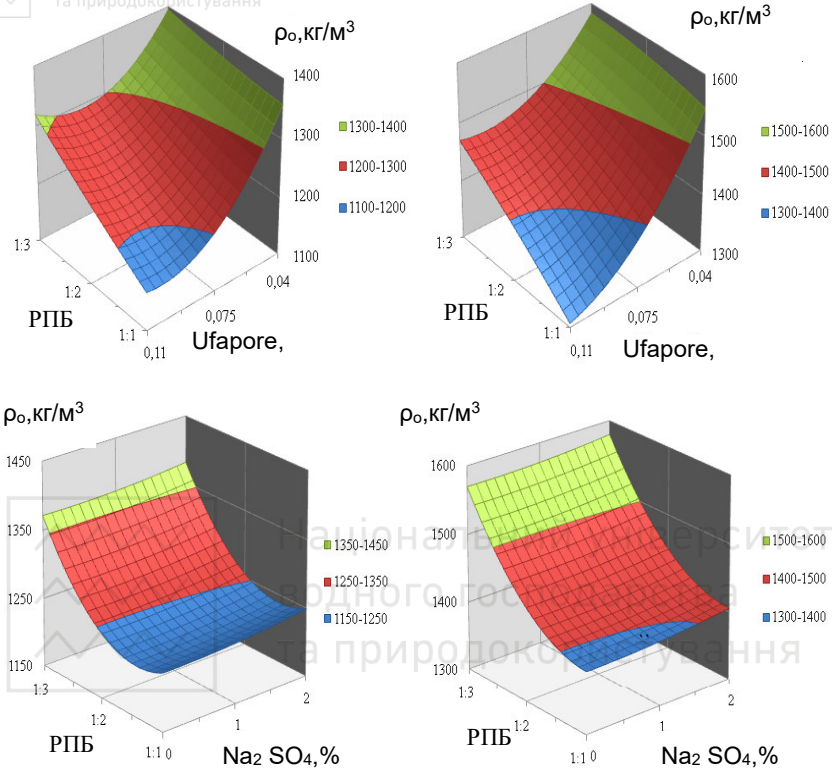
Згідно отриманих математичних моделей (табл. 2.15) та графічних залежностей (рис. 2.19) можна зробити висновок, що основними факторами, що впливають на середню густину, є вміст та доля заповнювача, а також вміст добавки поризатора у розчині. Прискорювач твердіння введений до складу суміші, практично не впливає на густину.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Збільшення вмісту пороутворювача зменшує густину розчину, втім після певної межі (приблизно 0,1% від маси сухої суміші) ефект стає нестабільним. Подальше зменшення густини при використанні прийнятого поризатора практично незначне. З цією метою можна використовувати добавки з більш інтенсивним піноутворенням, хоча при цьому можна очікувати негативного їх впливу на кінетику твердіння та міцність розчинів.

Аналізуючи міцність поризованих розчинів (рис. 2.20, 2.21), можна зауважити, що як і слід було очікувати, вона залежить у першу чергу не від водов'яжучого відношення, а від пористості розчину, яку можна оцінити за середньою густиною. Із збільшенням середньої густини міцність розчину зростає незалежно від складу розчину та виду заповнювача.

Національний університет
водного господарства
та природокористування



а) б)

Рис. 2.19. Поверхні відгуку середньої густини поризованих розчинів на основі РПБ, заповнювач: а – зола-виносу; б – кварцовий пісок

Національний університет
водного господарства
та природокористування

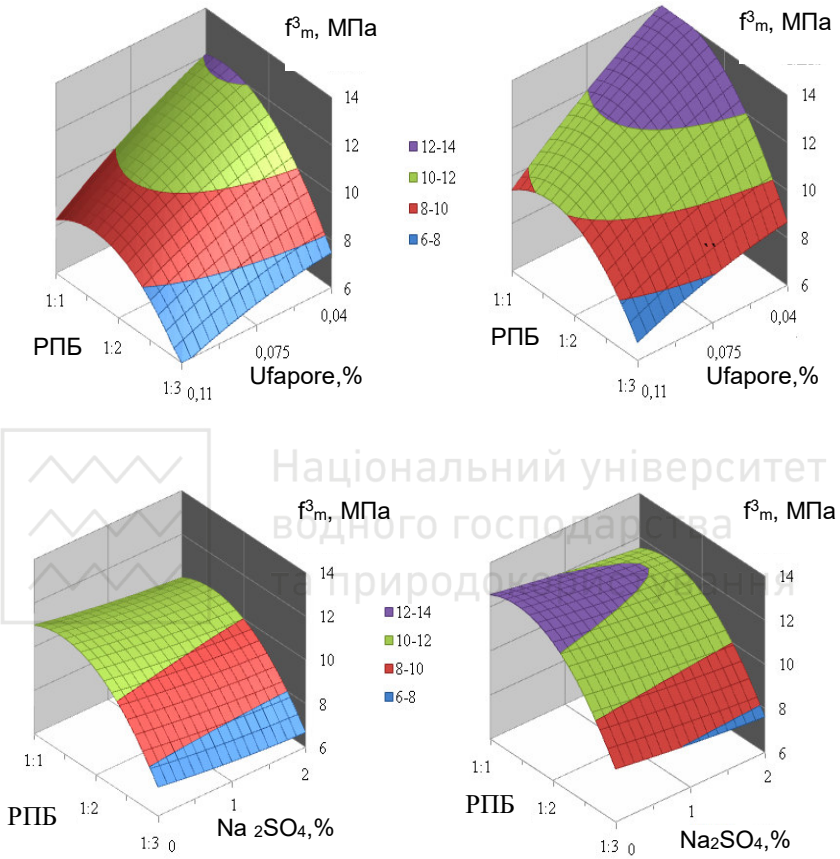
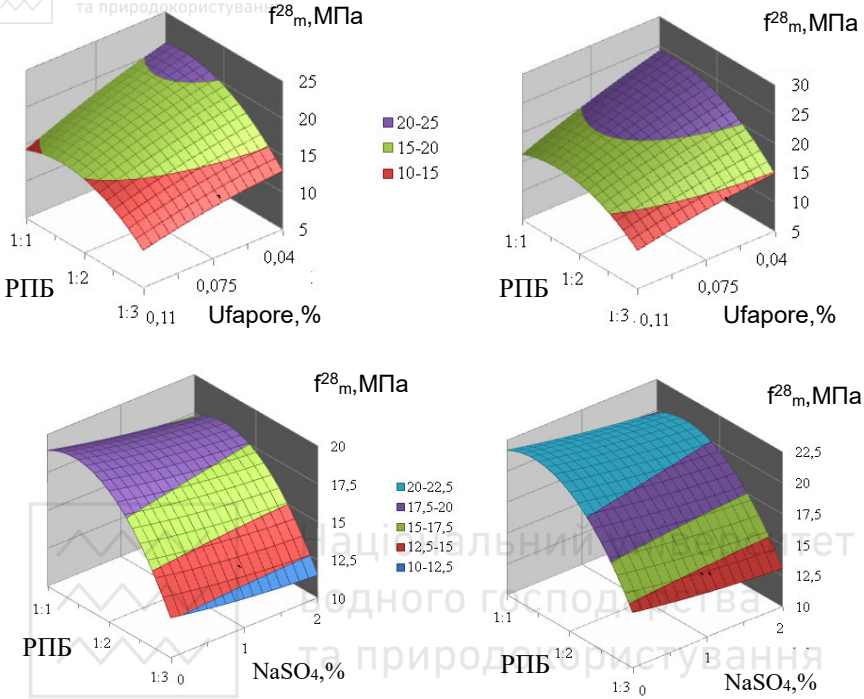


Рис. 2.20. Поверхні відгуку міцності поризованих розчинів у віці 3 діб на основі РПБ, (а) – зола-виносу; б) – кварцовий пісок)

Національний університет
водного господарства
та природокористування



а) б)

Рис. 2.21. Поверхні відгуку міцності поризованих розчинів у віці 28 діб на основі РПБ, заповнювач: а) – зола-виносу; б) – пісок

Для суміші на основі РПБ та золи-виносу характерна середня густина розчинів 1200...1400 кг/м^3 та міцність 13…20 МПа. При цьому збільшення густини з 1200 до 1300 кг/м^3 супроводжується ростом міцності на 20…25%, при співвідношенні суміші «РПБ:Зап»=1:1, подальше збільшення середньої густини не призводить до суттєвого підвищення міцності.. Така ж залежність спостерігається за умови використання в якості заповнювача суміші кварцового піску, в цьому випадку отримують розчини міцністю 15…24 МПа. В свою чергу для цементно-піщаних сумішей середня густина збільшується до 1310...1600 кг/м^3. Поризовані розчини складу

Національний університет
водного господарства
та природокористування

РПБ:Зап=1:2 при збільшенні густини від 1210 до 1450 кг/м^3 характеризуються лінійним збільшенням міцності на 60…70%, максимальним значенням – 20 МПа та 24 МПа для заповнювачів золи-виносу та піску – відповідно. При збільшенні вмісту заповнювача (РПБ:Зап=1:3) маємо лінійне зменшення міцності при однаковій густині на обох видах заповнювачів. Прискорювач твердіння, який вводиться до складу суміші, призводить до росту ранньої міцності на 10…15% та марочної до 10%.

На основі отриманих експериментальних даних (табл. 2.14) були запропоновані склади сухих будівельних сумішей для поризованих розчинів марок М100...М200 з використанням РПБ (табл. 2.16).

Таблиця 2.16

Рекомендовані склади поризованих розчинів на РПБ

№ з/п	Марка розчину	ρ_0, кг/м^3	Вид заповнювача	Витрата, кг, на 1 т СБС			Витрата води при замішуванні, л
				РПБ	Заповнювач	UFAPORE	
1	М200	1500	пісок	285	715	0,4…0,5	100…120
2		1300	зола	350	650	0,4…0,5	140…150
3	М150	1350	пісок	310	690	0,9	110...130
4		1250	зола	300	700	1,1	160...170
5	М100	1200	зола	260	740	0,4...1,0	130...150

Виконані дослідження показали, що пропоновані РПБ доцільно використовувати в якості основи для сухих будівельних сумішей і поризованих розчинів на їх основі. У випадку використання в якості заповнювача золи-виносу міцність розчинів досягається 15...20 МПа при середній густині 1200...1400 кг/м^3 та 20…25 МПа при середній густині – 1350...1550 кг/м^3 і використанні кварцового піску. Для досягнення вказаної середньої густини вміст у сухій суміші пороутворювача UFAPORE CC 85 повинен становити 0,04...0,11%. Введення прискорювача твердіння дозволяє отримати поризовані розчини з міцністю, яка вища на 10% від міцності розчинів без Na_2SO_4.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

2.6. Суміші для наливних підлог на основі РПБ

Для сучасного стану розвитку будівельної індустрії та будівництва на Україні характерне зростання інтересу та попиту на СБС для влаштування наливних підлог [13–15]. Особливістю таких підлог є швидкий набір міцності, що дозволяє експлуатувати їх відразу після вкладання на відміну від цементних композицій для підлог. Класифікація сумішей для влаштування підлог регламентується ДСТУ Б В.2.7-126:2011 «Суміші будівельні сухі модифіковані», згідно цих діючих норм, до підлог ставляться високі вимоги щодо їх міцності – 15–35 МПа, при цьому розтічність розчину для підлог повинна бути не менше 17 см.

Для досліджень використано наступні матеріали: РПБ (ПЦ-І – 35%, зола-виносу – 15%, пісок фр. 0,16…1,25 мм – 50%, суперпластифікатор MELFLUX 2651F), відсіяний кварцовий пісок з розмірами зерен 0,2...0,8 мм, водоутимуюча добавка – «Tylose», технічний хлорид кальцію $CaCl_2 \cdot 2H_2O$. Експерименти виконано згідно вимог ДСТУ Б В.2.7-126:20011.

Для вибору технологічних параметрів виготовлення СБС для підлог, виконано алгоритмізовані експерименти у відповідності з типовим планом $На_5$ [6]. Умови планування експериментів представлені в табл. 2.17, матриця планування – табл. 2.18, результати експериментальних досліджень – табл. 2.19.

Таблиця 2.17

Умови планування експериментів при дослідженні сумішей для наливних підлог

Параметр	Фактор	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
		-1	0	+1	
Пісок/ РПБ, мас	X_1	2	3	4	1
Вміст хлориду кальцію від маси РПБ, %	X_2	2	3	4	1
Вміст Melflux, % РПБ	X_3	0,2	0,4	0,6	0,2
Вміст Tylose, % РПБ	X_4	0,10	0,15	0,20	0,05
Вода/ РПБ,	X_5	0,40	0,45	0,50	0,05

Таблиця 2.18

Матриця планування експериментів На$_5$

№ точки	Кодовані значення факторів					Натуральні значення факторів				
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Пісок/ РПБ	Вміст хлориду кальцію, мас. %	Вміст Melflux 2651F, мас. %	Вміст Tylose, мас. %	Вода/ РПБ
1	+	+	+	+	+	4	3	0,6	0,20	0,55
2	-	-	+	+	+	2	1	0,6	0,20	0,55
3	-	+	-	-	-	2	3	0,2	0,10	0,45
4	+	-	-	-	-	4	1	0,2	0,10	0,45
5	-	+	-	+	+	2	3	0,2	0,20	0,45
6	+	-	-	+	+	4	1	0,2	0,20	0,55
7	+	+	+	-	-	4	3	0,6	0,10	0,45
8	-	-	+	-	-	2	1	0,6	0,10	0,45
9	-	+	+	+	-	2	3	0,6	0,20	0,45
10	+	-	+	+	-	4	1	0,6	0,20	0,45
11	+	+	-	-	+	4	3	0,2	0,10	0,55
12	-	-	-	-	+	2	1	0,2	0,10	0,55
13	-	+	+	-	+	2	3	0,6	0,10	0,55
14	+	-	+	-	+	4	1	0,6	0,10	0,55
15	+	+	-	+	-	4	3	0,2	0,20	0,45

Національний університет водного господарства та природокористування

продовження табл. 2.18

№ точки	Кодовані значення факторів					Натуральні значення факторів				
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Пісок/ РПБ	Вміст хлориду кальцію, мас. %	Вміст Melflux 2651F, мас. %	Вміст Tylose, мас. %	Вода/ РПБ
16	-	-	-	+	-	2	1	0,2	0,20	0,45
17	+	0	0	0	0	4	2	0,4	0,15	0,50
18	-	0	0	0	0	2	2	0,4	0,15	0,50
19	0	+	0	0	0	3	3	0,4	0,15	0,50
20	0	-	0	0	0	3	1	0,4	0,15	0,50
21	0	0	+	0	0	3	2	0,6	0,15	0,50
22	0	0	-	0	0	3	2	0,2	0,15	0,50
23	0	0	0	+	0	3	2	0,4	0,20	0,50
24	0	0	0	-	0	3	2	0,4	0,10	0,50
25	0	0	0	0	+	3	2	0,4	0,15	0,55
26	0	0	0	0	-	3	2	0,4	0,15	0,45
27	0	0	0	0	0	3	2	0,4	0,15	0,50
28	0	0	0	0	0	3	2	0,4	0,15	0,50
29	0	0	0	0	0	3	2	0,4	0,15	0,50

Національний університет водного господарства та природокористування

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Таблиця 2.19

Результати експериментальних досліджень сумішей для самонівельованих підлог згідно матриці Ha_5

№ точ-ки	Розтічність (при витіканні з конусу Віка), мм	Термін придатності, (живучість), хв	Границя міцності, МПа					
			1 доба	3 доби	28 діб	1 доба	3 доби	28 діб
			Згин			Стиск		
1	170	115	3,25	5,41	8,87	5,19	11,20	20,09
2	220	175	3,55	6,01	11,09	7,45	14,76	19,93
3	180	125	3,43	5,21	9,53	5,91	12,14	15,93
4	155	110	2,93	3,33	5,91	3,73	8,46	14,21
5	195	145	3,55	5,39	9,61	6,53	12,94	16,73
6	175	140	2,25	2,43	4,23	2,07	6,02	10,69
7	180	130	3,33	5,31	9,27	5,93	12,12	20,77
8	230	135	3,87	6,35	11,57	7,27	14,76	21,01
9	215	130	4,25	7,53	13,19	8,55	16,30	23,15
10	185	150	2,47	3,53	5,77	3,41	8,30	14,95
11	175	150	2,83	3,61	6,69	4,59	9,76	16,27
12	195	120	3,61	5,29	9,75	5,73	12,20	15,79
13	225	180	4,05	7,11	12,75	7,69	15,14	21,87
14	200	140	3,07	4,19	7,09	4,83	10,38	17,99
15	160	135	2,67	3,47	5,93	3,61	8,48	15,11
16	185	125	3,21	4,71	8,91	5,67	11,84	14,23
17	190	140	3,00	4,20	7,54	4,68	10,17	18,06
18	215	125	3,84	6,24	11,62	7,36	14,59	20,38
19	195	115	3,30	5,40	9,64	6,12	12,47	19,34
20	195	145	3,00	4,50	8,20	5,14	11,05	16,70
21	225	140	3,33	5,73	10,06	6,37	12,98	20,22
22	185	140	2,91	4,23	7,68	4,81	10,34	15,12
23	190	143	3,18	5,05	9,10	5,71	11,88	18,32
24	195	142	3,42	5,29	9,72	6,11	12,52	19,44
25	215	167	3,18	5,05	9,26	5,80	11,28	18,52
26	185	130	3,66	5,83	10,54	6,62	14,08	21,22
27	190	135	3,24	5,13	9,34	5,88	12,15	18,79
28	195	138	3,25	5,41	8,87	5,19	11,20	20,09
29	190	132	3,55	6,01	11,09	7,45	14,76	19,93

Національний університет
водного господарства
та природокористування

На основі експериментальних даних одержані рівняння регресії міцності на згин та стиск самонівельованих наливних підлог на основі РПБ (2.7–2.12):

$$f^{1}_{m.tn} = 3{,}24 - 0{,}42X_1 + 0{,}15X_2 + 0{,}21X_3 - 0{,}12X_4 - 0{,}24X_5 + \\ + 0{,}18X_1^2 - 0{,}09X_2^2 - 0{,}12X_3^2 + 0{,}06X_{42} + 0{,}18X_5^2 + 0{,}02X_1X_2 - \\ - 0{,}03X_1X_3 - 0{,}07X_1X_4 - 0{,}06X_1X_5 + 0{,}09X_2X_3 + 0{,}13X_2X_4 - \\ - 0{,}02X_2X_5 + 0{,}02X_3X_4 - 0{,}05X_3X_5 + 0{,}02X_4X_5 \quad (2.7)$$

$$f^{3}_{m.tn} = 5{,}13 - 1{,}02X_1 + 0{,}45X_2 + 0{,}75X_3 - 0{,}12X_4 - 0{,}39X_5 + \\ + 0{,}09X_1^2 - 0{,}18X_2^2 - 0{,}15X_3^2 + 0{,}04X_4^2 + 0{,}31X_5^2 + 0{,}09X_1X^2 - \\ - 0{,}05X_1\ X_3 - 0{,}08X_1X_4 - 0{,}10X_1X_5 + 0{,}21X_2X_3 + 0{,}19X_2X_4 - \\ - 0{,}04X_2X_5 + 0{,}06X_3X_4 - 0{,}17X_3X_5 + 0{,}03X_4X_5 \quad (2.8)$$

$$f^{28}_{m.tn} = 9{,}34 - 2{,}04X_1 + 0{,}72X_2 + 1{,}19X_3 - 0{,}31X_4 - 0{,}64X_5 + \\ + 0{,}24X_1^2 - 0{,}42X_2^2 - 0{,}47X_3^2 + 0{,}07X_4^2 + 0{,}56X_5^2 + 0{,}25X_1X_2 - \\ - 0{,}16X_1X_3 - 0{,}21X_1X_4 - 0{,}07X_1X_5 + 0{,}35X_2X_3 + 0{,}23X_2X_4 - \\ - 0{,}05X_2X_5 + 0{,}09X_3X_4 - 0{,}22X_3X_5 + 0{,}13X_4X_5 \quad (2.9)$$

$$f^{1}_{m} = 5{,}88 - 1{,}34X_1 + 0{,}49X_2 + 0{,}78X_3 - 0{,}20X_4 - 0{,}41X_5 + \\ + 0{,}14X_1^2 - 0{,}25X_2^2 - 0{,}29X_3^2 + 0{,}03X_4^2 + 0{,}33X_5^2 + 0{,}17X_1X_2 - \\ - 0{,}11X_1X_3 - 0{,}40X_1X_4 + 0{,}05X_1X_5 + 0{,}06X_2X_3 + 0{,}17X_2X_4 - \\ - 0{,}03X_2X_5 + 0{,}06X_3X_4 - 0{,}13X_3X_5 + 0{,}09X_4X_5 \quad (2.10)$$

$$f^{3}_{m} = 12{,}15 - 2{,}21X_1 + 0{,}78X_2 + 1{,}32X_3 - 0{,}32X_4 - 1{,}40X_5 - \\ - 0{,}39X_2^2 - 0{,}49X_3^2 + 0{,}05X_4^2 + 0{,}53X_5^2 + 0{,}34X_1X_2 - \\ - 0{,}16X_1X_3 - 0{,}52X_1X_4 + 0{,}08X_1X_5 + 0{,}11X_2X_3 + 0{,}29X_2X_4 - \\ - 0{,}05X_2X_5 + 0{,}09X_3X_4 - 0{,}24X_3X_5 + 0{,}14X_4X_5 \quad (2.11)$$

$$f^{28}_{m} = 18{,}79 - 4{,}16X_1 + 1{,}32X_2 + 2{,}55X_3 - 0{,}56X_4 - 1{,}35X_5 + \\ + 0{,}43X_1^2 - 0{,}77X_2^2 - 1{,}12X_3^2 + 0{,}09X_4^2 + 1{,}08X_5^2 + 0{,}48X_1X_2 - \\ - 0{,}36X_1X_3 - 0{,}49X_1X_4 + 0{,}09X_1X_5 + 0{,}18X_2X_3 + 0{,}59X_2X_4 - \\ - 0{,}08X_2X_5 + 0{,}12X_3X_4 - 0{,}31X_3X_5 + 0{,}40X_4X_5 \quad (2.12)$$

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Склади сумішей для матриці планування (табл. 2.18) розраховано на 1 л суміші на кожну точку, при цьому враховано, що $\rho_{в'яж.} \approx \rho_п \approx 2{,}80$ кг/л, де $\rho_{в'яж}$ – дійсна густина суміші з РПБ, хлориду кальцію, Melflux 2651F і Tylose. Далі було складено систему рівнянь:

$$\begin{cases} Вода + (Пісок + (в'яжуче)) / 2{,}80 = 1л \\ Пісок / РПБ = x_1 \\ Вода / РПБ = x_5 \end{cases}. \qquad (2.13)$$

При складенні даної системи враховувався той факт, що сумарний об'єм хлориду кальцію, Melflux 2651F і Tylose відносно не значний, і тому зміна витрат цих компонентів по точкам матриці не вплине суттєво на величину $\rho_{в'яж}$ і точність результатів визначення витрат компонентів. Підставляючи в систему (2.13) співвідношення Пісок/РПБ (x_1) і Вода/РПБ (x_5) з даних табл. 2.18 можна визначити величини витрат піску, води і РПБ. Далі, враховуючи значення x_2, x_3 і x_4 (табл. 2.18) можливо розрахувати витрати всіх компонентів.

Графічні залежності міцності при стиску від технологічних факторів приведені на рис. 2.22–2.25, теж, при згині – рис. 2.26. Із зростанням тривалості зберігання міцність при згині розчинів наливних підлог на основі РПБ зростає від 4,5 до 14,3 МПа, а міцність при стиску від 8,5 до 22 МПа; при цьому водов'яжуче відношення становить біля 0,40, а розтічність розчину (при витіканні з конусу Віка), знаходиться в межах 215–230 мм. Характерне сповільнене зростання міцності у перші 3 доби твердіння у нашому випадку може бути подолане за рахунок використання максимальної кількості прискорювача твердіння – хлориду кальцію при одночасному зниженні водопотреби розчину за рахунок застосування суперпластифікатора Melflux 2651F Водоутримуюча здатність суміші для підлог забезпечується шляхом введення ефіру целюлози Tylose 60010 в кількості не менше 0,10%, а необхідний термін придатності розчинів – не менше 30 хв забезпечується термінами тужавлення РПБ, для якого навіть у присутності значних кількостей хлориду кальцію початок тужавлення відбувається не раніше 60 хвилин.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Згідно отриманих даних, розчини на основі сухих сумішей для наливних підлог за основними технічними характеристиками (міцністю, терміном придатності, розтічністю та ін.) можна віднести до групи сумішей для улаштування стяжок та покриттів підлог (СТ1, СТ2, СТ3, ПО1, ПО2, ПО3) у відповідністю з класифікацією сумішей для влаштування підлог.

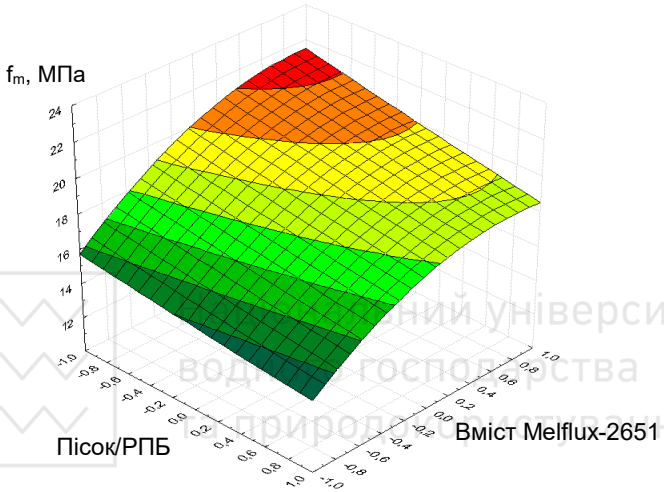


Рис. 2.22. Міцність при стиску розчину для самонівельованих наливних підлог на основі РПБ (X_2=X_4=X_5=0)

Національний університет
водного господарства
та природокористування

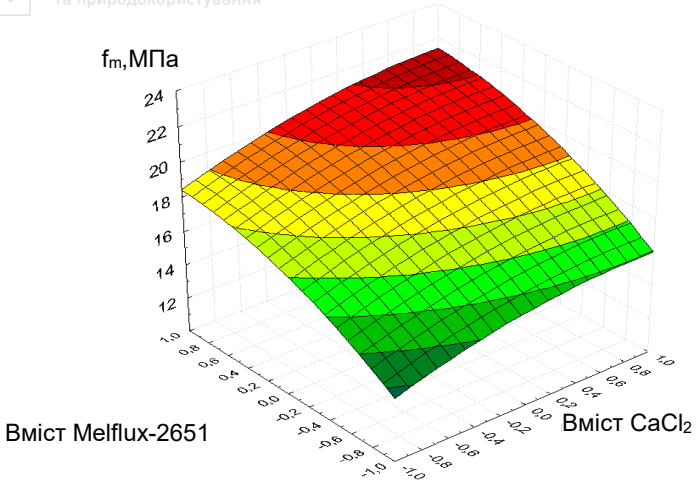


Рис. 2.23. Залежність міцності при стиску розчину для самонівельованих наливних підлог на основі РПБ від вмісту Melflux 2651F (X_3) і вмісту хлориду кальцію (X_2), (X_1= X_4 = X_5 =0)

Національний університет
водного господарства
та природокористування

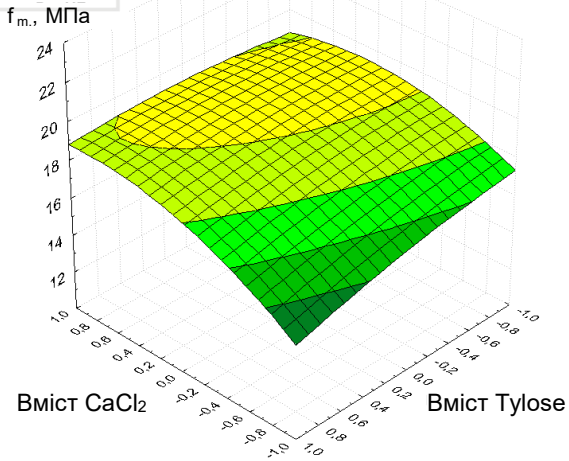


Рис. 2.24. Міцність при стиску розчину для самонівельованих наливних підлог на основі РПБ (X_1= X_3 = X_5 =0)

Національний університет
водного господарства
та природокористування

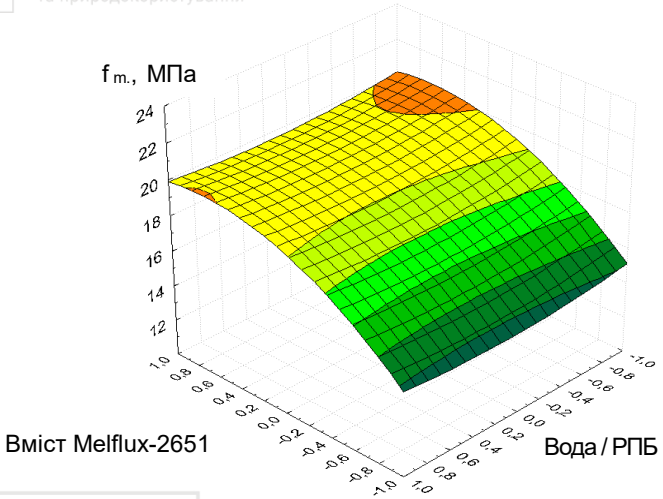


Рис. 2.25. Міцність при стиску розчину для самонівельованих наливних підлог на основі РПБ (X_1= X_2 = X_4 =0)

Національний університет
водного господарства
та природокористування

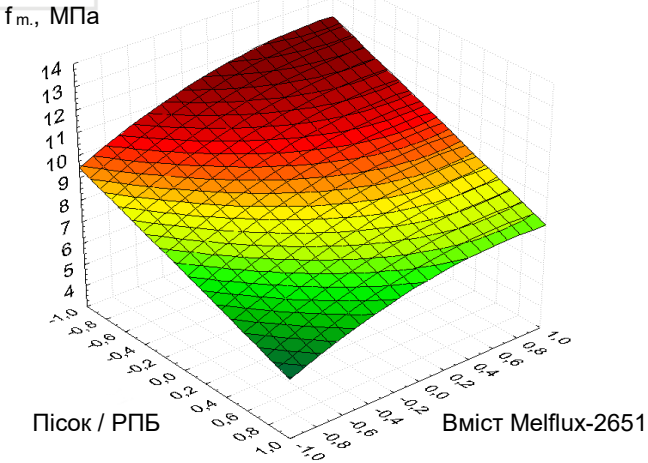


Рис. 2.26. Міцність при згині розчину для самонівельованих наливних підлог на основі РПБ (X_2= X_4 = X_5 =0)

Національний університет
водного господарства
та природокористування

2.7. Сухі бетонні суміші на основі реакційно порошкових бетонів

2.7.1. Склад і властивості керамзитобетонів на основі РПБ

Аналіз наукових робіт в області реакційно-порошкових бетонів та їх виробництв в світовій практиці показує, що їх традиційна орієнтація спрямована на отримання високоміцних матриць.

В сучасному будівництві поряд з високоміцними визначається тенденція до використання енергоефективних будівельних матеріалів і зокрема легких бетонів. Одним з основних видів легких бетонів є керамзитобетони.

Для виконання експериментів були використані поряд з цементно-зольними РПБ, склад якого вказаний раніше, кварцовим піском, також керамзитовий гравій, що мав наступну характеристику: фракція 0…5 мм, насипна густина 690 кг/м^3 (марка 700), водопоглинання – 14,5%, міцність при стисканні у циліндрі – 3,6 МПа (марка П150).

З метою вивчення впливу факторів складу на міцнісні характеристики керамзитобетону, а також встановлення оптимальних параметрів виготовлення таких бетонів, основні дослідження були виконані за допомогою експериментів, алгоритмізованих відповідно до плану B_3 [6]. Умови планування експериментів наведені в табл. 2.20.

Таблиця 2.20

Умови планування експериментів при дослідженні керамзитобетонів

Фактори		Рівні варіювання факторів			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	–1	0	+1	100
Витрата РПБ, кг/м^3	X_1	300	400	500	0,1
В/Ц	X_2	0,3	0,4	0,5	
Об'ємна концетрація керамзиту ,$V_к$	X_3	0,1	0,2	0,3	0,1

В якості вихідних параметрів прийнято міцність керамзитобетону на стиск у віці 7 та 28 діб нормального

Національний університет
водного господарства
та природокористування

твердіння f_{28} та його середня густина $\rho_б$, а також легкоукладальність бетонної суміші.

Основні експериментальні результати досліджень керамзитобетону наведені в табл. 2.21 та на рис. 2.27...2.35.

Таблиця 2.21

Експериментальні результати досліджень керамзитобетону

№. точ.	Склад бетону			Витрата води В, л/м^3	ОК, см	Середня густина, $\rho_б$, кг/м^3	Міцність на стиск, МПа	
	РПБ кг/м^3	В/Ц	$V_к$				7 діб	28 діб
1	500	0,5	0,3	250	18	1380	7,0	18,5
2	500	0,5	0,1	250	22	1500	11,0	24,5
3	500	0,3	0,3	150	7	1350	10,0	22,0
4	500	0,3	0,1	150	9	1550	10,0	24,3
5	300	0,5	0,3	150	8	1320	5,2	13,2
6	300	0,5	0,1	150	11	1490	5,4	13,0
7	300	0,3	0,3	90	0	1330	5,9	15,1
8	300	0,3	0,1	90	1	1500	6,1	16,0
9	500	0,4	0,2	200	16	1455	9,5	18,6
10	300	0,4	0,2	120	4	1410	6,9	16,6
11	400	0,5	0,2	200	14	1460	8,1	16,7
12	400	0,3	0,2	120	4	1415	8,8	17,4
13	400	0,4	0,3	160	8	1325	7,7	16,4
14	400	0,4	0,1	160	10	1545	8,5	18,3
15	400	0,4	0,2	160	9	1425	8,4	17,1
16	400	0,4	0,2	160	10	1430	8,6	17,3
17	400	0,4	0,2	160	9	1435	8,5	17,1

Після проведення обробки і статистичного аналізу експериментальних даних отримані математичні моделі міцності на стиск у віці 7 та 28 діб ($f^7_{ст}$, $f^{28}_{ст}$) та середньої густини (ρ_0) у вигляді поліноміальних рівнянь регресії :

$$\rho_0 = 1436{,}8 + 18{,}5 \cdot x_1 + 0{,}5 \cdot x_2 - 88 \cdot x_3 - 2{,}5 \cdot x_1 x_3 + \\ + 10 \cdot x_2 x_3 - 5{,}54 \cdot x_1^2 - 0{,}54 \cdot x_2^2 - 3{,}04 \cdot x_3^2 \quad (2.14)$$

Національний університет
водного господарства
та природокористування

$$f^{7}_{c,m} = 8,56 + 1,8 \cdot x_1 - 0,41 \cdot x_2 - 0,52 \cdot x_3 - \\ - 0,08 \cdot x_1 x_2 - 0,45 \cdot x_1 x_3 - 0,50 \cdot x_2 x_3 - \\ - 0,38 \cdot x_1^2 - 0,13 \cdot x_2^2 - 0,47 \cdot x_3^2 \quad (2.15)$$

$$f^{28}_{c,m} = 17,37 + 2,31 \cdot x_1 - 0,38 \cdot x_2 - 0,59 \cdot x_3 + \\ + 0,83 \cdot x_1 x_2 - 0,31 \cdot x_1 x_3 - 0,20 \cdot x_2 x_3 + \\ + 0,14 \cdot x_1^2 - 0,44 \cdot x_2^2 - 0,10 \cdot x_3^2 \quad (2.16)$$

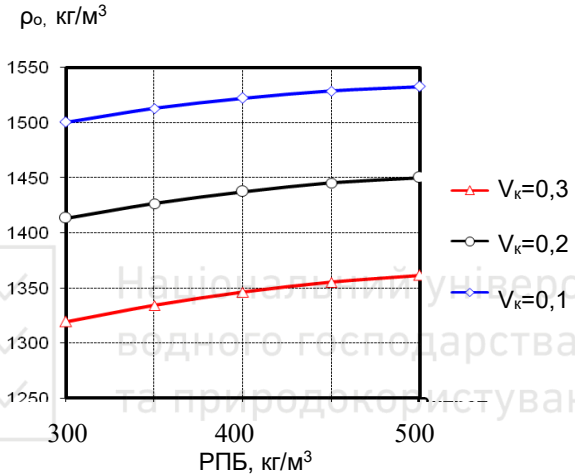


Рис. 2.27. Графік залежності середньої густини керамзитобетонних зразків, при різній об'ємній концентрації керамзиту у бетоні

Аналізуючи графіки, що оримані на основі експериментально-статистичних моделей приходимо до висновку, що найбільший вплив на середню густину керамзитобетону має об'ємна концентрація керамзиту у бетоні. У меншій мірі на середню густину впливає витрата РПБ, зі збільшенням вмісту якого густина керамзитобетону збільшується. Також на середню густину керамзитобетону має вплив вмісту води у бетонній суміші при збільшені якого густина зменшується.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

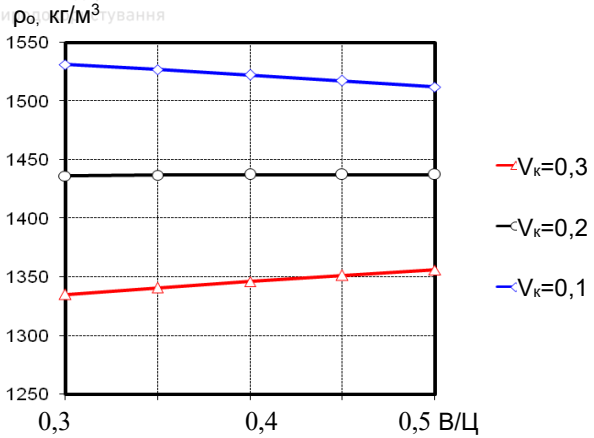


Рис. 2.28. Графік залежності середньої густини керамзитобетонних зразків від В/Ц, при різній об'ємній концентрації керамзиту у бетоні

Національний університет
водного господарства
та природокористування

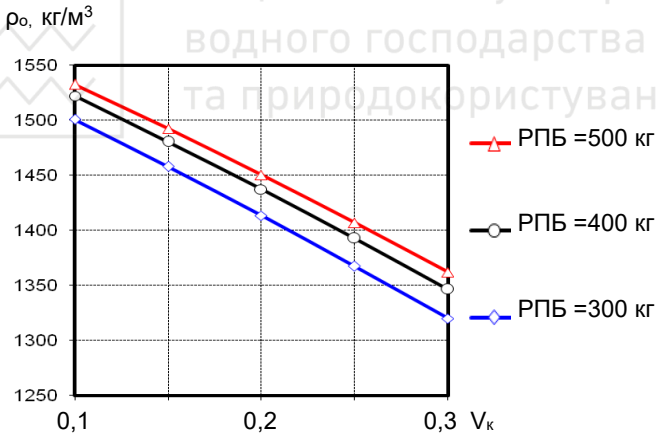


Рис. 2.29. Графік залежності середньої густини керамзитобетонних зразків від об'ємної концентрації керамзиту, при різному вмісті РПБ у бетоні

При більшій об'ємній концентрації керамзиту збільшення вмісту води викликає незначне збільшення густини, оскільки керамзитові зерна вбирають і утримують вологу, затруднюючи випаровування води.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Найбільший вплив на міцність керамзитобетону у ранньому віці (7 діб) має вміст РПБ та керамзиту (об'ємної концентрації) у бетоні (рис. 2.30–2.35). Відповідно при збільшенні вмісту РПБ практично лінійно збільшується міцність керамзитобетонних зразків, а при збільшені вмісту керамзиту у бетоні, міцність зменшується. Витрата води в меншій мірі впливає на міцність, зі збільшенням вмісту води міцність зменшується.

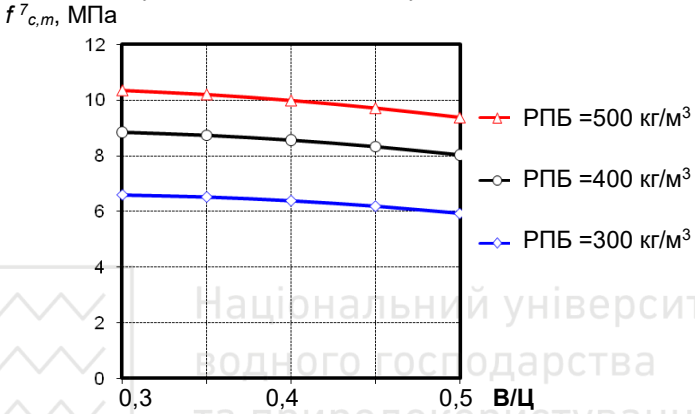


Рис. 2.30. Графік залежності міцності на стиск керамзитобетонних зразків у віці 7 діб від В/Ц, при різному вмісті

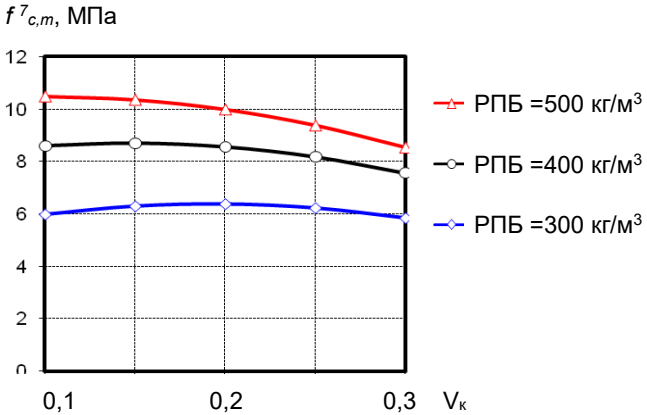


Рис. 2.31. Графік залежності міцності на стиск керамзитобетонних зразків у віці 7 діб від об'ємної концентрації керамзиту, при різному вмісті РПБ у бетоні

Національний університет
водного господарства
та природокористування

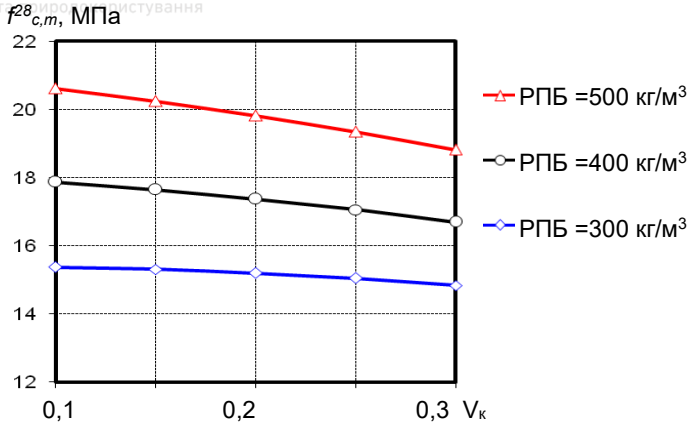


Рис. 2.32. Графік залежності міцності на стиск керамзитобетонних зразків у віці 28 діб від об'ємної концентрації керамзиту, при різному вмісті РПБ у бетоні

Національний університет
водного господарства
та природокористування

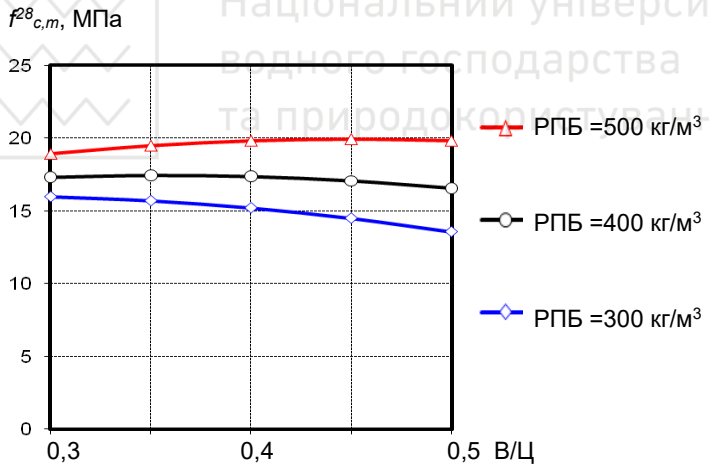


Рис. 2.33. Графік залежності міцності на стиск керамзитобетонних зразків у віці 28 діб від В/Ц, при різному вмісті РПБ у бетоні

Національний університет
водного господарства
та природокористування

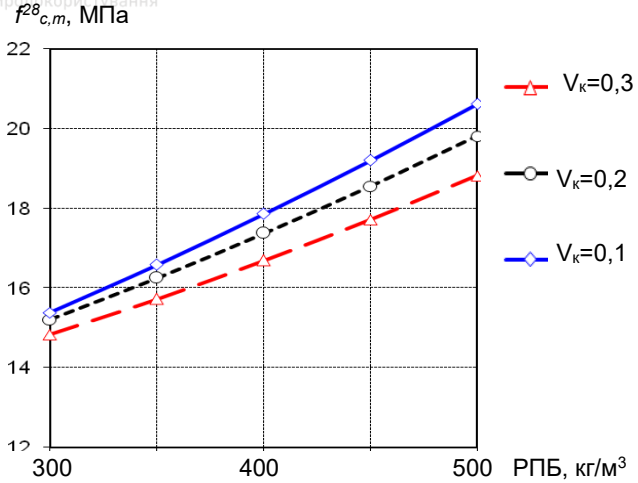


Рис. 2.34. Графік залежності міцності на стиск керамзитобетонних зразків у віці 28 діб від витрати РПБ, при різній об'ємній концентрації керамзиту

Національний університет
водного господарства
та природокористування

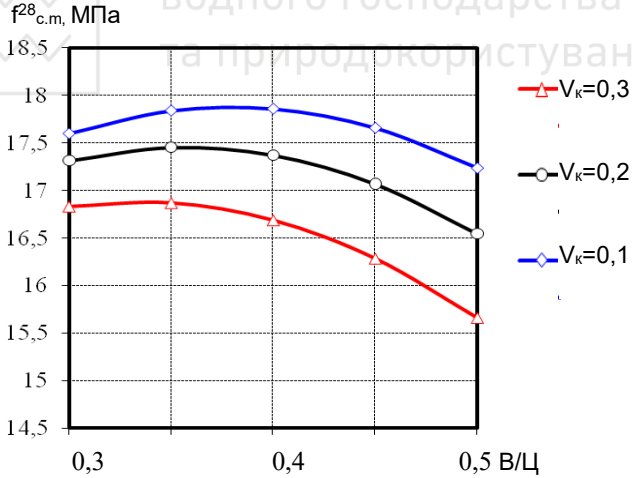


Рис. 2.35. Графік залежності міцності на стиск керамзитобетонних зразків у віці 28 діб від В/Ц, при різній об'ємній концентрації керамзиту

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Аналізуючи графіки, наведені на рис. 2.32–2.35 приходимо до висновку, що найбільш суттєвий вплив на міцність керамзитобетону у віці 28 діб має вміст РПБ. Відповідно при збільшенні частки РПБ у бетоні утворюється більш щільніший каркас, що супроводжує збільшення міцності керамзитобетонних зразків. При цьому більш значний ефект спостерігається при мінімальній об'ємній концентрації керамзиту. В свою чергу кількість керамзиту (об'ємна концентрація) у бетоні також чинить значний вплив на марочну міцність. При збільшені його частки, міцність зменшується оскільки при більшій об'ємній концентрації керамзиту у бетоні утворюється каркас із легкого заповнювача, який саме і руйнується.

В/Ц має неоднозначний вплив на міцність керамзитобетону. Більш суттєвий вплив спостерігається при підвищеній об'ємній концентрації керамзиту $V_к$=0,3, при збільшенні В/Ц з 0,3 до 0,5 міцність зменшується на 10–15%. Однак при зменшенні частки керамзиту до 0,1 міцність суттєво не зменшується.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

2.7.2. Полістиролбетонні суміші на основі РПБ

Нормативне підвищення рівня теплозахисних властивостей зовнішніх стін у три рази і більше призвело до зведення багатошарових стін із внутрішнім або зовнішнім розташуванням малотеплопроводних утеплювачів з полістирольних або мінераловатних плит типу «сендвіч». У той же час така конструкція стін з урахуванням природної мінливості властивостей утеплювачів в період експлуатації і безлічі кріплень, що знижують конструктивну і теплотехнічну однорідність стін до 0,6–0,7 («містки холоду»), потенційно не може бути і не є довговічною. Це викликає необхідність розробки і впровадження в практику будівництва нових матеріалів і конструкцій з високими теплозахисними характеристиками.

До числа найбільш ефективних конструкційно-теплоізоляційних матеріалів можна віднести ніздрюваті бетони і полістиролбетон.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Хороші теплоізоляційні та конструкційні властивості ніздрюватих бетонів поєднуються в них з високою гігроскопічністю, підвищеною усадкою (особливо у неавтоклавних пінобетонах) і обмеженими можливостями обробки поверхні [16; 17].

Полістиролбетон (ПСБ) відрізняється від ніздрюватого бетону в першу чергу властивостями заповнювача. Пінополістирольний заповнювач набагато легше традиційних заповнювачів (керамзиту, перліту, вермикуліту), володіє помітно меншим водопоглинанням і теплопровідністю [18].

Основним недоліком полістиролбетону є розшаровування суміші, яке зумовлене низькою адгезією в'яжучого до пінополістиролу. Ця технологічна проблема зазвичай вирішується введенням до складу суміші кремнеземистого наповнювача. Підвищення густини матеріалу, при цьому, супроводжується погіршенням теплозахисних властивостей. Одним з напрямків вирішення цієї проблеми є використання реакційно порошкових бетонних сумішей з зольним наповнювачем. Особливо ефективним є застосування суперпластифікаторів спільно з високодисперсними мінеральними добавками (у складі РПБ Melflux+зола-виносу), на основі яких можна отримати композиції, що володіють високою міцністю і довговічністю [19]. При цьому ключовим аспектом ефективності мінеральних добавок є їх реакційна здатність, обумовлена хімічним і мінеральним складом, дисперсністю, ступенем аморфності основних сполук – оксидів кремнію і алюмінію [8].

Вплив факторів складу. Визначення впливу витрати РПБ та добавки суперпластифікатора на міцність на стиск та згин, середню густину та на коефіцієнт конструктивної якості полістиролбетону було проведено за допомогою математичного планування експерименту. При цьому був реалізований двохфакторний трирівневий план B_2. В якості варійованих факторів прийняті наступні:

x_1 – витрата РПБ (РПБ, кг/м^3);

x_2 – вміст суперпластифікатора Melflux (СП, % від РПБ).

Умови планування експериментів наведені в табл. 2.22.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Таблиця 2.22

Умови планування експерименту

Фактори		Рівні варіювання факторів			Інтервал варію-вання
Натуральний вид	Кодований вид	–1	0	+1	
Витрата РПБ, кг/м^3	x_1	250	300	350	50
Вміст Melflux, (СП), %	x_2	0,5	1,0	1,5	0,5

У ході досліджень в кожній точці плану для оцінки впливу факторів на міцність та густину полістиролбетону виготовляли стандартні зразки-куби (10×10 см), що тверділи у нормальних умовах. Визначали міцність зразків-кубів на стиск та згин у віці 28 діб. Матриця планування та отримані експериментальні результати представлені в табл. 2.23.

Витрата полістиролу була постійною та становила 0,95 м^3/м^3 бетону

Таблиця 2.23

Матриця планування та експериментальні результати

Кодовані значення факторів		Натуральні значення факторів		Середня густина, кг/м^3	Міцність на згин, МПа	Міцність на стиск, МПа	ККЯ*
x_1	x_2	x_1	x_2				
1	1	350	1,5	545	1,45	3,74	7,11
1	-1	350	0,5	526	1,25	3,49	6,77
-1	1	250	1,5	515	1,00	2,21	4,46
-1	-1	250	0,5	496	0,90	1,96	3,66
1	0	350	1,0	534	1,32	3,57	7,03
-1	0	250	1,0	508	0,91	2,13	3,99
0	1	300	1,5	532	1,40	3,57	6,91
0	-1	300	0,5	517	1,20	2,89	5,53
0	0	300	1,0	523	1,24	3,09	5,89
0	0	300	1,0	525	1,25	3,09	5,93
0	0	300	1,0	522	1,26	3,08	5,91

Примітка. * – відношення міцності бетону на стиску у віці 28 діб до його середньої густини МПа/(кг/м^3)×10^{-3}.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Після проведення обробки і статистичного аналізу експериментальних даних отримані математичні моделі у вигляді поліноміальних рівнянь регресії, які наведені в табл. 2.24.

Таблиця 2.24

Статистичні моделі міцності полістиролбетону

Вихідні параметри	Статистичні моделі
Середня густина, кг/м^3	$\rho = 524 + 14,3x_1 + 8,84x_2 + 3,77x_1^2 + 0,03x_2^2$ (2.17)
Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа	$f_c = 3,13 + 0,75x_1 + 0,2x_2 - 0,32x_1^2 + 0,06x_2^2$ (2.18)
Міцність на згин у віці 28 діб, МПа	$f_{c.tf} = 1,25 + 0,2x_1 + 0,08x_2 + 0,03x_1x_2 - 0,14x_1^2 + 0,04x_2^2$ (2.19)
ККЯ	$ККЯ = 5,97 + 1,47x_1 + 0,45x_2 - 0,11x_1x_2 - 0,56x_1^2 + 0,14x_2^2$ (2.20)

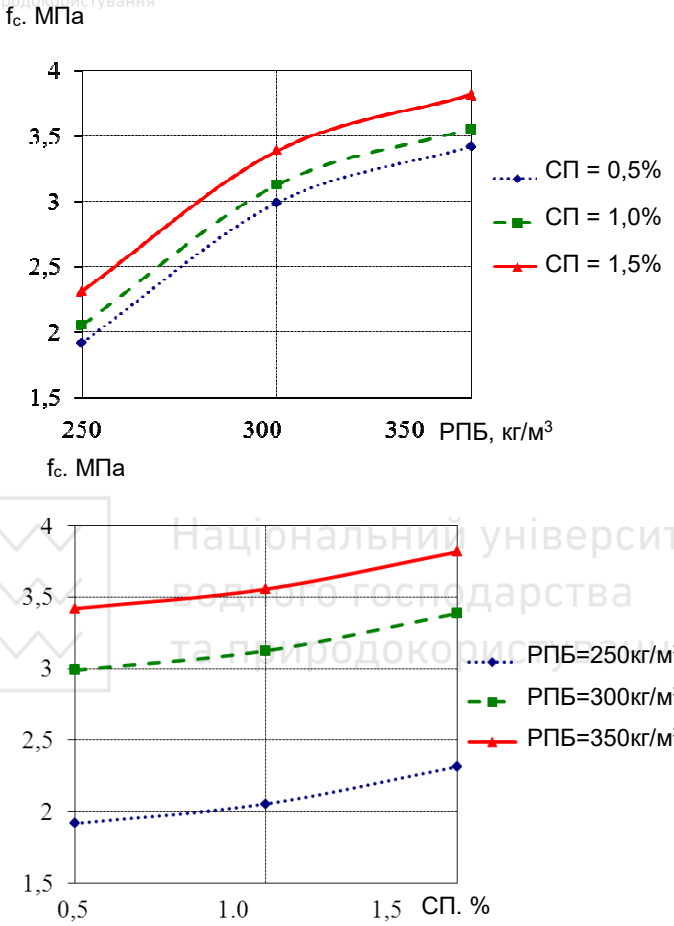
Національний університет
водного господарства
та природокористування

Як і очікувалось, на густину, міцність на стиск та ККЯ більш суттєвим фактором є витрата РПБ.

Графічні залежності, які відображають міцність на стиск, наведені на рис. 2.36, згин – 2.379, середню густину на рис. 2.38, та ККЯ – рис. 2.39.

Аналіз графічних залежностей міцності на стиск та згин свідчить, що збільшення витрати РПБ з 250 кг до 350 кг спричиняє збільшення міцності на стиск та згин на 50…60%. Вміст добавки суперпластифікатора більше відображається на міцності при згині. Максимальна міцність на стиск становить 3,7 МПа та згин 1,45 МПа при максимальній витраті РПБ і вмісті суперпластифікатора.

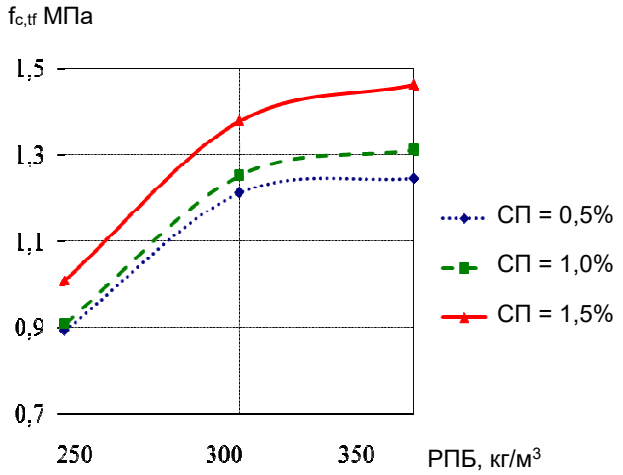
Національний університет
водного господарства
та природокористування

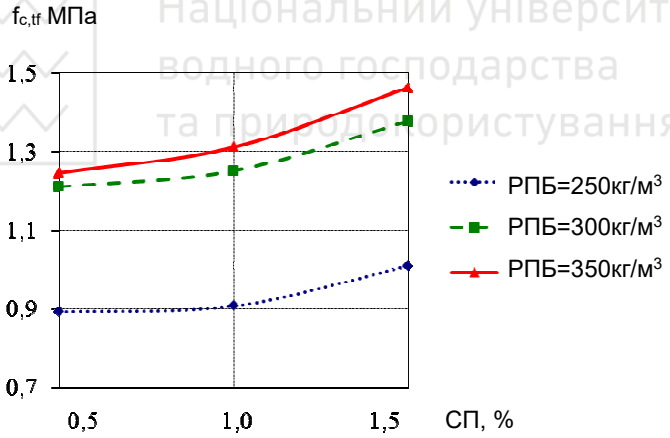


Національний університет
водного господарства
та природокористування

Рис. 2.36. Залежність міцності полістиролбетону на стиск від факторів складу

Національний університет
водного господарства
та природокористування

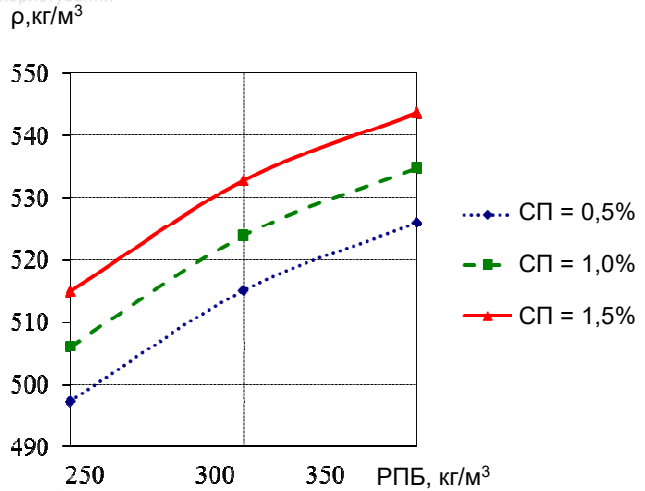


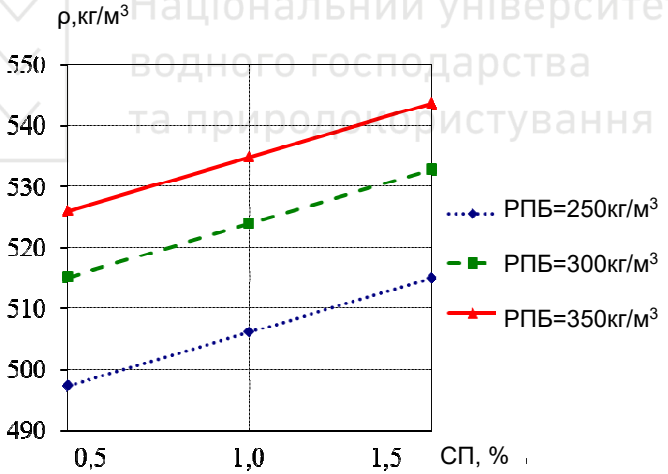


Національний університет
водного господарства
та природокористування

Рис. 2.37. Залежність міцності полістиролбетону на згин від факторів складу

Національний університет
водного господарства
та природокористування





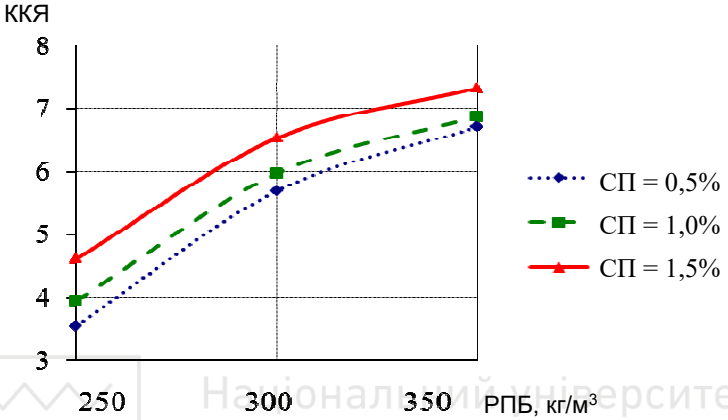
Національний університет
водного господарства
та природокористування

Рис. 2.38. Залежність середньої густини полістиролбетону від факторів складу

Аналіз графічних залежностей, які приведені на рис. 2.38 дозволяє зробити висновок, що збільшення витрати РПБ з 250 кг до 350 кг на 1 м^3 бетонної суміші спричиняє збільшення густини з 495–515 кг/м^3 до 530–545 кг/м^3 незалежно від витрати добавки

Національний університет
водного господарства
та природокористування

суперпластифікатора. Мінімальна густина – 496 кг/м^3 досягається при мінімальній витраті РПБ і добавки. Максимальна – 545 кг/м^3 забезпечується при витраті РПБ 350 кг/м^3 і вмісті суперпластифікатора 1,5%.



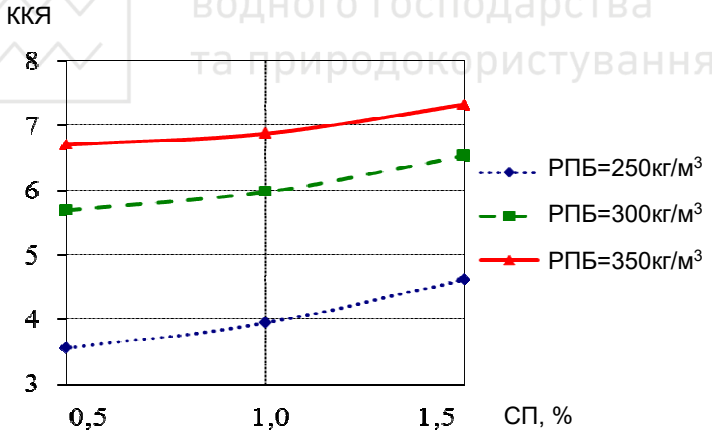


Рис. 2.39. Залежність ККЯ від факторів складу

Аналізуючи графічні залежності, що наведені на рис. 2.39, можна відзначити, що суттєве збільшення коефіцієнта конструктивної якості спостерігається при збільшенні витрати РПБ з 250 кг/м^3 до 300 кг/м^3, подальше збільшення дає

Національний університет
водного господарства
та природокористування

мінімальний ріст ККЯ. Суперпластифікатор має більш вагомий вплив при підвищеному дозуванні (1,0–1,5%).

Вплив хімічних добавок. Для визначення впливу хімічних добавок був реалізований трирівневий трьохфакторний план B_3 [6] експериментів де в якості варійованих були прийняті наступні фактори:

X_1 – витрата РПБ (РПБ, кг/м^3);

X_2 – вміст суперпластифікатора (Melflux, %);

X_3 – вміст повітрявтягувальної добавки (ПВ, %).

Умови планування наведені в табл. 2.25.

Таблиця 2.25

Умови планування експериментів

Фактори		Рівні варіювання факторів			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	–1	0	+1	
Витрата РПБ, кг/м^3	x_1	250	300	350	50
Вміст Melflux, СП, %	x_2	0,5	1	1,5	0,5
Вміст повітрявтягувальної добавки, ПВ, %.	x_3	0,5	1	1,5	0,5

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Визначали міцність зразків-кубів на стиск та згин у віці 28 діб, середню густину та ККЯ. Матриця планування та отримані експериментальні результати представлені в табл. 2.26.

Таблиця 2.26

Матриця планування та експериментальні результати

№	Фактори			Вміст компонентів, кг/м^3			В/Ц	Вода, л	Середня густина, кг/м^3	Міцність, МПа		ККЯ МПа/(кг/м^3) × 10^{-3}
	x_1	x_2	x_3	РПБ	СП	ПВ				при стиску	при згині	
1	1	1	1	350	1,75	5,25	0,42	146	537	3,98	1,75	7,41
2	1	1	-1	350	1,75	1,75	0,42	146	404	3,35	1,39	8,29
3	1	-1	1	350	0,35	5,25	0,42	146	443	3,76	1,58	8,48
4	1	-1	-1	350	0,35	1,75	0,45	159	430	2,47	1,27	5,75
5	-1	1	1	250	1,25	3,75	0,58	146	509	3,12	1,37	6,13

Національний університет
водного господарства
та природокористування

продовження табл. 2.26

№	Фактори			Вміст компонентів, кг/м^3			В/Ц	Вода, л	Середня густина, кг/м^3	Міцність, МПа		ККЯ МПа/(кг/м^3) × 10^{-3}
	x_1	x_2	x_3	РПБ	СП	ПВ				при стиску	при згині	
6	-1	1	-1	250	1,25	1,25	0,64	159	493	2,07	0,87	4,20
7	-1	-1	1	250	0,25	3,75	0,62	156	546	2,31	1,17	4,23
8	-1	-1	-1	250	0,25	1,25	0,62	156	411	1,89	0,82	4,60
9	1	0	0	350	1,05	3,5	0,45	158	418	3,56	1,49	8,51
10	-1	0	0	250	0,75	2,5	0,58	146	520	2,21	1,05	4,25
11	0	1	0	300	1,5	3	0,50	151	483	2,54	1,1	5,26
12	0	-1	0	300	0,3	3	0,51	153	454	2,83	1,28	6,24
13	0	0	1	300	0,9	4,5	0,51	152	462	2,45	0,92	5,30
14	0	0	-1	300	0,9	1,5	0,51	152	474	2,98	1,33	6,28
15	0	0	0	300	0,9	3	0,51	152	470	2,68	1,2	5,71

Статистична обробка експериментальних даних дозволила отримати математичні моделі властивостей полістиролбетону на основі РПБ у вигляді поліноміальних рівнянь регресії, які наведені в табл. 2.27.

Таблиця 2.27

Статистичні моделі міцності та густини полістиролбетону

Вихідні параметри	Статистичні моделі	
Середня густина,кг/м^3	$\rho = 470 + 26,6x_1 + 14,2x_2 - 28,5x_3 + 0,95x_1^2 + 0,15x_2^2 + 0,25x_3^2 + 2,9x_1x_2 - 0,5x_1x_3 + 0,1x_2x_3$	(2.21)
Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа	$f_{c.m} = 2,69 + 0,55x_1 + 0,18x_2 - 0,29x_3 + 0,18x_1^2 - 0,02x_2^2 + 0,01x_3^2 + 0,0x_1x_2 - 0,06x_1x_3$	(2.22)
Міцність на згин у віці 28 діб, МПа	$f_{c.tm} = 1,18 + 0,22x_1 + 0,04x_2 + 0,211x_3 + 0,1x_1^2 + 0,02x_2^2 - 0,04x_3^2 + 0,03x_1x_3 + 0,03x_2x_3$	(2.23)
ККЯ	$ККЯ = 5,8 + 1,5x_1 + 0,2x_2 + 0,25x_3 + 0,52x_1^2 - 0,1x_2^2 - 0,06x_3^2 + 0,04x_1x_3 - 0,16x_2x_3$	(2.24)

Національний університет
водного господарства
та природокористування

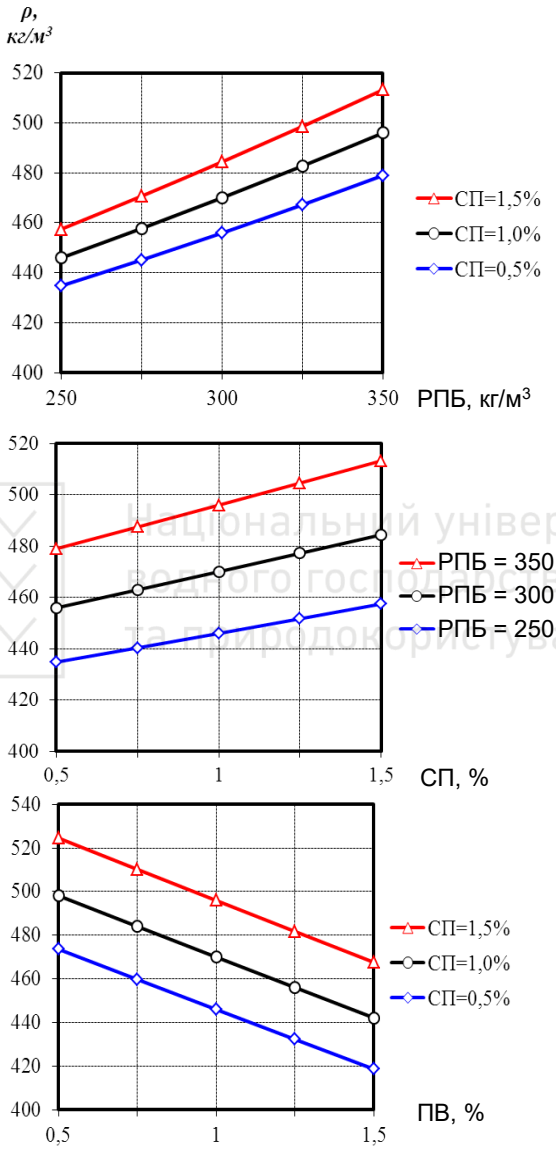


Рис. 2.40. Залежність середньої густини полістиролбетону від факторів складу

Національний університет
водного господарства
та природокористування

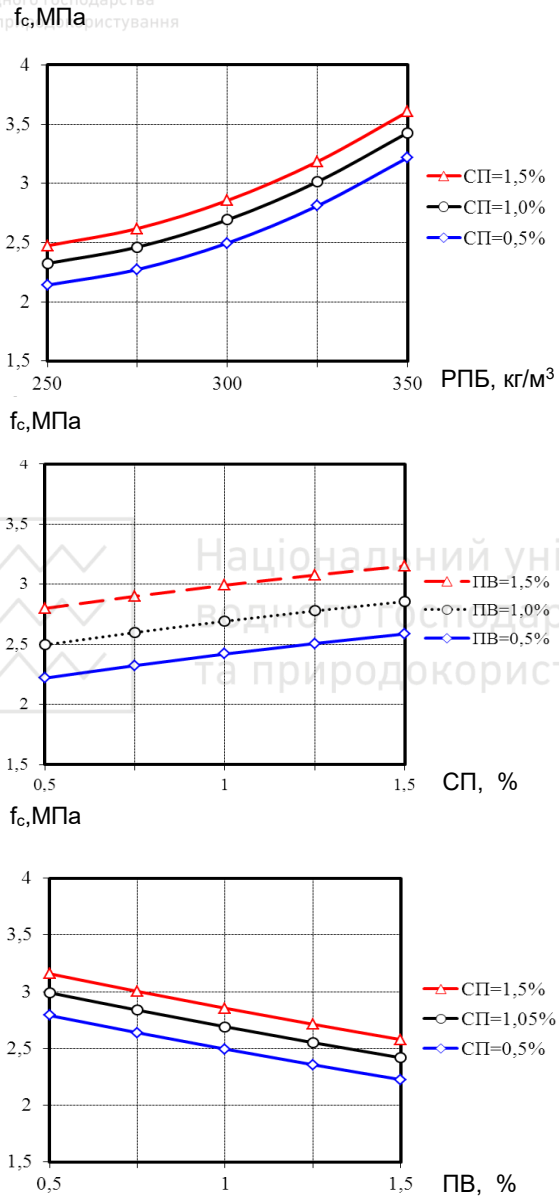


Рис. 2.41. Залежність міцності полістиролбетону на стиск від факторів складу

Національний університет
водного господарства
та природокористування

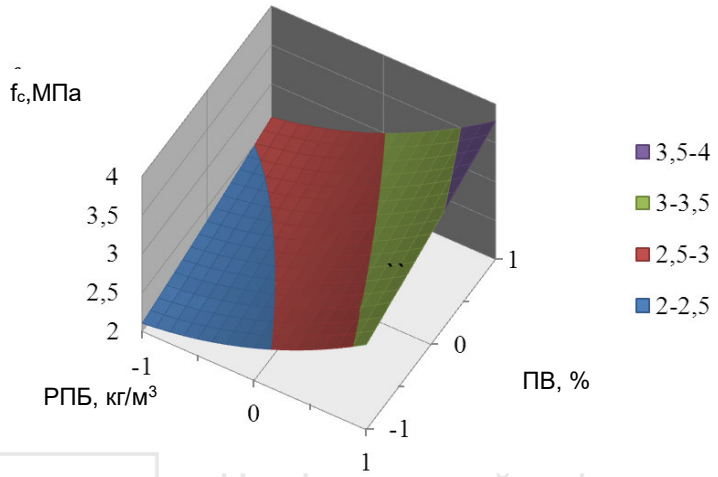


Рис. 2.42. Поверхня відгуку міцності полістиролбетону на стиск від вмісту РПБ та повітрявтягувальної дабвки

Національний університет
водного господарства
та природокористування

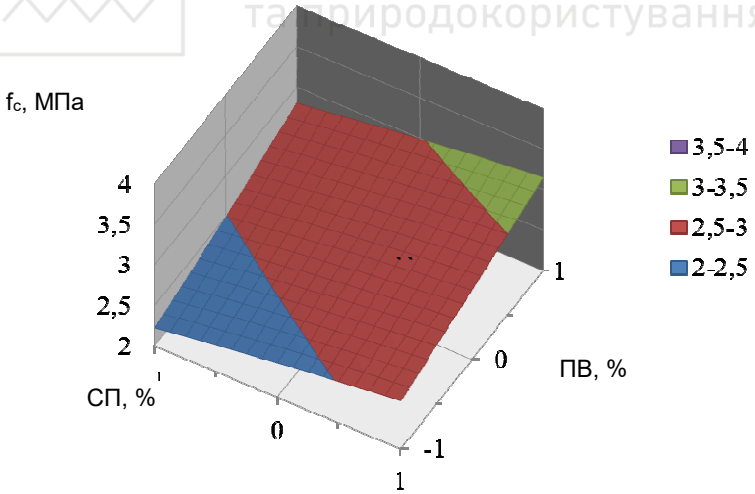


Рис. 2.43. Поверхня відгуку міцності полістиролбетону на стиск від вмісту дабавок

Національний університет
водного господарства
та природокористування

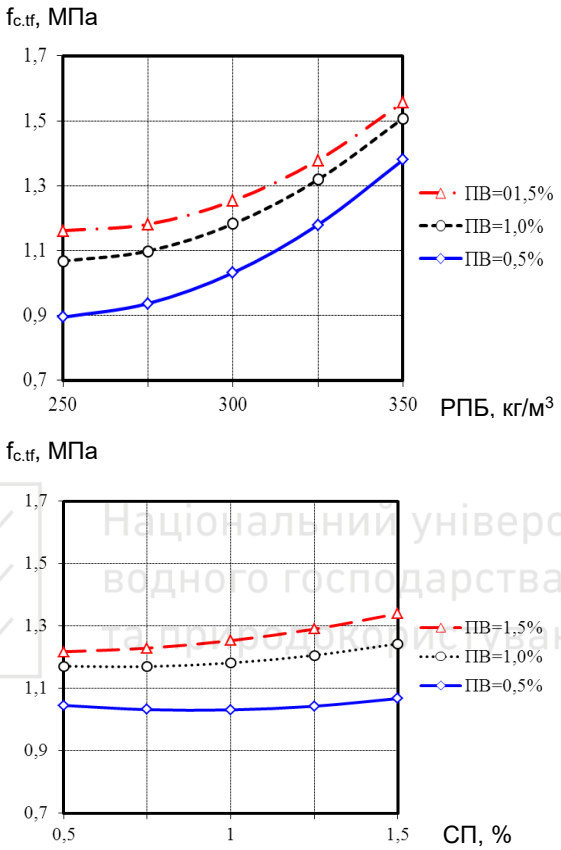
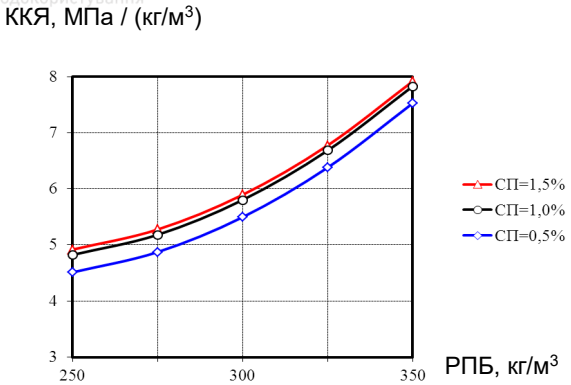
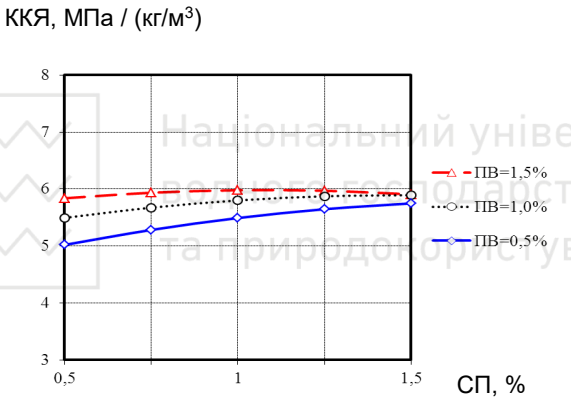


Рис. 2.44. Залежність міцності полістиролбетону на згин від факторів складу

Аналіз отриманих моделей (табл. 2.27) показує, що найбільше на зміну середньої густини полістиролбетону впливають витрата поризатора (фактор x_3) та вміст РПБ (фактор x_1). Звертає на себе увагу досить значний ефект взаємодії факторів x_1 та x_2, який показує, що одночасна зміна цих факторів підсилює їх інтегральну дію. Певна взаємодія є між факторами x_1 та x_3, тобто вмістом добавок, але менш суттєва.

Національний університет
водного господарства
та природокористування





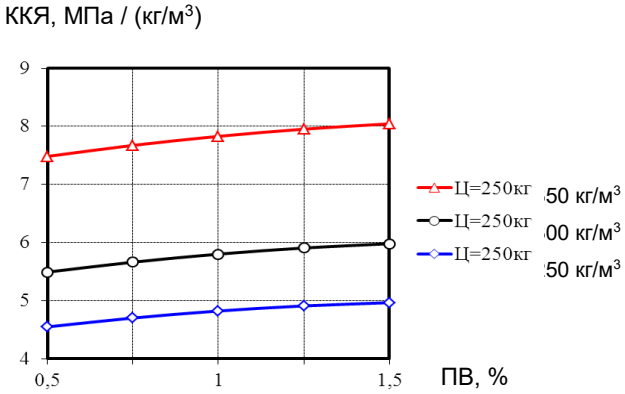


Рис. 2.45. Залежність ККЯ від факторів складу

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Згідно з отриманими поліноміальними моделями міцності у віці 28 діб найбільший вплив мають вміст РПБ та витрата поризатора.

ККЯ залежить в першу чергу від витрати РПБ та в деякій мірі від добавок.

Аналіз графіків, що характеризують середню густину, наведених на рис. 2.40 дозволяє зробити висновок, що збільшення витрати РПБ в досліджуваному діапазоні спричиняє збільшення густини з 435–455 кг/м^3 до 480–515 кг/м^3, при цьому зі збільшенням витрати добавки суперпластифікатора густина підвищується.

Збільшення витрати повітрявтягувальної добавки дозволяє зменшити середню густину до 420 кг/м^3 при мінімальному вмісті РПБ та суперпластифікатора.

Аналіз отриманих графічних залежностей (рис. 2.41) та поверхонь відгуку (рис. 2.42, 2.43), які ілюструють вплив факторів на міцність полістиролбетону на стиск у віці 28 діб свідчить, що збільшення витрати РПБ з 250 кг до 350 кг спричиняє збільшення міцності на стиск з 2–2,5 до 3–3,5 МПа. Збільшення кількості поризатора зумовлює закономірне зниження міцності на 20–25%. Вміст добавки суперпластифікатора більше відображається на міцності при згині.

Згідно з отриманими графічними залежностями можна зробити висновок, що витрата РПБ має найбільш суттєвий вплив на міцність.

Максимальна міцність на стиск становить 3,7 МПа та згин 1,55 МПа при максимальній витраті РПБ і вмісті суперпластифікатора та мінімальному вмісті добавки поризатора.

Суттєве збільшення коефіцієнта конструктивної якості спостерігається при збільшенні витрати РПБ до 350 кг/м^3 (рис. 2.45). Суперпластифікатор та поризатор мають більш вагомий вплив при підвищеному дозуванні (1,0–1,5%).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Реакційно-порошкові бетони і матеріали на їх основі / Дворкін Л. Й., Бордюженко О. М., Житковський В. В., Кочкарьов Д. В., Марчук В. В. Рівне : НУВГП, 2020. 304 с.
2. Рунова Р. Ф., Носовський Ю. Л. Технологія модифікованих будівельних розчинів. К. : Видавництво КНУБіА, 2007. 256 с.
3. Сучасні композиційні будівельно-оздоблювальні матеріали / Захарченко П. В., Долгий Е. М., Галаган Ю. О. та ін. К., 2005. 512 с.
4. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Основы бетоноведения. М. : С-Петербург, 2006. 692 с.
5. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. М., 1998. 768 с.
6. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Житковський В. В. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту. Рівне : НУВГП, 2011. 174 с.
7. В’яжучі речовини / Л. Й. Дворкін, Р. Ф. Рунова, О. Л. Дворкін, Ю. Д. Носовский. Київ : «Основа», 2012. 448 с.
8. Дворкин Л. И., Соломатов В. И., Выровой В. Н. Цементные бетоны с минеральными наполнителями. К. : Будівельник, 1991. 136 с.
9. Дворкін Л. Й., Гоц В. І., Дворкін О. Л. Випробування бетонів і розчинів. Проектування їх складів : навч. посіб. 2014. 397 с.
10. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. Основи бетонознавства. К. : Основа, 2007. 616 с.
11. Стольников В. В. Исследования по гидротехническому бетону. М. : Госэнергоиздат, 1962. 330 с.
12. Стольников В. В., Литвинов Р. Е. Трещиностойкость бетона. М. : Энергия, 1972. 113 с.
13. Сергеев А. М. Полимерные композиции для наливных полов. *Строительные материалы*. 2000. № 3. С. 18–14.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

14. Попов К. Н., Каддо М. Б. Самовыравнивающиеся безусадочные полимерцементные композиции для покрытия полов. *Строительные материалы*. 2000. № 3. С. 42–43.
15. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Риженко І. М. Модифіковані литі бетони для самонівельованих підлог. *Строительные материалы и изделия* : журнал. 2014. № 1. С. 10–12.
16. Горлов Ю. П., Меркин А. П., Устенко А. А. Технология теплоизоляционных материалов. М. : Стройиздат, 1980. 399 с.
17. Горяйнов К. Э., Горяйнова С. К. Технология теплоизоляционных материалов и изделий. М. : Стройиздат, 1982. 376 с.
18. Рахманов В. А. Особо легкий полистиролбетон строительной системы “Юникон”. М., 1997. 264 с.
19. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л., Корнейчук Ю. А. Эффективные цементно-зольные бетоны. Ровно, 1998. 195 с.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Наукове видання

Дворкін Леонід Йосипович
Марчук Віталій Вікторович
Житковський Вадим Володимирович

СУХІ БУДІВЕЛЬНІ СУМІШІ НА ОСНОВІ РЕАКЦІЙНО ПОРОШКОВИХ БЕТОНІВ

Монографія

Технічний редактор *Г. Ф. Сімчук*

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Видавець і виготовлювач
Національний університет
водного господарства та природокористування,
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції РВ № 31 від 26.04.2005 р.