

Національний університет «Полтавська політехніка
імені Юрія Кондратюка»
Навчально – науковий інститут архітектури, будівництва та
землеустрою
Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної магістерської роботи

на тему: **«Дослідження міцності та морозостійкості
важких бетонів з використанням золошлаків
теплових електростанцій»**

Виконав:	Т. В. Страшко
студент групи 601- мБТ спеціальності 192 – будівництво та цивільна інженерія, ОП «Технології будівельних конструкцій, виробів і матеріалів»	
Керівник	О.В. Демченко
Завідувач кафедри	О.В. Семко
Рецензент	Н.М. Лаптева

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1	6
ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	6
1.1 Види зол та золошлакових відходів ТЕС	6
1.2 Особливості будови та структура.....	9
1.3 Особливості котлів з центральнокиплячим шаром	13
1.4 Вплив на властивості бетонної суміші.....	14
1.5 Поняття морозостійкості.....	17
1.6 Параметри, від яких залежить морозостійкість	18
1.7 Гіпотези морозостійкості	18
1.8 Морозостійкість бетонів з використанням золошлаків у якості наповнювача	32
1.9 Закордонний досвід використання зол у бетонах.....	33
РОЗДІЛ 2	36
МЕТА РОБОТИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ,.....	36
ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ	36
2.1 Мета роботи та задачі дослідження.....	36
РОЗДІЛ 3	37
МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	37
3.1 Визначення характеристик вихідних матеріалів	37
3.1.1 Цемент.....	37
3.1.2 Щебінь.....	37
3.1.3 Золошлак.....	37

3.1.4 Пісок.....	38
3.2 Математичне планування експерименту.....	38
3.3 Підбір складу суміші.....	39
3.4 Методика виготовлення зразків.....	40
3.5 Підготовка до випробувань.....	42
3.6 Випробування	42
РОЗДІЛ 4	44
ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ	44
4.1 Цемент.....	44
4.1.1 Тонкість помелу.....	44
4.1.2 Нормальна густина.....	44
4.1.3 Марка за міцністю на стиск	45
4.2 Щебінь.....	45
4.2.1 Насипна густина	45
4.3 Золошлак.....	46
4.3.1 Істина густина	46
4.3.2 Насипна густина	46
4.3.3 Модуль крупності.....	47
4.3.4 Водопотреба.....	47
4.4 Пісок.....	47
4.4.1 Насипна густина	48
4.4.2 Модуль крупності.....	48
РОЗДІЛ 5	51
АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	51
5.1 Результати визначення коефіцієнта ущільнення	51

5.2	Результати визначення середньої густини зразків	58
5.3	Результати визначення водопоглинання	64
5.4	Результати визначення міцності	69
5.5	Результати визначення морозостійкості	77
РОЗДІЛ 6		85
ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ		85
6.1	Аналіз шкідливих і небезпечних факторів, які діють на працюючих	85
6.2	Технічні засоби і організаційні заходи із усунення дії шкідливих і небезпечних виробничих факторів	86
6.2.1	Технічні засоби та організаційні заходи по упередженню можливої дії на працюючих електричного струму	86
6.2.2	Технічні засоби та організаційні заходи по упередженню можливої дії на працюючих пилу	89
6.2.3	Технічні засоби та організаційні заходи по упередженню можливої дії на працюючих вібрації	91
РОЗДІЛ 7		93
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕНЬ		93

ВСТУП

Енергетичний сектор України наразі базується на теплових електростанціях (ТЕС), що працюють на викопному паливі, на які припадає 75 – 80 % загального обсягу виробництва електроенергії. Очікується, що у розвитку теплової енергетики домінуватиме вугілля, яке у 2030 році становитиме 85,1 % у структурі паливного балансу. Спалювання вугілля для виробництва теплової та електричної енергії на теплових електростанціях призводить до утворення значної кількості золи та шлаку. В Україні щороку теплові електростанції (ТЕС), а також котельні, теплоелектроцентралі та численні інші підприємства виробляють близько 30 мільйонів тонн золошлаків, що є серйозною екологічною проблемою. У всьому світі щорічно утворюється близько 700 мільйонів тонн золошлакових відходів.

Бетон є невід’ємною частиною будівельною промисловості. Проблемою при застосуванні відходів ТЕС для виготовлення бетонів є їхня дрібнодисперсність, яка повинна різко збільшувати сумарну питому поверхню, а отже і кількість необхідної води замішування. Так, в свою чергу збільшується В/Ц. такий бетон буде мати занадто високу пористість. Проте, зола та золошлаки ТЕС завдяки особливостям своєї будови чинять додаткову пластифікуючу дію та сприяють кращому розподіленню води у бетонній суміші [28]. До того ж у поєднанні з органічними пластифікаторами створюється особливий органо-мінеральний комплекс, який також володіє певним рядом позитивних властивостей [31].

Золи ТЕС при введенні їх у бетонну суміш завдяки своїй дисперсності виконують роль мікронаповнювача, ущільнюючи кінцевий продукт, за рахунок заповнення об’ємів пустот між зернами піску та щебеню. Щільна структура дозволяє значно зменшити пористість виробу та його водопоглинання. Тобто одним із способів безпечної утилізації золошлакових відходів є використання їх у будівельній галузі для виробництва різноманітних матеріалів.

РОЗДІЛ 1

ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

Ідея використання зол та золошлаків ТЕС у будівельній промисловості не є новою. Існує декілька напрямків використання вищезазначених відходів. Деякі автори рекомендують замінити золами частину цементу у бетоні, інші – в якості дрібних та мікронаповнювачів. Остання галузь застосування є найбільш цікавою з точки зору теми даної магістерської роботи.

Спосіб використання в першу чергу залежить від властивостей конкретних зол та золошлаків.

1.1 Види зол та золошлакових відходів ТЕС

Золошлакові відходи отримують при спалюванні твердого палива на ТЕЦ та ТЕС. Кам'яне вугілля, що його найчастіше використовують на теплових електростанціях, містить у середньому 80-90% вуглецю, 5-20% мінеральних речовин та 0,5 % сірки [3].

Вугілля подрібнюється до пилоподібного стану та з допомогою нагрітого повітря нагнітається у спалювальну камеру котла. В залежності від типу камери розрізняють сухе спалювання та спалювання з рідким шлаковидаленням.

Залежно від виду спалюваного вугілля, способу спалювання, температури факела, способу золовидалення, збору і зберігання золи на ТЕС утворюються наступні види золошлакових відходів:

- Зола-винесення при сухому золовидаленні з осадженням частинок золи в циклонах і електрофільтрах і накопиченням в силосах;
- паливні шлаки при повному плавленні мінеральної частини палива, осадженні розплаву в нижній частини топки котла і грануляції розплаву водою аналогічно придоменної грануляції доменних шлаків;

– золошлакова суміш - механічна суміш золи та шлаку. Співвідношення між ними залежить від виду палива та технології його спалювання.

На рисунку 1 можна побачити класифікацію зол в залежності від місця осадження та відбору [7]:

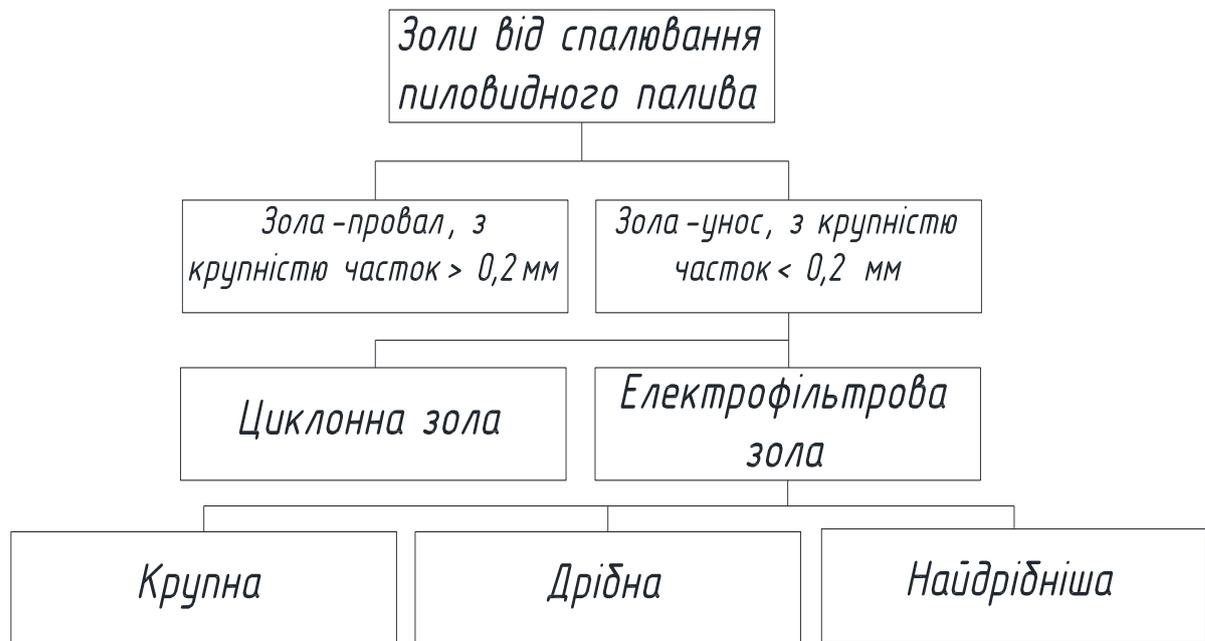


Рисунок 1.1 Класифікація зол в залежності від місця осадження та відбору.

Зольність палива залежить від вмісту мінеральної частини та коливається у наступних межах: для вугілля – 15-35 мас.%; горючих сланців – 39-46 мас.%; торфу – 11-14 мас.% [28].

Золи пиловидного спалювання проходять більш високу температурну обробку, мають порівняно однорідний хімічний склад та менший вміст неспалених частинок палива [28].

Найбільш крупні частинки палива осідають на дні топки, де їх горіння продовжується до повного вигорання палива. В топках з рідким шлаковидаленням мінеральна частина переходить в полум'яно-рідкий стан (розплав) і зливається у спеціальний приямок з водою. В результаті швидкого охолодження отримується матеріал скловидної структури – паливний шлак ТЕС, який майже не містить неспалених часток вугілля (до 1 мас. %) [28].

Більшість діючих ТЕС використовують систему гідровидалення для транспортування золи у відвали. Проте для широкого застосування цього відходу у будівництві кращим є пневмовидалення, так як дозволяє постачати золу споживачам у сухому вигляді, з меншим вмістом несплених часток та запобігати їй замерзанню у відвалах взимку [28].

Золи та золошлаки подібні за своїм мінеральним складом до палива, яке використовувалося. Так, наприклад, мінеральний залишок від спалювання горючих сланців - сланцева зола - являє собою вторинний продукт - відхід, що виходить на теплових електростанціях, які використовують диспергований горючий сланець в якості технологічного палива. Використовувана в цементній технології зола вловлюється в системах знепилювання, насамперед у електрофільтрах, і, таким чином, відноситься до групи матеріалів, які називаються в технології цементів «летюча зола-винесення».

Головною перевагою сланцевої золи як активної мінеральної добавки є значне, на 10-20%, зниження водопотреби відповідних твердіючих систем у порівнянні з бездобавочними або такими, що включають інші додаткові компоненти, і на цій основі підвищення міцності і поліпшення інших технологічних властивостей. Походження цього ефекту пов'язано зі сферичною формою тонких мінеральних часток, а також наявністю у вихідному складі золи дрібнодисперсних активаторів твердіння - вільного або гідратного CaO , а також сульфатів кальцію [28].

Склад сланцевої золи включає в себе мінерали портландцементного клінкеру - до 10% двокальцієвого силікату (2CaO SiO_2), до 2% трикальцієвого алюмінату ($3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$), крім того, близько 30% склоподібної фази, до 17% сульфатів кальцію, близько 30% нерозчинного залишку, до 11% вільного, незв'язаного оксиду кальцію CaO .

Валовий хімічний склад сланцевих зол містить крім головних клінкероутворювальних оксидів SiO_2 , Al_2O_3 , FeO_3 , CaO , також до 11% SO_3 , до 7% $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$, 2,5-3% MgO [3].

Способів введення сланцевої золи в твердіючі системи два. По-перше, в якості активної мінеральної добавки в цемент через спільний помел компонентів портландцементу. По-друге, при безпосередньому введенні золи в бетонну суміш або іншу твердіючу систему на основі портландцементу. При другому способі з'являються додаткові можливості самостійного модифікованого варіювання відсотка його введення [3].

Стандартизоване дозування сланцевої золи в портландцемент знаходиться в межах 6-20%. У європейському стандарті EN 197-1 є також різновид портландцементу з обпеченим сланцем СЕМ II В-Т, в якому вміст добавки може перебувати в межах 21-35%.

В цілому сланцева зола є високоефективним активним компонентом як в складі цементів, так і при самостійному введенні її в розчини та бетони [10]. Досвід використання сланцезольного портландцементу в таких виробках, як дорожні бетонні об'єкти, попередньо напружені залізобетонні конструкції, та інших, підтверджує високі техніко-технологічні якості в'язучих систем з використанням сланцевої золи [15].

За способом видалення розрізняють золу сухого відбору (зола-винесення) і мокрою відбору (зола гідровидалення). При сухому видаленні золи великі частки уловлюються циклонами, дрібні - електрофільтрами. При цьому на кожному полі електрофільтру збирається певна фракція золи.

1.2 Особливості будови та структура

Основним критерієм, що визначає здатність золи та шлаку проявляти в'язучі властивості, є наявність кальцію у вільному або зв'язаному вигляді. Використовують поділ зол на два фундаментальних класу: кислі (багаті на SiO_2) і основні (багаті на CaO).

Кремениста (кисла) зола-винесення - тонкодисперсна пил, що складається в основному з сферичних часток з пуцоланові властивості. Складається в основному з реакційноздатних діоксиду кремнію SiO_2 та оксиду алюмінію Al_2O_3 . Залишок містить оксид заліза Fe_2O_3 та інші сполуки. Масова частка

реакційноздатного оксиду кальцію CaO в застосовуваних золах-винесення - менше 10%, а масова частка вільного оксиду кальцію CaO - не більше 1%. Масова частка реакційноздатного SiO_2 - Не менше 25%.

Основна зола-винесення – тонкодисперсний пил з гідравлічними і (або) пуцоланічними властивостями. Вона складається в основному з реакційноздатних оксиду кальцію CaO , діоксиду кремнію SiO_2 і оксиду алюмінію Al_2O_3 . Залишок містить оксид заліза Fe_2O_3 та інші сполуки. Масова частка реакційноздатного оксиду кальцію CaO в застосовуваних золах-винесення - не менше 10%. Багаті вапном золи-винесення з вмістом реакційноздатного CaO від 10% до 15% за масою містять не менше 25% реакційноздатного SiO_2 [7].

Хімічний склад залишків від спалювання вугілля представляє в основному SiO_2 і Al_2O_3 . Крім того, до складу оксидів входять також Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , SO_3 та ін. Мінерально-фазовий склад включає неорганічну і органічну складові. Неорганічна фаза, в свою чергу, складається з складових:

- аморфної, представленої склом і аморфізованою глинястою речовиною;
- кристалічної, що включає слабкозмінені зерна мінералів вихідного палива (кварц, польові шпати та інші термічно стійкі мінерали) і кристалічні новоутворення, що виникли при спалюванні палива (мулліт, гематит, алюмосилікат кальцію і ін.) [10,11,28].

За своїм хімічним складом більшість зол теплових електростанцій України відносяться до кислих [28].

Небажаними домішками у складі золи можна вважати сірку, вільне вапно та оксид магнію, лужні оксиди натрію та калію, неспалені частинки вугілля [43].

Згідно з [10] основним компонентом зол є скловидна алюмосилікатна фаза, її вміст складає 40-65 % та має вид часток шароподібної форми з розмірами до 100 мкм.

Скло в золах може бути силікатної, алюмосилікатного і залізисто-алюмосилікатного складу.

Аморфізовані глинисті речовини - метакаолін і слабкospечена аморфізована глиниста речовина, а також спечені і частково оскловані частинки - визначають хімічну активність золи, форму і характер поверхні зольних частинок. Частинки більшості зол мають сферичну форму і гладку оскловану фактуру поверхні. Однорідність часток різна. Більш однорідні частинки, що складаються повністю зі скла. Є частинки, внутрішня частина яких не розплавилася і складається з найдрібніших мінеральних і коксових зерен. Зустрічаються і порожнисті кульки в результаті спучування скла в момент утворення частинки. Розмір частинок - від декількох мікрон до 50-60 мікрон. Можуть також утворюватися склоподібні частки неправильної форми. У деяких частинок поверхня губчаста через різної кількості бульбашок. Вони також можуть містити у внутрішній частині велику кількість кристалічних речовин [10]. При недостатньо високій температурі згоряння палива і високої тугоплавкості його зольної частини утворюються золи, що складаються з аморфізованої глинястої речовини, представленої пористими частинками неправильної форми. Ці частинки мають високе водопоглинання. У великих фракціях золи містяться агрегати, що утворилися в результаті спікання безлічі дрібних зерен. Вони неоднорідні і мають низьку міцність [3].

Скло в золах [10] можна розглядати як матеріал, що містить аморфіти – утворення, що по своєму складу та структурі наближаються до відповідних кристалічним фазам, але з високою питомою поверхнею, - та невпорядковані глиноземисто-кремнеземисті прошарки між ними. Здатність скловидної фази до гідратації та гідролізу пояснюється рихлою субмікроструктурою та відносно високою проникністю аморфітів, що забезпечується порожнинами між іонними угрупованнями. Активність проміжної аморфної речовини скловидної фази визначається співвідношенням глинозема та кремнезема, чим воно вище тим легше йде процес гідратації зольного скла у лужному та сульфатно-лужному середовищі. На гідравлічну активність кальцієво-алюмосилікатного скла позитивно впливають домішки оксидів магнію, заліза, та деяких інших елементів.

При значному вмісті карбонатів в мінеральній частині вихідного палива при впливі високих температур у складі золи утворюються переважно силікати, алюмінати та ферити кальцію. Такі золи при затворенні їх водою здатні тужавіти та самостійно тверднути, тобто відрізняються гідравлічними властивостями [12].

Певною гідравлічною активністю в золах, поряд із скловидною фазою, володіє дегідратована та аморфізована глиняста речовина. Активність залежить від мінералогічного складу глин, що входять в мінералогічну частину палива та підвищується при тепловій обробці. При підвищенні вмісту в золі аморфізованої глинястої речовини підвищується її водопотреба.

Важливою характеристикою золи є її дисперсність, яка виражається, зазвичай, питомою поверхнею. Відомо також, що підвищений вміст неспалених рештків палива суттєво підвищує питому поверхню, значення якої, як правило, знаходиться у межах 1000-4000 см²/г, і наближається, по цьому показнику, до портландцементу [10].

Шлаки в порівнянні з золами містять менше органічних залишків і аморфізованих глинистих речовин, але більше склофази (до 95%). Обумовлено це тим, що шлаки більший час знаходяться у високотемпературній зоні топки. Кристалічна фаза в них представлена кварцом, мулітом, магнетитом і т.д. Найважливішими фізичними властивостями золошлакових матеріалів є зерновий склад, насипна і справжня щільності, водонасичення і здатність до морозного спучування. Зерновий склад визначається видом палива, його підготовкою до спалювання, режимом спалювання, способом вловлювання золи, місцем відбору [10].

Паливні золи і шлаки, як правило, не здатні безпосередньо взаємодіяти з водою. Це характерно лише для зол, що містять вільні оксиди кальцію і магнію. Аморфні компоненти зол і шлаків володіють пуцолановою активністю, тобто здатністю зв'язувати при звичайних температурах гідроксид кальцію, утворюючи нерозчинні сполуки. При їх накопиченні з'являється можливість гідравлічного твердіння в'яжучих із сумішей вапна або портландцементу з золою або шлаком [7]. Пуцолановою активністю в складі зол

і шлаків володіють продукти випалу глин: аморфізованих глиниста речовина типу метакаолініта, аморфні SiO_2 і Al_2O_3 і алюмосилікатні скло. Реакційна здатність по відношенню до гідроксиду кальцію у них різна і залежить від температурних перетворень каолінітових глин при спалюванні палива. Володіючи великою питомою поверхнею метакаолін $\text{Al}_2\text{O}_3 \times 2\text{SiO}_2$ активно реагує з $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при звичайних температурах з утворенням гідросилікатів кальцію і гідрогеленіту [10]. Активно утворюються при більш високих температурах аморфних SiO_2 і Al_2O_3 помітно менше, що пояснюється різким зниженням питомої поверхні внаслідок спікання і кристалізації новоутворень – мулліту, крістобалліту [7,10]. Високотемпературне спікання і плавлення глинистих мінералів різко знижують їхню питому поверхню і відповідно активність. Внаслідок цього склофазы зол і шлаків малоактивні при звичайних температурах [10]. Підвищення температури спалювання палива понад допустиму межу призводить до падіння активності більшості паливних зол [28].

Широке застосування золошлакових сумішей, отриманих за звичайною технологією спалювання палива, при виготовленні пуцоланових та композиційних цементів, а також бетонних сумішей на їх основі, стримується коливаннями їх хіміко-мінералогічного складу, підвищений вміст сульфатних з'єднань та неспалених часток вугілля [3].

1.3 Особливості котлів з центральнокіплячим шаром

Значний інтерес являє метод спалювання палива у псевдорідкому або «кіплячому» шарі, що дає змогу значно знизити викиди сірки та азоту в атмосферу. Розроблено декілька модифікацій котлів з кіплячим шаром, в тому числі адіабатним та рециркуляційним [28].

У котлах з циркуляційним кіплячим шаром конструкція камери топки дозволяє організувати два зустрічні потоки часток – висхідний та нисхідний. Перевагою таких котлів є можливість скорочення викидів в атмосферу оксидів

сірки та азоту. Окрім того, такі котли є достатньо економічними та простими у роботі [28].

Не дивлячись на здатність золошлакових сумішей киплячого шару до самостійного тверднення (у випадку наявності вільного вапна та ангідриду) та наявність високих пуцоланових властивостей, використання таких відходів у будівництві в якості компоненту бетонних сумішей є обмеженим, особливо у випадку вмісту у їх складі підвищеної кількості вільного вапна. Це приводить до екзотермічного розігріву суміші, а також можливого розширенню та розтріскуванню синтезованого штучного каменю внаслідок утворення у складі продуктів тверднення вторинного етtringіту та таумаситу [55**Error! Reference source not found.**].

Як вказувалося вище, золи та золошлаки вводять у бетонну суміш для досягнення декількох цілей. Але як саме впливають ці компоненти на властивості бетонної суміші та бетону?

1.4 Вплив на властивості бетонної суміші

На сучасному етапі золи ТЕС використовують при виготовленні як монолітних, так і збірних бетонних та залізобетонних конструкцій. В силу певних причин у гідротехнічному будівництві золи ТЕС почали використовувати раніше, ніж в інших галузях будівництва. Цьому сприяло те, що марка бетонів для крупних гідротехнічних споруд визначається через 180 діб, тобто у віці, коли негативний ефект дій золи вже не помітний, а міцність бетону с золою майже дорівнює міцності бетону без золи [5].

Оптимальний вміст золи (за вимогами ДСТУ Б В.2.7-205:2009) у складі важких, легких та ніздрюватих бетонів встановлюється шляхом підбору складу конкретних бетонних сумішей при умові забезпечення необхідних показників їх якості [11].

З метою гарантування корозійної стійкості ненапруженої арматури при виготовленні залізобетонних конструкцій, що експлуатуються у агресивних

середовищах, вміст кислих зол у складі бетонної суміші не повинен перевищувати вміст цементу.

У той же час бетони з використанням зол та золошлакових сумішей не дозволяється армувати термічно зміцненою сталлю, котра інколи здатна до корозійного розтріскування [27].

Згідно даних [28], золи, отримані при використанні технології спалювання вугілля у киплячому шарі, доцільно використовувати при виготовленні різноманітних видів дорожніх покриттів.

Бетонні суміші з золами володіють більшою зв'язністю, кращою перекачуваністю, меншим водовідділенням та розшаруванням, що робить таку суміш ідеальною для використання в умовах монолітного бетонування, коли суміш на будівельний майданчик доставляють із заводу. Використовуючи золи можна зменшити витрату цементу, а отже і знизити екзотерію бетону (у деяких випадках до 50%), а отже і віддалити у часі термін початку тужавлення, що дозволить подовжити час, протягом якого товарний бетон буде придатний до використання, до 2-4 год [27].

Дослідниками відзначається, що у ранні строки твердіння (до 28 діб), особливо при використанні грубодисперсної золи, міцність бетону знижується, хоча и не пропорційно введеній кількості золи. Після цього спостерігається вирівнювання, а у деяких випадках и більш висока міцність у бетонів з використанням зольних добавок [24, 27, 33, 35]. Окрім того, відзначається, що додавання зол та золошлаків ТЕС сприяють підвищенню сульфатостійкості бетону, причому найкраще це спостерігалось при використанні портландцементу з високим вмістом C_3A та використанні відходів з високим вмістом SiO_2 та Al_2O_3 тобто найбільш кислих за своїм складом [28].

В деяких роботах відзначається ще й той факт, що міцність золовмістних бетонів на розтяг та вигин інтенсивно зростає при довготривалому твердненні. Так, зразки у вигляді стержнів та брусків, вирізаних з дослідних зразків бетонної кладки, показали міцність при вигині через 3 місяці – 80, а через 10 років – 150

% міцності контрольних зразків. Бетони що містять у своєму складі золю відзначаються більш високим співвідношенням міцності на стиск та розтяг [28].

Випробування довготривалими навантаженнями виявили, що введення золи значно знижує повзучість бетону. Так, при випробуванні протягом 240 діб повзучість золобетону виявилась на 34,5 % менше ніж показники контрольного бетону. Проте при використанні добавок ПАР деформації повзучості золовмістних бетонів мало відрізняються від деформацій бетонів без золи. Після випробувань бетону з ЛСТ протягом 300 діб повзучість при відсутності золи склала $59,2 \times 10^5$ та $59,5 \times 10^5$ з 20% золи [23].

Добавки ПАР у бетоні з використанням золи чинять дефлокуючу дію на високодисперсний зольний матеріал, що схильний до агрегування. Доля фокул у золі складає 10-15 % і вони поглинають на кожні 100 кг 6-9 л води [38].

Але і сама зола володіє пластифікуючими властивостями. Так, ряд дослідників, у тому числі і [42] вважають, що шароподібні частинки золи можуть розглядатися як тверді «кулькові підшипники» у суміші, вони, аналогічно до бульбашок емульгованого повітря при використанні повітровтягувальних добавок, здатні здійснювати пластифікуючий вплив на бетонну суміш.

Використання золи у поєднанні з органічними пластифікуючими добавками створює органо-мінеральний комплекс, що згідно [31], суттєво покращує міцнісні та реологічні показники бетонної суміші.

Дослідженням [28] виявлено, що золи знижують коефіцієнт лінійного температурного розширення розчинної складової бетону у повітряно-сухому стані, наближаючи його до значень, що характерні заповнювачам. Так при температурі 20 °С коефіцієнт лінійного розширення для звичайних розчинів дорівнює 8,8, розчинів з 25 % золи та добавкою ПАР – 5,8, граніту 3,3. Ці дані демонструють, що введення золи в бетон повинно підвищувати його термічну тріщиностійкість в умовах нагрівання та охолодження.

З усього вищезазначеного можна побачити, що використання відходів ТЕС у бетонних сумішах дає ряд суттєвих переваг перед беззольними сумішами, а також така практика дозволить відчутно покращити екологічну ситуацію. Проте

декотрими дослідниками [26] стверджується, що використання зол та золошлаків у бетонах суттєво впливає на показник їх довговічності, такий як морозостійкість.

Що ж таке, власне морозостійкість і які фактори здійснюють першочерговий вплив на цей показник?

1.5 Поняття морозостійкості

Здатність бетону в насиченому водою стані витримувати численні цикли заморожування і подальшого відтавання, називається його морозостійкістю [29]. У цих умовах основною причиною, яка руйнує бетон, є тиск на гирла мікротріщин і стінки пор, який створюється замерзаючою водою. Твердий скелет бетону перешкоджає розширенню води, тому в ньому виникають дуже високі напруження. Циклічність замерзання і відтавання поступово призводить до руйнування структури бетону. В першу чергу, руйнуються виступаючі грані, потім поверхневі шари, і нарешті, руйнування проникає в глибинні структури бетону. Вплив на інтенсивність руйнування бетону також в деякій мірі надають напруження, що виникають через відмінності коефіцієнтів температурного розширення компонентів бетону [34].

Величина показника морозостійкості бетону визначається методом чергування циклів його заморожування і подальшого відтавання. Такі параметри випробувань, як температура заморожування, тривалість циклу, розміри зразка, умови водонасичення, помітно впливають на значення показників морозостійкості бетону. Процес руйнування бетону прискорюється, якщо застосовувати екстремальні методи випробувань: зниження температури заморожування, заморожування у воді, в розчинах солей [29].

Показник морозостійкості бетону визначається кількістю циклів, при якому маса зразка не зменшується більш, ніж на 5%, а міцність зразка знижується на величину не більше 25%. Саме в кількості циклів визначається марка бетону по морозостійкості. Конкретне значення показника морозостійкості

призначається залежно від того, в яких умовах буде експлуатуватися конструкція [29].

1.6 Параметри, від яких залежить морозостійкість

Морозостійкість бетону залежить від його внутрішньої структури, в основному від характеру пористості, оскільки ця ознака визначає обсяг льоду і його розподіл в тілі бетону. Від характеру пористості залежить величина виникаючих напружень в тілі бетону і швидкість протікання процесів ослаблення його структури [36].

Мікропори бетону мають незначний вплив на його морозостійкість, оскільки пов'язана в них вода зазвичай ніколи не переходить у стан льоду навіть при надзвичайно низьких температурах. На морозостійкість бетону більший вплив робить обсяг макропор і їх будову [27**Error! Reference source not found.**].

Пористість бетону обумовлена наявністю пор в цементному камені, а також специфічними для бетону процесами внутрішнього і зовнішнього розшарування (седиментації) бетонної суміші та повітровтягування [28].

До теперішнього часу відсутня єдина теорія, що пояснює механізм морозного руйнування бетону, хоча очевидно, що, в кінцевому рахунку, зниження міцності вологого бетону при поперемінному заморожуванні і відтаванні обумовлено, в основному, утворенням льоду в порах бетону. В результаті того, що обсяг, займаний льодом, на 9% більше обсягу води, виникають значні напруження розтягу, що впливають на стінки пор і поступово розхитують його структуру.

1.7 Гіпотези морозостійкості

Існує кілька основних гіпотез, що пояснюють способи передачі напружень на елементи структури бетону, що виникають в результаті утворення льоду:

1. Гіпотеза безпосереднього впливу льоду, що кристалізується на стінки пор.

2. Гіпотеза гідростатичного тиску води - на відміну від першої стверджує, що на стінки пор тисне не сам лід, а вода, на яку передається тиск льоду. На користь більшої коректності другої гіпотези говорить той факт, що вода, яка заповнює капілярні пори, не може, як правило, повністю перетворитися на лід через відсутність необхідного місця і тому передає тиск льоду на стінки пор. Але гіпотеза також не може пояснити ряд явищ, які спостерігаються при дії негативних температур на бетон. Так, при збільшенні швидкості заморожування руйнування прискорюється, тоді як тиск льоду при цьому не зростає. Більш того, морозом руйнуються бетони, пори яких заповнені водою менш ніж на 90%.

3. Гіпотеза гідравлічного тиску Т. Пауерса, що пояснює відмічені явища. Відповідно до неї головною причиною руйнування бетону при поперемінному заморожуванні і відтаванні є гідравлічний тиск, створюваний в порах і капілярах бетону під впливом замерзлої води в результаті опору гелевої складової цементного каменю. Переконливим аргументом на користь цієї гіпотези є те, що вона пояснює механізм захисної дії повітряних пор. При їх достатній кількості «надлишкова» вода відтісняється в ці пори без порушень структури бетону. Руйнування бетону відбувається тоді, коли обсяг умовно замкнутих пор поступово заповнюється водою і вони не можуть виконувати функції резервних (демпферних). Згідно з гіпотезою гідравлічного тиску напруги, що виникають в бетоні, будуть пропорційні швидкості заморожування, кількості відтіснати рідкої фази і її в'язкості і обернено пропорційні проникності цементного каменю.

Модель, запропонована Т. Пауерсом, являє циліндричний капіляр, заповнений водою і оточений цементним каменем. Під дією гідравлічного тиску в циліндричній оболонці капіляра виникають напруження розтягу. Руйнування відбувається, якщо напруження досягли межі міцності цементного каменю на розтяг. До недоліків цієї моделі слід віднести те, що в ній не враховується співвідношення розмірів капіляра і оболонки. Насправді в цементному камені товщина оболонки капіляра може бути в 5-20 разів більше його радіуса. До обсягу капілярів включався весь обсяг пор цементного каменю без поділу його на обсяг пор гелю і капілярів, хоча заморожування води відбувається практично

лише в капілярних порах. Розрахунок напружень в бетоні по моделі Пауерса проводять для статичного стану без урахування переміщення фронту льодоутворення.

У [34, 35] запропоновано модель, в якій капіляр і оболонка розглядаються як товстостінна труба зі змінним відношенням радіусів оболонки і капіляра. При розгляді одиничного капіляра дію сусідніх замінюється рівномірно розподіленим навантаженням на зовнішній поверхні оболонки.

Відповідно до сучасних уявлень гідравлічний тиск не є єдиною причиною руйнування. Руйнуванню сприяють також осматичні явища. Вони виникають в результаті підвищення концентрації розчинених речовин ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, лугів та ін.) в рідкій фазі бетону на кордоні з льодом. Дифузія води до області замерзання створює додатковий тиск.

4. Гіпотеза термічної несумісності компонентів бетону. Заповнювачі і цементний камінь мають різні коефіцієнти термічного розширення. При негативних температурах термічна несумісність компонентів різко посилюється, оскільки коефіцієнт термічного розширення льоду в 3-7 разів більше ніж бетону.

Можлива одночасна дія різних механізмів деструкції бетону при його циклічному заморожуванні, і внесок кожного буде залежати від багатьох факторів: вологості матеріалу, В/Ц, віку бетону та т.д. Вплив циклічної зміни температури посилюється додатковим впливом розчинів солей. Отримала, наприклад, широке поширення практика застосування солей (NaCl , CaCl_2) для видалення льоду з дорожніх покриттів. В результаті танення льоду під час посипання солі на поверхню бетону поглинається велика кількість теплоти (334 Дж / г) і температура різко знижується [35].

На поверхні бетону фіксується зниження температури до 9°C протягом 1 хв («температурний шок»), що викликає виникнення розтягуючих напружень. Дифузія солі в бетон призводить до виникнення градієнта її концентрації, що також викликає підвищені напруги, лущення і відшарування поверхневого шару.

У присутності солей збільшуються осматичні явища в заморожуваному бетоні, підвищується в'язкість рідкої фази. В результаті зростає величина

гідравлічного тиску і прискорюється руйнування бетону. При поперемінному заморожуванні і відтаванні насичених водою залізобетонних конструкцій порушується відповідність температурних деформацій сталі і бетону, в результаті виникають значні внутрішні напруження і зменшується міцність зчеплення сталі з бетоном. Розтягуючі напруження в арматурі при заморожуванні насичених водою залізобетонних конструкцій можуть досягати 120-150 МПа.

Як вказувалося вище, морозостійкість залежить, насамперед, від структури та внутрішньої будови бетону.

Досліди Коупленда і Хейса підтвердили, що загальна кількість води в добре гідратованому цементі дорівнює приблизно подвоєній кількості зв'язаної води. Таким чином, цементний гель включає 0,25 (за вагою) пов'язану не випаровується при 105 °С і 0,25 адсорбційно зв'язаної води, що випаровується, при цьому водоцементне відношення в гелі буде приблизно 0,5.

Сучасні дані про фізичну будову цементного каменю і про форми зв'язку води в ньому використані при виведенні формул для обчислення характеристик пористості цементного каменю і бетону.

Комплексне дослідження структури цементних розчинів із застосуванням ряду методів визначення розмірів і оцінки будови пор проводиться Ф. М. Івановим і В. Л. Солнцевою. Експериментальні методи дають можливість отримати характеристику пористості у вигляді кривої розподілу пор за розмірами, яка є дуже цінною характеристикою будови. Вона дозволяє судити про однорідність матеріалу, дає можливість вивчити вплив на розмір пор ряду факторів: тонкості помелу цементу, седиментаційних процесів та ін. [27].

У ряді робіт були зроблені спроби встановити кількісну залежність між розмірами пор і ступенем морозостійкості матеріалу.

За даними А. С. Беркмана, цегла, як правило, витримувала 25 циклів заморожування і відтавання в тому випадку, коли криві розподілу мали перший максимум в області пор розміром більше 0,02 см.

Пауерс у своїй «теорії інтервалу між порами» намагався знайти залежність між ступенем морозостійкості бетону і середнім інтервалом між порами. Ця теорія ґрунтується на припущенні, що цементний камінь не буде розширюватися при замерзанні, якщо вода, що замерзає, буде відтіснятися в повітряні пори, що можливо при певному інтервалі між порами [32, 33].

Метод отримання даних для розрахунку за цими формулами, так званий «метод лінійної січної», викладено в статті Брауна і Пірсона. Формули Пауерса не дають дійсного інтервалу, але дозволяють, на його думку, розрахувати величини інтервалу, які приблизно пропорційні дійсному середньому інтервалу.

У подальших роботах Пауерса інтервал використовується як міра середньої відстані між порами для встановлення емпіричних залежностей. Одна з таких залежностей була отримана шляхом обробки результатів лабораторних випробувань, отриманих Клайджером. У цих випробуваннях морозостійкість оцінювалася числом циклів заморожування до розширення 0,1%. Пауерс прийшов до висновку, що морозостійкість різних складів була приблизно однакова, коли їх чинники інтервалу були близькими і не перевищували 0,01 дюйма [32]. На адресу Пауерса були зроблені критичні зауваження. Зокрема, зазначалося, що три різних поєднання з цементів і заповнювачів мали різну морозостійкість при тому ж самому факторі інтервалу. У разі різних наповнювачів фактор інтервалу не є визначальним. Вказувалося також, що бетони з інтервалом нижче 0,01 дюйма і з відносно невеликими його коливаннями сильно різнилися по морозостійкості.

У 1958 р була опублікована робота Майленза, Волкодова, Бекстрома і Берроуза, присвячена виникненню, розвитку та впливу системи повітряних пор в бетоні. У цій роботі наведені характеристики повітряно-пористої системи в затверділому бетоні, отримані за допомогою мікроскопічних методів дослідження. Представляють інтерес результати дослідження зразків бетону, висвердлених із споруд, а також контрольних зразків, отриманих із будівництва.

У числі досліджених бетонів без повітровтягувальних добавок були зразки з гребель великих гідроелектричних станцій Гранд-Кулі, Гувера і Паркера. У такому бетоні

вміст повітря коливалося від 0,2 до 5,7% і становило в середньому 1,9%. Питома поверхня повітряних пор була в межах $43\text{-}444\text{ см}^2 / \text{см}^3$, в середньому $177\text{ см}^2 / \text{см}^3$. Фактор інтервалу Пауерса, що характеризує відстань між порами, коливався в дуже широких межах від 0,02 до 0,15 см, а його середня величина 0,063 см значно перевершувала норму, рекомендовану Пауерсом для морозостійких бетонів (0,025 см) [35].

Таким чином, дослідні дані показують, що середній розмір пор або інтервалу між порами не є чинником, що визначає морозостійкість бетону. Особливість бетону полягає в тому, що функція, яку виконують його пори при дії змінного заморожування і відтавання, залежить не тільки від їх розмірів, але також від їх розташування в цементному гелі та походження.

Зв'язок морозостійкості і будови бетону обумовлюється з обґрунтованим уявленням В. Н. Юнга про цементний камінь як про мікробетон, що складається з гелевих і кристалічних продуктів гідратації цементу і численних включень у вигляді негідратованих зерен клінкеру і добавок. Гелева складова представлена головним чином гідросилікатами кальцію. Склад гідросилікатів змінюється в залежності від умов гідратації і, за даними Н. А. Торопова, може бути виражений загальною формулою $x(\text{CaO}) \cdot y(\text{S}_2) \cdot z(\text{H}_2\text{O})$, в якій відношення x – знаходиться в межах від 1,65 до 2. Колоїдальні продукти гідратації портландцементу представляються в вигляді агрегатів субмікрочисталів. Тому продукти гідратації портландцементу в літературі умовно називають «цементним гелем» [44**Error! Reference source not found.**].

Якщо цементне тісто добре ущільнене (повітряна пористість не перевищує 1-2%), то пори в твердіючому цементному камені утворюються, головним чином, водою, що випаровується. Характер таких пор обумовлений формами зв'язку вологи з матеріалом[1].

Класифікація форм зв'язку вологи з матеріалом, запропонована Ребіндером [51], побудована за принципом інтенсивності енергії зв'язку і в повному вигляді наведена в [30]. За цією класифікацією всі форми зв'язку вологи з матеріалом поділяються на три основні групи.

Хімічний зв'язок, що виникає в певних молекулярних співвідношеннях (стехіометричних), є найбільш сильним в порівнянні з іншими формами зв'язку. Хімічний зв'язок, як правило, не порушується при сушінні. Для його порушення потрібно прожарювання, або хімічна взаємодія з іншою речовиною.

Фізико-хімічний зв'язок встановлюється не в суворо певних співвідношеннях. Для бетону, що є гідрофільним капілярно-пористим тілом, велике значення має зв'язок вологи в гідратних оболонках субмікроскопічних частинках цементного гелю. При полімолекулярній адсорбції найбільш міцно зв'язаний мономолекулярний шар води, що знаходиться під великим тиском, обумовленим молекулярно-силовим полем. Внаслідок цього щільність води підвищується, що є однією з причин стиснення (конtrakції) системи цемент - вода. Наступні шари молекул води в гідратних оболонках утримуються менш міцно і властивості їх у міру віддалення від поверхні твердих частинок поступово наближаються до властивостей звичайної вільної води.

Адсорбційно зв'язана вода має специфічні властивості. Б. В. Дерягін експериментально довів, що тонкі плівки такої води (товщиною близько 0,1 мк) мають властивості пружного твердого тіла. Проміжки між частинками гелю дуже невеликі, порядку 15-40 А. Тому можна вважати, що та частина води, що випаровується, яка знаходиться в агрегатах частинок гелю («вода гелю»), пов'язана з матеріалом адсорбційним зв'язком.

У [30] зазначається, що необхідно враховувати те, що адсорбційно зв'язана вода переходить у лід при більш низьких температурах, ніж «об'ємна».

Частина води, що випаровується, і не зв'язана в агрегатах частинок цементного гелю, знаходиться між ними і має з матеріалом фізико-механічний зв'язок. Ця частина води, що випаровується, умовно названа «капілярною», утримується в матеріалі капілярним тиском. Основна маса утриманої капілярної води є вільною і зберігає свої властивості.

Отже, згідно [2], вода, що випаровується, має з цементним каменем дві форми зв'язку - фізико-хімічну і фізико-механічну. На цій основі можна виділити в твердіючому цементному камені три основні групи пор, відрізняються за

розміром, розташуванню в цементному камені і по їх впливу на морозостійкість бетону.

Капілярні пори, утворені «капілярною» водою, що випаровується, що має з матеріалом фізико-механічний зв'язок, розташовані між агрегатами частинок цементного гелю. Їх ймовірний розмір в тисячі разів перевищує розмір пор гелю. Капілярні пори сприяють всмоктуванню і міграції води, яка замерзає в них при звичайних умовах охолодження (починаючи з -6 до -8 ° C). Капілярні пори є основним дефектом будови щільно укладеного бетону, знижуючи його морозостійкість.

За класифікацією [30] капілярні пори є макрокапілярними.

Контракційні пори утворюються внаслідок зменшення абсолютного об'єму системи цемент - вода.

У [38] вказується, що контракція викликає зменшення зовнішніх розмірів системи, додаткове поглинання води і утворення в системі нових (контракційних) пор. За розмірами контракційні пори займають проміжне положення між порами гелю і капілярними. При замерзанні бетону контракційні пори відіграють роль своєрідних запасних резервуарів, в які може віджиматися частина води з капілярних пор. Завдяки цьому зменшується тиск замерзлої води на стінки капілярних пор і підвищується морозостійкість бетону. Якщо бетон з самого початку твердне у водних умовах, то внаслідок вакууму в контракційні пори ще в період попереднього твердіння засмоктується вода, в результаті чого морозостійкість бетону знижується.

Пори гелю являють собою проміжки між його частками, утворені водою, що випаровується, адсорбційно пов'язаної в гідратних оболонках частинок гелю, і розташовані в агрегатах частинок цементного гелю. Вони мають найменший розмір в порівнянні з іншими порами цементного каменю. Вода в порах гелю знаходиться в особливому стані і не переходить в лід при низьких температурах порядку -40 і навіть -78 ° C, що узгоджується з висновками Б. В. Дерягина, Н. А. Цитовича і М. І. Сумгіна про специфічні властивості тонких шарів води.

При гідратації мінерали цементного клінкеру збільшуються в об'ємі в різному ступені. За наявними даними обсяг гідратованого портландцементу зростає приблизно в 2,1-2,26 рази.

З досліджень [38] випливає, що обсяг контракційних пор збільшується в прямій залежності від ступеня гідратації і кількості цементу.

У [38] автори на основі дослідження, виконаного В. В. Некрасовим, приймають граничну величину контракції для більшості звичайних цементів рівною 7-9 мл на 100 г цементу.

Капілярна пористість цементного каменю залежить від величини В/Ц і ступеня гідратації цементу, тим часом як капілярна пористість бетону залежить ще й від витрати цементу.

Капілярна пористість зростає при збільшенні В/Ц і зменшується при більш повній гідратації цементу.

Як показує [1], вирішальним чинником зменшення капілярної пористості при низьких В/Ц є досягнення більш повної гідратації цементу. Активізація цементу і належний догляд за бетоном необхідні як для більш повного використання цементу, так і для зменшення капілярної пористості і підвищення стійкості бетону.

Прогресуюча гідратація цементу викликає якісну зміну пористості цементного каменю - зменшення капілярної і збільшення контракційної і гелевої пористості при деякому зниженні загального обсягу пор.

Таким чином, капілярна пористість в цементному камені відсутня за умови дуже тривалого твердіння в сприятливих умовах. Практично до часу експлуатації споруди ймовірна ступінь гідратації цементу буде порядку 0,6-0,8. Для ліквідації капілярних пор при даному ступені гідратації потрібно знизити В/Ц до 0,3-0,4, т. б. в середньому приблизно до 0,35 [6].

Фізична межа процесу гідратації настає тоді, коли капілярні пори заповнюються продуктами гідратації, т. б. повна гідратація неможлива при водоцементному відношенні менше 0,5, що узгоджується з думкою А. Е.

Шейкина. Найбільший ступінь гідратації цементу при В/Ц менше 0,50 визначається розрахунково [30].

Отже, величина В/Ц, при якій можливе усунення капілярної пористості, і найбільш можливий ступінь гідратації цементу при цьому В/Ц взаємно пов'язані. Капілярна пористість може бути усунена тільки в цементному камені, виготовленому з В/Ц, що не перевищує 0,5, причому капілярна пористість зникає при досягненні найбільшою мірою гідратації [5Error! Reference source not found.].

Роль седиментаційних процесів у формуванні будови бетону всебічно досліджена в роботах В. В. Стольнікова та його учнів. Водовідділення бетонної суміші погіршує контакт розчинної складової із зернами крупного заповнювача, посилює неоднорідність будови бетону, в результаті чого погіршується водонепроникність і морозостійкість бетону. Збільшення тонкості помелу цементу супроводжується зменшенням седиментаційного розшарування цементного тіста [2].

Пори в бетоні, що виникли внаслідок недостатнього ущільнення, а також утворені затисненим повітрям, мають великі розміри; їх випадкове розташування збільшує неоднорідність цементного каменю, тому поряд з капілярними порами вони є дефектом структури бетону.

При гарному ущільненні обсяг зацемленого повітря не перевищує 1-3% обсягу свіжоущільненого бетону. Пористість такого бетону, виготовленого на заповнювачах із щільних гірських порід і практично не маючих дефектів, викликаних седиментацією, обумовлена в основному пористістю цементного каменю. У цьому бетоні головним дефектом будови є капілярні пори.

При цьому капілярна пористість бетону (на відміну від капілярної пористості цементного каменю) залежить не тільки від В/Ц і ступеня гідратації, а й від витрати цементу в бетоні. Досліди [10] показують, що обмеження верхньої межі В/Ц ще не забезпечує необхідної щільності бетону. Насправді характеристики пористості бетону залежать від трьох чинників: витрати цементу, кількості води замішування і ступеня гідратації цементу, яка об'єднує

вплив на характеристики пористості бетону, тонкості помелу і хіміко-мінералогічного складу цементу, а також ряду виробничих умов (готування, ущільнення бетонної суміші, способу і часу твердіння бетону).

Капілярна пористість зменшується при зниженні кількості води замішування і збільшенні витрати цементу.

Скорочення обсягу капілярних пор при рівномірному розподілі їх в бетоні повинно супроводжуватися зменшенням ефективного розміру пор, що сприяє підвищенню стійкості бетону. Зміна в якісному складі пористості робить вирішальний вплив на морозостійкість бетону.

Ф. М. Іванов та В. Л. Солнцева провели експериментальне дослідження структури і властивостей цементного розчину. Вони прийшли до висновку, що в щільному цементному розчині з В/Ц - = 0,2 ... 0,23 при твердінні на повітрі переважають пори розміром від 0,35 до 0,05 мк, а при твердінні у воді - менше 0,05 мк. Із збільшенням віку зразків істотно збільшується частка тонких пор (розміром менше 0,05 мк) і незначно змінюється загальна пористість. При цьому цементний камінь з дрібнопористою структурою виявився найбільш морозостійким [27].

В якості узагальнення всього вищесказаного можна виокремити фактори, які впливають на морозостійкість бетону:

- зі збільшенням В/Ц зростає як загальний обсяг відкритих пор, так і середній їх розмір, що також негативно впливає на морозостійкість. При цьому підвищуються проникність і водопоглинання і в таких бетонах неможливе утворення істотного обсягу резервних пор. При проектуванні морозостійких бетонів прийнято обмежувати В/Ц в залежності від умов служби бетону в спорудах;

- ступінь гідратації цементу;
- витрата води замішування і, відповідно, витрати цементу. За даними [6], кожен відсоток зниження капілярної пористості досягається зменшенням кількості води замішування на 10 л/м³ або збільшенням витрати цементу на 20-35 кг/м³. Збільшення витрати цементу з одного боку зменшує В/Ц, з іншого,

призводить до збільшення обсягу цементного тіста, що підвищує обсяг капілярних пор бетону;

- оптимальна витрата піску з умови морозостійкості вище, ніж з умови міцності, що пов'язано з умовами повітровтягування. За даними О.В. Кунцевича, підвищення частки піску в суміші заповнювачів з 0,33, оптимальної по міцності, до 0,5 призвело до зростання витрат цементу на 40 кг/м^3 , але підвищило морозостійкість з 120 до 400 циклів;

- з мінералів цементу негативний вплив на морозостійкість надає C_3A . За рекомендаціями [6], при марці бетону по морозостійкості, вираженої числом активних циклів заморожування і відтавання за проектний термін експлуатації споруди, до P500, C_3A в цементі повинно бути менше 10, P1000 - менше 6 і P6000 - менше 4%. Під «активними циклами» маються на увазі цикли, «що вносять в структуру матеріалів, що становлять бетон, зміни, пов'язані з порушенням монолітності». Це визначення, проте, не є достатньо чітким;

- у морозостійких бетонах небажані активні мінеральні добавки, особливо з підвищеною водопотребою. В той же час, експериментально показано, що бетони з помірним вмістом доменних шлаків або кам'яновугільної золи-винесення можуть мати задовільну морозостійкість, особливо при введенні в бетон емульгованого повітря [4, 6];

- низьку морозостійкість мають пуцоланові цементы. Шлакопортландцемент за морозостійкістю займає проміжне положення між портланд- і пуцолановий цементом [26];

- до зниження морозостійкості бетону призводить підвищення питомої поверхні цементу понад $400 \text{ м}^2/\text{кг}$. Такі надтонкі цементы характеризуються підвищеною усадкою, що веде до появи мікротріщин [27];

- жорсткі вимоги пред'являються до обмеження величини втрати при прожарюванні, що зумовлена цементу. Зберігання цементу набагато більше впливає на його морозостійкість, ніж на активність. На думку [10]; наявність оболонки з новоутворень гідратованих мінералів на зернах цементу є однією з основних причин зниження довговічності бетону;

– зазвичай застосовуються для отримання важкого бетону кварцовий пісок і щебінь з щільних вивержених або метаморфічних порід, що відповідають вимогам стандартів, дозволяють отримувати високоморозостійкий бетон. На морозостійкість бетону істотний вплив справляють морозостійкість самих наповнювачів і їх водопотреба. За даними [27**Error! Reference source not found.**] , морозостійкість заповнювачів неоднозначно пов'язана з їх міцністю. Неморозостійкі зерна можуть бути досить міцними і щільними з водопоглинанням 0,7-2%. Важливими з позицій морозостійкості є властивості заповнювачів, що визначають їх зчеплення з цементним каменем, і модуль пружності;

– пластифікуючі добавки підвищують морозостійкість бетону як в результаті зменшення водопотреби і відповідно капілярної пористості, так і внаслідок певного повітровтягування;

– гідрофобізуючі добавки, адсорбуючись на стінках пор бетону, знижують їх водопоглинання і капілярне підсмоктування. Підвищенню морозостійкості сприяє пластифікуюча дію гідрофобізуючих добавок. Основні повітровтягувальні добавки відносяться до гідрофобізуючих ПАВ, що володіють значною поверхневою активністю на межі розчин - повітря. Ці добавки при їх введенні з водою замішування викликають утворення в системі досить високодисперсною емульсії повітря, стійко диспергированного в бетонної суміші;

– крім виду і вмісту добавок, на повітровтягування впливають і інші фактори: легкоукладальність бетонних сумішей, тонкість помелу цементу, зерновий склад заповнювачів, час перемішування, температура. Поряд з повітروطгувальними для утворення системи умовно-замкнених пор в бетоні застосовують газоутворюючі добавки, наприклад ГКЖ-94. Є дані, що система умовно-замкнених пор з добавкою ГКЖ-94 більш стабільна, ніж у бетонах з повітروطгувальними добавками;

– крім особливостей вихідних матеріалів і складу бетонної суміші, на морозостійкість бетону певний вплив мають умови його твердіння. Оптимальні

умови твердіння повинні сприяти отриманню бетону з мінімально можливими значеннями капілярної пористості і ступеня заповнення водою умовно замкнених пор. Найбільш повно протікають процеси гідратації, зменшуються об'єм і розміри капілярних пор при водному твердінні. При водному твердінні, однак, підвищується ступінь водонасичення бетону, контракційний об'єм заповнюється водою. При твердінні бетону у воді можливе заповнення водою найдрібніших штучно залучених повітряних пор, що знижує морозостійкість [27] рекомендує комбіноване твердіння бетону. За [10**Error! Reference source not found.**] бетон з залученим повітрям, твердіючий, 14 діб. у воді і потім 14 діб на вологому повітрі, мав більшу морозостійкість, ніж при твердінні 21 добу воді і 7 діб на повітрі.

При тепловологій обробці отримання морозостійкого бетону забезпечується при мінімізації деструктивних процесів, викликаних температурним розширенням води і повітря. Зниження інтенсивності деструктивних процесів досягається при м'яких режимах пропарювання: подовженою (не менше 3-5 год) попередньої витримці, сповільненої швидкості підйому температури і охолодження (не більше 15-20 град / год), зниженій температурі ізотермічного прогріву (60-80 ° C)

Підвищення морозостійкості можливо двома різними способами:

– підвищити щільність бетону, зменшити обсяг макропор і їх проникність для води [25];

– створити в бетоні за допомогою введення спеціальних добавок додатковий обсяг повітряних пор (більше чверті від обсягу замерзлої води). Цей додатковий обсяг повітряних пор не буде заповнюватися при звичайному водонасиченні, але стає доступним для проникнення води під тиском, що виникають в процесі її замерзання.

Щоб отримати морозостійкий бетон, потрібно, щоб товщина прошарків між повітряними порами не перевищувала 0,025 см. Для цього потрібен не тільки необхідний обсяг повітровтягування, але й необхідно домогтися, щоб повітряні пори мали якомога менший розмір, так як при зменшенні їх загального обсягу це

буде сприяти підвищенню морозостійкості бетону при одночасному найменшому зменшенні його міцності внаслідок процесу повітровтягування. Питома поверхня повітряних пор в бетоні із застосуванням повітровтягувальних добавок зазвичай становить величину $1000 \dots 2000 \text{ см}^2 / \text{см}^3$, Розмір повітряних пор в межах $0,005 \dots 0,1 \text{ см}$, Відстань між окремими порами не більше $0,025 \text{ см}$ [25].

Оптимальний для отримання морозостійкого бетону обсяг залученого в структуру бетону повітря, становить величину $4 \dots 6\%$ і визначається, головним чином, витратою цементу, великого заповнювача і води. Обсяг повітря збільшується у разі збільшення витрати цементу і води, і зниженні розміру фракцій заповнювача.

1.8 Морозостійкість бетонів з використанням золашлаків у якості наповнювача

Відповідно до даних джерел [7] заміна частини цементу золою, як правило, призводить до зниження морозостійкості. Це пояснюється, по-перше, збільшенням фактичного водоцементного відношення і утворенням додаткового обсягу капілярних пор. Зниженню морозостійкості сприяє також зменшення вмісту залученого повітря при введенні золи і присутність у золі органічних залишків, які набухають у воді та здатні утворювати сполуки, що руйнують в'язуче.

Органічні залишки містяться зазвичай в крупній фракції золи. Помел золи призводить до руйнування органічних частинок і їх рівномірному розподілу у всьому матеріалі, що позитивно впливає на морозостійкість бетону.

Істотно підвищити морозостійкість бетонів з золою можна введенням в бетон поверхнево-активних добавок гідрофобно-пластифікуючого типу. Пластифікуючий компонент таких добавок знижує водопотребу бетонної суміші, а отже, і обсяг капілярних пор. Гідрофобізуючий компонент, в свою чергу, впливає на стінки пор і капілярів в бетоні і тим самим перешкоджає потраплянню в них води. Так, після 150 циклів заморожування і відтавання бетони з заміною 20% цементу меленою відвальною золою в поєднанні з

комплексною гідрофобно-пластифікуючою добавкою підвищили міцність на 10% у порівнянні бетоном без золи. Використання гідрофобно-пластифікуючої добавки при заміні 25% цементу дрібнодисперсного золою дозволило отримати бетон, що не поступається за морозостійкістю бетону без золи і здатен витримати до 200 циклів заморожування і відтавання. [7]

1.9 Закордонний досвід використання зол у бетонах

Зола активно розглядається дослідниками у якості так званого supplementary cementitious material (SCM), тобто додаткового цементуючого матеріалу [47]. Можливість використання летючої золи винесення у бетонах у якості SCM була відома ще з початку минулого століття (1914 р.) проте це явище не набуло поширення до середини 1900-х років після опублікування новаторських досліджень вчених Каліфорнійського університету. За останні 50 років відбулося значне зростання використання золи у бетонах. Так, наприклад для виготовлення бетону, бетонних продуктів та цементних розчинів у США у 2005 році було використано близько 15 мільйонів тон золи [47].

Зола-винесення використовується за кордоном у якості добавок у бетонах з 1930-х років [46]. Так, наприклад у Австралії перше задокументоване використання золи-винесення відбулося у 1949 році для облицювання вала на електростанції у Новому Південному Уельсі [48].

Історично так склалося, що золу в бетон додавали у кількостях 15-25% від вмісту цементу за масою. Насправді точна маса золи-винесення варіюється в широких межах і залежить від її властивостей, технічних умов, географічного розташування та клімату. Найбільший вміст золи (30-50 %) використовується при виробництві масивних конструкцій (наприклад фундаменти чи дамби) для контролю зростання температури. В останні десятиліття дослідження показують, що вище дозування (40-60 %) може бути використано для виробництва конструкцій, а також бетону з хорошими механічними властивостями та міцністю [47].

Підвищений вміст у бетоні золи-винесення не позбавлене недоліків. Так високий рівень проблем може створити подовження часу перемішування та

повільний рівень набору міцності, результатом чого є низька міцність у ранні строки, що, в свою чергу, призводить до затримки темпів будівництва. Ці недоліки особливо проявляють себе під час бетонування у холодну погоду [47].

За кордоном існує таке поняття, як high-performance concrete (HPC) – високоефективний бетон. Спираючись на дані [47] «той матеріал, що називався високоміцним бетоном у пізні 1970-ті роки зараз носить назву високоефективного бетону, оскільки було відмічена відмінність багатьох його параметрів, а не лише міцності. HPC визначається дослідниками, як спеціально створений бетон, одна чи кілька специфічних властивостей котрого були покращенні шляхом раціонального підбору компонентних матеріалів та пропорцій змішування. Таке визначення стосуються не одного конкретного продукту а цілої низки високотехнічних бетонів чий властивості формувалися з урахуванням специфічних інженерних потреб, таких як легкоукладальність та висока рання міцність (24-30 МПа у віці 24 годин) висока щільність та стійкість до дії експлуатаційних умов.[10]

Головна критика проти такого визначення HPC стосується того, що стійкість бетону не є головним показником а лише одним із додаткових. Хибна думка про те, що висока міцність бетону автоматично означає і його високу стійкість породжена багатьма випадками розтріскування та передчасного руйнування HPC, описаних у літературі. Причина цього криється у підборі компонентів для сумішей з високим рівнем міцності; наприклад, високоміцний бетон часто проектують з міцністю 50-80 МПа у віці 28 діб, та інколи високою ранньою – порядку 25-40 МПа на першу добута високою рухливістю при бетонування густо армованих конструкцій. Зазвичай такі суміші містять порядком 450-500 кг/м³ цементу (чистого, портландцементу або суміші цементу та невеликої кількості мікрокремнезему та золи-виненсення або шлаку), для них характерним є водоцементне відношення близько 0,3 (котре досягається введенням суперпластифікуючих добавок) та наявність повітровтягувальних добавок для забезпечення морозостійкості. Проведені досліді [46] показали, що такий склад бетонної суміші здатен привести до утворення тріщин на ранніх

стадіях через багато причин, так, наприклад, високі термічні напруження, котрі викликані підвищеним вмістом цементу, розтріскування котре викликано низьким водоцементним відношенням та високим розтріскуванням при висиханні, котре є наслідком високого відношення кількості цементу до кількості інших компонентів. [46] визначає НРС як бетон з низьким рівнем водо-в'язучого відношення, з покращеним відношенням кількості цементу до кількості заповнювачів, для контролю розтріскування при висиханні, та котрий включає достатню кількість води.

Зола-винесення – головний побічний продукт теплоелектростанцій, котрі працюють на вугіллі, цей матеріал добре відомий своїми пуцолановими властивостями та використовується або у якості компонента цементу, або в якості добавки до бетону. На практиці застосовують невисокі дозування для досягнення необхідного рівнів економії та покращення легкоукладальності (15-20 % від маси в'язучого), проте інколи цього може виявитися недостатньо для забезпечення належного рівня стійкості до сульфатної корозії або термічного розтріскування. Для цих цілей використовуються підвищена кількість золи-винесення (25-35%).

Проте навіть така, підвищена, кількість золи-винесення у бетоні не дозволяє класифікувати бетон, як HVFA (згідно з [39], HVFA – бетон з високим об'ємним вмістом золи). У [39] HVFA визначається, як суміш, в якій 50% (або більше) в'язучого матеріалу замінюється золою і це дає змогу такому бетону володіти високими рухливістю, границею міцності при стиску та довговічністю.

Нижче приводяться характеристики високоефективного бетону НРС [45]:

- не менш ніж 50% золи-винесення замінює цемент;
- низький вміст води, як правило, менше 130 л/м³;
- вміст цементу, як правило, не більше 200 кг/м³;
- для бетонів, кінцева міцність котрих 30 МПа та більше, осадка конуса більше 150 мм, а водоцементне відношення становить порядка 0,30, обов'язковим є застосування добавок суперпластифікаторів;

– для бетонів, кінцева міцність котрих менше 30 МПа, осадка конуса яких менше 150 мм, а водоцементне відношення становить порядку 0,40 використання суперпластифікаторів є не обов'язковим;

– для забезпечення необхідного рівня морозостійкості необхідним є використання повітровтягувальних добавок.

РОЗДІЛ 2

МЕТА РОБОТИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ, ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

2.1 Мета роботи та задачі дослідження

Мета магістерської роботи є розробка складу бетону з використанням золошлаків теплових електростанцій з морозостійкістю не менше F200. Дослідження міцності та морозостійкості важких бетонів.

Задачі дослідження:

- експериментальний пошук найбільш оптимального співвідношення компонентів, для отримання бетону з високою морозостійкістю;
- визначення факторів, що можуть чинити значний вплив на досліджувану величину;
- запланувати повний факторний експеримент, з метою визначення впливу зміни значення варійованих величин (витрата цементу, витрата пластифікатору та час ущільнення) на морозостійкість;
- аналіз отриманих результатів.

Об'єкт дослідження міцність і морозостійкість бетонів, виготовлених із застосуванням в якості заповнювачів золошлаків теплових електростанцій.

Предметом дослідження даної магістерської роботи є зразки, виготовлені з бетону для якого в якості заповнювача використовують золошлаки теплових електростанцій.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Визначення характеристик вихідних матеріалів

3.1.1 Цемент

У придбаного цементу визначалися наступні параметри (результати можна побачити у розділі 4 цієї роботи):

- тонкість помелу, згідно з ДСТУ Б В.2.7-188:2009 [21];
- нормальну густоту, згідно з ДСТУ Б В.2.7-185:2009 [19];
- марку, згідно з ДСТУ Б В.2.7-187:2009 [20].

3.1.2 Щебінь

Для дослідів використовувався щебінь, що був у наявності лабораторії кафедри ТБКВіМ. Для нього визначалися такі параметри як:

- насипна густина;

Вищевказані характеристики визначалися згідно з ДСТУ Б В.2.7-71-98 [16];

3.1.3 Золошлак

Для виготовлення зразків у межах даної роботи використовувався золошлак (зола донна). Для неї визначалися наступні показники:

- істина густина, згідно з, згідно з ДСТУ Б В.2.7-42-97 [12];
- насипна густина, згідно з ГОСТ 9758-86 [7];
- модуль крупності, згідно з ГОСТ 9758-86 [7];
- водопотреба, згідно з ГОСТ 9758-86 [7].

3.1.4 Пісок

Для приготування контрольної серії зразків був використаний річковий пісок, для якого були визначені такі характеристики:

- насипна густина, згідно з ДСТУ Б В.2.7-235:2010 [24];
- модуль крупності, згідно з ДСТУ Б В.2.7-235:2010 [24];

Результати усіх випробувань вихідних матеріалів наведені у розділі 4.

3.2 Математичне планування експерименту

Планування дослідження здійснювалося на основі плану Бокса-Бенкена, трьох факторний експеримент в трьох рівнях. Оцінка вагомості лінійної регресії здійснювалася на основі критерію Фішера. Нижче можна побачити план експерименту (таблиця 3.1)

Таблиця 3.1 План експерименту

№ досліду	x_1	x_2	x_3
1	2	3	4
1	1	1	1
2	-1	1	1
3	1	-1	1
4	-1	-1	1
5	1	1	-1
6	-1	1	-1
7	1	-1	-1
8	-1	-1	-1
9	1	0	0
10	-1	0	0
11	0	1	0
12	0	-1	0
13	0	0	1
14	0	0	-1
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0

У якості змінних факторів було обрано:

- кількість цементу;
- час ущільнення;
- кількість добавки пластифікатору.

3.3 Підбір складу суміші

Склад для зразків підбирався на основі , згідно з ДСТУ Б В.2.7-215:2010 [23] і приведений нижче.

Оскільки теоретично дуже важко підібрати склад для бетону з певним значенням морозостійкості, то для встановлення оптимального складу в даній роботі було використано рекомендації тематичної літератури, котрі були перевірені дослідним шляхом.

Враховуючи дані, що наведені у попередньому розділі, за проектний клас майбутнього бетону було обрано В30. Для того, щоб забезпечити рівень пористості на відповідному рівні та враховуючи особливості структури вихідних матеріалів водоцементне відношення (В/Ц) було прийняте 0,45. При його значенні менше цього рівня неможливо забезпечити достатній коефіцієнт ущільнення сумішей на наявному лабораторному обладнанні. Це було встановлено на практиці.

Орієнтовна кількість води (В) визначалася згідно таблиці А.2 [23] і складала у даному конкретному випадку для заповнювачів, що використовувалися та з урахуванням введення до складу суміші добавки-суперпластифікатора, складала 155 л/м³. Враховуючи високу водопотребу матеріалу, котрий використовувався у якості заповнювача (див. розділ 4), цей показник був скорегований практичними вишукуваннями до значення 171 л/м³.

З огляду на кількість води замішування та водоцементне відношення кількість цементу (Ц) визначалася за формулою (3.1):

$$Ц = \frac{В}{В/Ц}. \quad (3.1)$$

Для визначення необхідного вмісту щебеню у складі бетонної суміші було використано формулу (3.2):

$$Щ = \frac{1000}{\frac{1}{\rho_i} + \alpha \frac{1}{\rho_c} \times V_{пуст}}, \quad (3.2)$$

де $\rho_i^{щ}$ – істина густина щебеню, кг/дм³;

$\rho_c^{щ}$ – середня густина щебеню, кг/дм³;

α – коефіцієнт розсунення зерен заповнювача, вибирався з таблиці А3 [23];

$V_{пуст}$ – об'єм пустот, котрий визначався на основі даних розділу 4 цієї роботи по формулі (3.3):

$$V_{пуст} = 1 - \frac{\rho_c^{щ}}{\rho_i} = 0,496. \quad (3.3)$$

Дрібний заповнювач підбирався згідно вимог [23]. У його якості виступали золошлакові відходи котлів ТЕС з центральнокіплячим шаром.

$$ЗД = \left[1000 - \left(\frac{Ц}{\rho_c} \right) + \left(\frac{Щ}{\rho_{щ}} \right) + B \right] \times \rho_{зд}, \quad (3.4)$$

де, $Ц$, $Щ$, B – витрата цементу, щебеню та води відповідно, кг;

ρ_c , $\rho_{щ}$, $\rho_{зд}$ - істина густина цементу, щебеню та золошлаку, кг/дм³.

В результаті обчислень було отримано склади бетонів на 1 м³ (таблиця 3.2), з котрих потім отримувалися робочі склади для експерименту.

3.4 Методика виготовлення зразків

Спочатку відбувалося дозування вихідних компонентів (щебеню, цементу та золошлакового матеріалу ТЕС) на електронних лабораторних вагах відповідно до складів. Потім відбувалося приготування до замісу бетонозмішувача (з огляду на В/Ц та ґрунтуючись на попередніх експериментах був вибраний примусовий спосіб перемішування). Вологою ганчіркою протиралися його внутрішні

поверхні для того, щоб нівелювати витрати води замішування на змочування стінок.

Таблиця 3.2 Склади сумішей на об'єм 1000 л

№	Цемент, кг	Вода, л	Щебінь, кг	ЗД, кг	Пл, л	Час ущільнення, хв
1	2	3	4	5	6	7
1	410	184,5	1248	574	10	4
2	350	157,5	1261	683	8	4
3	410	184,5	1248	574	10	2
4	350	157,5	1261	683	8	2
5	410	184,5	1248	574	7	4
6	350	157,5	1261	683	6	4
7	410	184,5	1248	574	7	2
8	350	157,5	1261	683	6	2
9	410	184,5	1248	574	8	3
10	350	157,5	1261	683	7	3
11	380	171	1254	629	8	4
12	380	171	1254	629	8	2
13	380	171	1254	629	9	3
14	380	171	1254	629	7	3
15	380	171	1254	629	8	3
16	380	171	1254	629	8	3
17	380	171	1254	629	8	3

У працюючий змішувач всипалися сухі компоненти (щебінь попередньо був просіяний через дрібне сито, для відокремлення пиловидних домішок). Потім вони (компоненти) перемішувалися певний час, котрий був однаковим в усіх випадках, без присутності води.

Вода та пластифікатор вводилися сумісно. Після їх введення суміш перемішувалася до досягнення необхідної консистенції, котра визначалася візуально.

Зі свіже приготованої бетонної суміші формувалися зразки-кубики $100 \times 100 \times 100$ мм (форми для цього попередньо змащувались мастилом). Потім зразки ущільнювались на лабораторній віброплощині. Для цього процесу була використана спеціально розроблена насадка для форм та привантаження, котре складало для усіх випадків понад 60 г/см^2 . Час ущільнення варіювався відповідно

до плану експерименту. Якість ущільнення кожної серії зразків контролювалося визначенням коефіцієнта ущільнення. При виборі режиму ущільнення (часу та ваги при вантаженні) опиралися на таблицю 17.3 [2].

Зразки витримувалися протягом більш ніж 28 діб у камері нормального твердіння.

3.5 Підготовка до випробувань

Через недосконалість наявних форм для виготовлення зразків у процесі визначення геометричних розмірів зразків було виявлено, що вони перевищують нормативні понад встановлене значення. Для їх приведення до відповідності нормативним вимогам було вирішено обрізати їх за допомогою станка для мокрого різання.

До випробувань на морозостійкість зразки готувалися згідно пунктів 4.5-4.10 [7].

3.6 Випробування

У кожної серії зразків визначалися такі параметри як середня густина (згідно з [12]), межа міцності на стиск (згідно з [22]), водопоглинання (згідно з [12]) та морозостійкість.

В межах даної магістерської роботи для визначення морозостійкості використовувався прилад «Бетон-фрост», робота якого ґрунтується на прискореному дилатометричному методі [15].

Для контролю впливу часу ущільнення на характер структури бетонних зразків визначався коефіцієнт ущільнення. Це робилося наступним чином: для форми, в яку в подальшому укладалася бетонна суміш, визначалася маса і об'єм, потім, після формування зразка, визначалася маса форми разом із сумішшю, далі обраховувалася вага, власне, самої суміші, потім визначалася її густина, результат від ділення маси суміші на її об'єм. Коефіцієнт ущільнення визначався за формулою (3.5)

$$K_{уц} = \frac{\rho_{фактична}}{\rho_{теоретична}}, \quad (3.5)$$

де, $\rho_{фактична}$ - густина бетонної суміші, котра знаходиться у формі виражена у $\text{кг}/\text{м}^3$;

$\rho_{теоретична}$ - теоретична густина бетонної суміші, котра обчислюється як вага усіх сипких компонентів та води, котрі використовуються для отримання 1 м^3 суміші, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Для надання експерименту наочності та задля порівняння, використовуючи ті ж самі компоненти (цемент, щебінь, добавка-суперпластифікатор та вода) та обладнання, була виготовлена серія контрольних зразків, у яких замість золошлакового матеріалу, у якості заповнювача використаний пісок. Для цієї суміші було вирішено залишити таким самим кількість цементу та водоцементне відношення, всі інші компоненти підбиралися аналогічно до пункту 3.3. Склад для цієї суміші наведено у таблиці 3.3

Таблиця 3.3 Склад контрольної суміші

Компонент	Одиниці виміру	Кількість на 1 м^3
Цемент	кг	410
Вода	л	182
Щебінь	кг	1136
Пісок	кг	700
Пластифікатор	л	4,57

РОЗДІЛ 4

ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

4.1 Цемент

Для проведення експерименту використовувався цемент СЕМ І (42,5R) портландцемент загально-будівельного призначення ПАТ "ХайдельбергЦемент Україна". Згідно даних виробника даний цемент відзначається високою ранньою міцністю, а високий вміст у клінкері C_3S і низький вміст C_3A свідчить про можливість отримання на основі такого цементу бетонів високої морозостійкості.

4.1.1 Тонкість помелу

Тонкість помелу цементу визначалася згідно вимог нормативних документів [21], використовувався метод визначення вищевказаної характеристики за залишком на ситі. Нижче приведені результати, у таблиці 4.1

Таблиця 4.1 Результати визначення тонкості помелу цементу

№ досліду	Маса наважки, г	Залишок на ситі, г	Тонкість помелу, %
1	50	2,61	5,22

4.1.2 Нормальна густина

Нормальна густина визначалася згідно з [19]. Результати наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 Результати визначення нормальної густоти цементного тіста

№ досліду	Кількість води замішування, мл	Показання приладу Віка, мм	Нормальна густина, %
1	110	6	27,5

4.1.3 Марка за міцністю на стиск

Марка за міцністю на стиск визначалася на зразках-балочках розмірами 40x40x160 мм згідно з вимогами [20]. Результати наведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 Результати визначення марки цементу за міцністю на стиск

№	Вік зразка, діб	Руйнуюче зусилля, Н	Границя міцності, МПа	Середнє значення
1	28	125300	50,1	50,1
2	28	125420	50,2	
3	28	126320	50,5	
4	28	125420	50,2	
5	28	125300	50,1	
6	28	126810	50,7	

Відповідно до таблиці 1 [17] цемент, котрий використовувався для дослідів, мав марку 500.

4.2 Щебінь

Для випробувань використовувався щебінь лабораторії будівельних матеріалів. Перед початком випробувань він був просіяний через сита для відбору фракції 5-10. Це пов'язано із особливістю конструкції бетонозмішувача, котра не дозволяє змішувати суміші, що містять у своєму складі зерна заповнювача розмірами понад 10 мм.

Окрім того щебінь для випробування був промитий та висушений, для того, щоб такі параметри як запиленість та вологість не впливали на результати дослідів.

4.2.1 Насипна густина

Насипна густина визначалася згідно вимог [16]. Результати наведені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 Результати визначення насипної густини лабораторного щебеню фракції 5-10

Фракція	Об'єм проби, см ³	Маса проби, г	ρ_m , (г/см ³)
5-10	5000	6805	1,361

4.3 Золошлак

Для дослідів використовувався золошлак (зола-донна) Старобешівської ТЕС. Постачальником був заявлений хімічний склад, що наведений нижче, у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 Хімічний склад золошлаку

Найменування	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	N ₂ O	SO ₃	Fe ₂ O ₃
Вміст, %	42,4	22,14	9,76	1,07	2,97	0,8	6,58	13,71

4.3.1 Істина густина

Істина густина визначалася прискореним методом, згідно з вимогами [12]. Результати випробувань наведені у таблиці 4.6

Таблиця 4.6 Результати визначення істинної густини золошлаку

Маса об'ємоміра з водою, г	Маса об'ємоміра з золошлаком, г	Маса наважки золошлаку, г	Об'єм, см ³	Істина густина, г/см ³
372	424	52	20	2,6

4.3.2 Насипна густина

Насипна густина визначалася згідно з вимогами, котрі окреслені у [7]. Результати випробування наведені у таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 Результати визначення насипної густини золошлаку

№ досліду	Об'єм циліндра, см ³	Вага циліндра, г	Вага циліндра з золошлаком, г	Вага золошлаку, г	Густина, г/см ³
1	995	274	1475	1201	1,207
2	995	274	1473	1199	1,205

У подальшому за насипну густину золошлаку приймалося середнє значення, котре становить 1,206 г/см³.

4.3.3 Модуль крупності

Модуль крупності визначався згідно [7]. Результати випробувань занесені у таблицю 4.8.

Таблиця 4.8 Результати визначення модуля крупності золошлаку

№ сита	Зола донна		
	Вага залишку, г	a_i %	A_i , %
5	0	0,00	0
2,5	14	1,40	1
1,25	43	4,30	6
0,63	122	12,21	18
0,315	213	21,32	39
0,16	297	29,73	69
Пройшло крізь сито 0,16	313	31,33	
Σ		999	
$M_{кр}$		1	

4.3.4 Водопотреба

Водопотреба визначалася згідно вимог [7]. Результати випробувань наведені у таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 Результати визначення водопотреби золошлаку

№ дослідю	Вміст цементу г	Вміст золошлаку, г	Кількість води, мл	В/Ц	Розплив, мм
1	700	0	206	0,29	172
2	250	210	210	0,84	170

Водопотреба визначається за формулою 4.1.

$$W = \frac{((B/C))_2 - ((B/C))_1}{2,3} \cdot 100\% = \frac{0,84 - 0,29}{2,3} \cdot 100\% = 24\%. \quad (4.1)$$

4.4 Пісок

Пісок був використаний у якості дрібного заповнювача для контрольних зразків. Це – звичайний річковий пісок, характеристики якого наведені нижче.

4.4.1 Насипна густина

Насипна густина визначалася згідно з [24]. Результати випробувань наведені у таблиці 4.10.

Таблиця 4.10 Результати визначення насипної густини піску

№ досліду	Об'єм циліндра, см ³	Вага циліндра, г	Вага циліндр з піском, г	Вага піску, г	Густина, г/см ³
1	995	274	1676,95	1402,95	1,41
2	995	274	1657,05	1383,05	1,39

За значення насипної густини піску приймалося середнє значення, котре становить 1,4 г/см³.

4.4.2 Модуль крупності

Модуль крупності визначався згідно вимог [24]. Результати його визначення наведені у таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 Результати визначення модуля крупності піску

	Пісок		
	Вага залишку, г	a _i %	A _i %
5	0		0
2,5	11	1,10	1
1,25	18	1,80	3
0,63	12	1,20	4
0,315	57	5,71	10
0,16	722	72,27	82
Пройшло крізь сито 0,16	180	18,02	
Σ	999		
M _{кр}	1		

Окремо слід відзначити, що при підборі складу бетону з використанням піску у якості заповнювача було прийняте значення істинної густини рівне 2,64 г/см³.

Для дослідів використовувалася також добавка-суперпластифікатор BASF GLENIUM 51.

Порівняльна характеристика матеріалів, котрі були використані у представленій роботі та рекомендовані нормативними документами наведена у таблиці 4.12.

Таблиця 4.12 Порівняльна характеристика матеріалів

Назва показника	Одиниці виміру	Отримане значення	Нормативне значення	Обґрунтування
Цемент ПЦІ 500-Н				
Тонкість помелу	%	5,22	<15	п.3.2.6 [13]
Нормальна густина	%	27,5		
Марка	МПа	50,1	50>	таблиця 2[13]
Щебінь				
Насипна густина	кг/м ³	1361		
Золошлак				
Насипна густина	кг/м ³	1206		
Істина густина	г/см ³	2,6		
Модуль крупності	-	1		
Водопотреба	%	24		
Пісок				
Насипна густина	кг/м ³	1400	не менше 1100	п.4.4.2 [17]
Модуль крупності	-	1	1-4	п. 4.5.1.1 [17]

За результатами розсівів піску та золошлаку були побудовані криві, котрі зображені на рисунках 4.1 та 4.2.

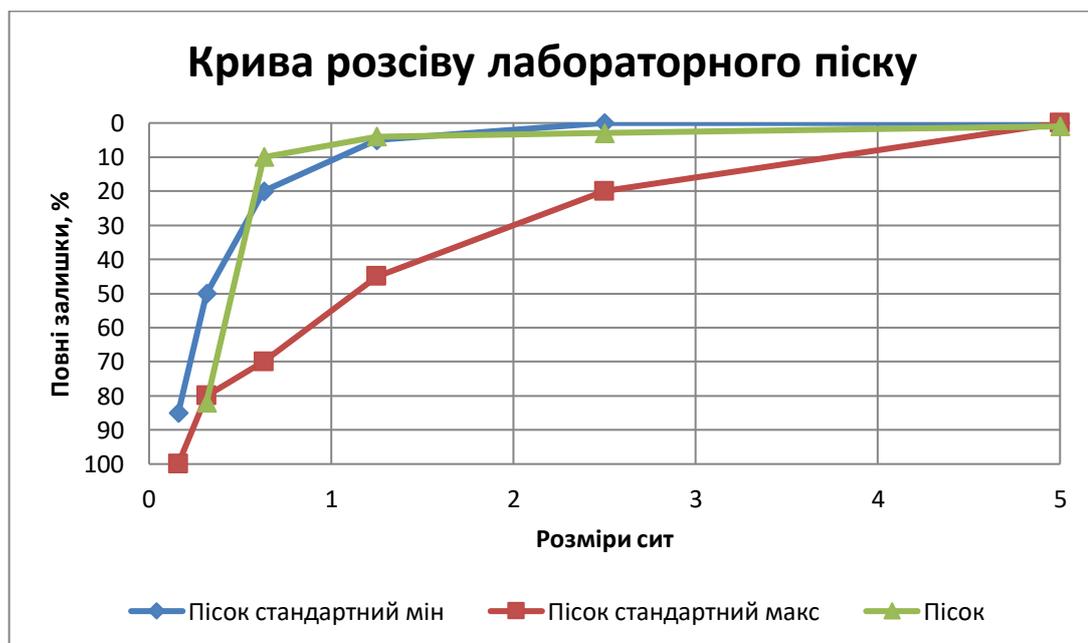


Рисунок 4.1 Крива розсіву лабораторного піску, котрий використовувався для контрольних зразків

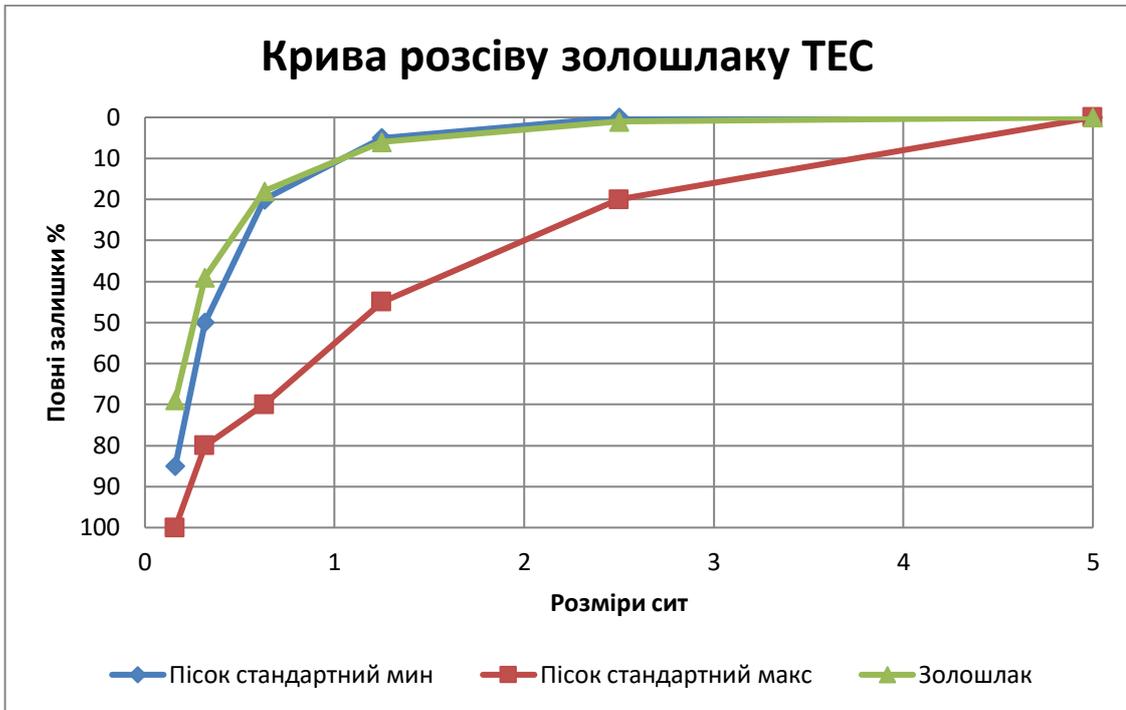


Рисунок 4.2 Крива розсіву золошлаку ТЕС

РОЗДІЛ 5

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Аналіз результатів дослідження проводився з використанням програмних комплексів MS Office Excel та STATISTICA 10. У підрозділах 5.1-5.5 наведені результати визначення досліджуваних величин, котрі перераховані у розділі 3 цієї роботи.

5.1 Результати визначення коефіцієнта ущільнення

Як відомо коефіцієнт ущільнення для бетонних сумішей повинен складати 0,96-0,98.

Таблиця 5.1 Результати визначення коефіцієнта ущільнення

Серія №	Час ущільнення, с	Теоретична густина кг/м ³	Фактична густина кг/м ³	Коефіцієнт ущільнення
1	2	3	4	5
1	4	2417	2371	0,98
2	4	2451	2353	0,96
3	2	2417	2352	0,97
4	2	2451	2290	0,93
5	4	2417	2317	0,96
6	4	2451	2328	0,95
7	2	2417	2328	0,96
8	2	2451	2281	0,93
9	3	2417	2321	0,96
10	3	2451	2353	0,96
11	4	2434	2316	0,95
12	2	2434	2382	0,98
13	3	2434	2364	0,97

Продовження таблиці 5.1

1	2	3	4	5
14	3	2434	2351	0,97
15	3	2434	2364	0,97
16	3	2434	2372	0,97
17	3	2434	2371	0,97

Як видно з таблиці 5.1 у деяких випадках (для серій 4, 6, 8, 11) значення коефіцієнту знаходиться нижче норми. Тобто для цих зразків не було забезпечено відповідного рівня ущільнення. Оскільки у даній роботі не відбувалося варіювання ваги привантаження, котре становило в усіх випадках 60 г/см², то можна зробити висновок про те, що цієї ваги не вистачило для забезпечення відповідного рівня ущільнення у вищезазначених серіях зразків.

Таблиця 5.2 Результати обрахунку коефіцієнтів регресії за допомогою програмного комплексу STATISTICA 10

Factor	Regressn - Coeff.	Std.Err.	t(8)	p	-95,% - Cnf.Limt	+95,% - Cnf.Limt
Mean/Interc.	-0,503160	0,940379	-0,53506	0,607156	-2,67168	1,665358
(1)Витрата цементу, кг(L)	0,006399	0,005282	1,21150	0,260273	-0,00578	0,018578
Витрата цементу, кг(Q)	-0,000008	0,000007	-1,15493	0,281449	-0,00002	0,000008
(2)Час ущільнення, хв(L)	0,046333	0,037654	1,23050	0,253462	-0,04050	0,133164
Час ущільнення, хв(Q)	-0,007222	0,006253	-1,15493	0,281449	-0,02164	0,007198
(3)Витрата пластифікатору, %(L)	0,115309	0,305904	0,37694	0,716018	-0,59011	0,820725
Витрата пластифікатору, %(Q)	-0,024691	0,069482	-0,35536	0,731505	-0,18492	0,135535

Результатом проведеного аналізу, за допомогою модулю ANOVA, стало отримання коефіцієнтів регресії. Тепер їх можна підставити у загальне рівняння виду 5.1 та отримати рівняння регресії для коефіцієнту ущільнення 5.2.

$$\begin{aligned}
 y = & b_0 + b_1x_1 + b_2x_1^2 + b_3x_2 + b_4x_2^2 + b_5x_3 + b_6x_3^2 + b_7x_1x_2 + b_8x_1x_2^2 + b_9x_1^2x_2 \\
 & + \\
 & + b_{10}x_1^2x_2^2 + b_{11}x_1x_3 + b_{12}x_1^2x_3 + b_{13}x_2x_3.
 \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$y = -0,50316 + 0,006399x_1 - 0,0000008x_1^2 + 0,046333x_2 - 0,007222x_2^2 +$$

$$+0,115309x_3 - 0,024691x_3^2. \quad (5.2)$$

Рівняння 5.2 дозволяє, знаючи вхідні параметри, тобто x_1 , x_2 , x_3 , отримати відгук, у даному випадку коефіцієнт ущільнення.

Користуючись модулем industrial Statistic програми STATISTICA 10, будуємо діаграми середніх маргінальних для кожної із вхідних (незалежних) змінних.

Так звані «вусика» на діаграмі показують викиди вихідного параметра при певних значеннях вхідної величини, «кружечок» вказує на медіану, тобто середнє значення контрольованої величини при кожному значенні змінної.

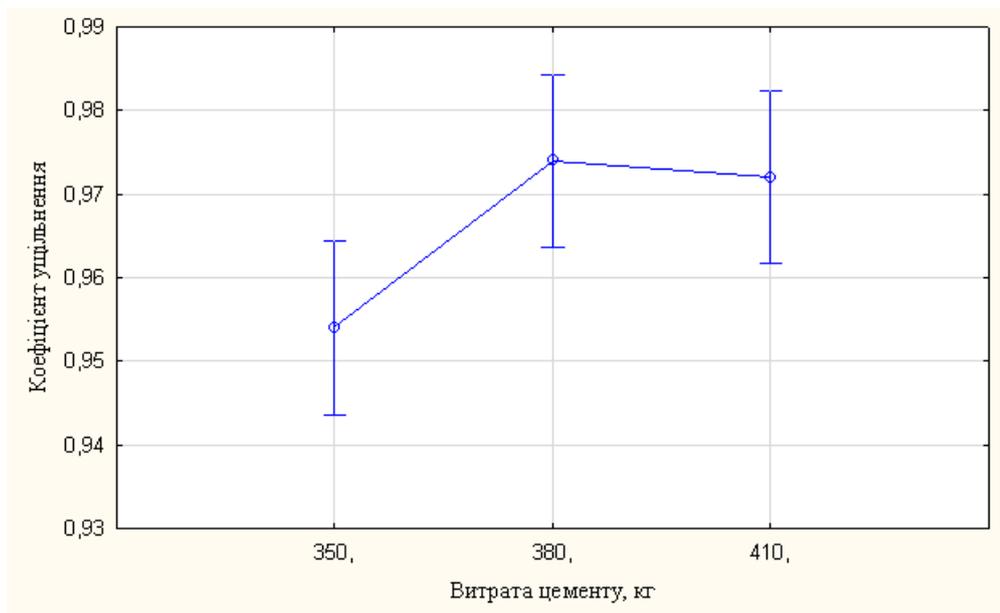


Рисунок 5.1 Діаграма маргінальних середніх залежностей коефіцієнта ущільнення від витрати цементу

З рисунку 5.1 випливає, що підвищення витрати цементу з 380 кг/м³ до 410 кг/м³ не призводить до суттєвого покращення коефіцієнта ущільнення суміші. Низьке ж значення контрольованої величини при витраті в 350 кг/м³ пояснюється тим, що, враховуючи особливості матеріалу, котрий використовувався в якості заповнювача (див. розділ 4), низький водовміст суміші призвів до поганого ущільнення. Можливим рішенням цього було б використання більшої ваги привантаження.

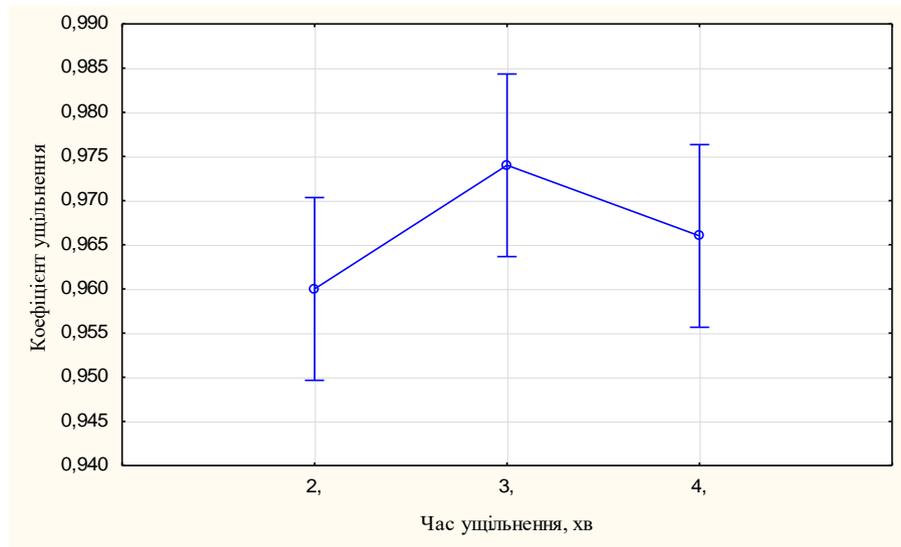


Рисунок 5.2 Діаграма маргінальних середніх залежностей коефіцієнта ущільнення від часу ущільнення

Рисунок 5.2 вказує на те, що середні значення контрольованої величини потрапляють у допустимі рамки для коефіцієнта ущільнення бетонних сумішей. Тому для бетонів на заповнювачах із золошлаків ТЕС можливим для ущільнення весь варійований діапазон часу. Також, як видно з рисунка, найкращі результати дає ущільнення тривалістю 3 хвилини.

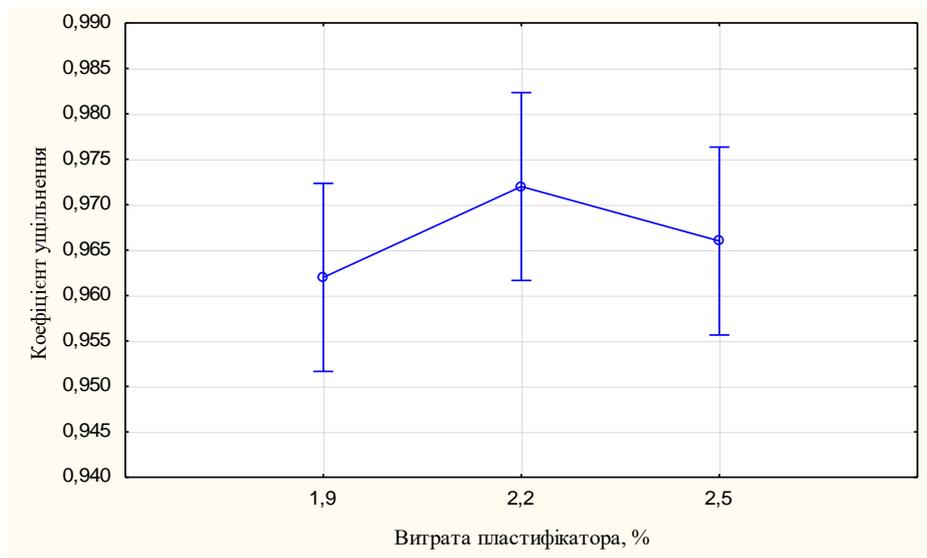


Рисунок 5.3 Діаграма маргінальних середніх залежностей коефіцієнта ущільнення від витрати пластифікатора

Рисунок 5.3 ілюструє, що зміна витрати пластифікатора несуттєво позначається на зміні коефіцієнту ущільнення. Якщо відкинути викиди, то увесь діапазон варіювання змінної дозволяє отримати допустимі значення відгуку.

Як можна було побачити з вищенаведених рисунків на значення коефіцієнту ущільнення найсильніший вплив чинить витрата цементу. Для того, щоб проілюструвати це більш наочно скористаємося картою Парето, котру побудуємо використовуючи відповідний модуль програмного комплексу STATISTICA (рисунок 5.4).

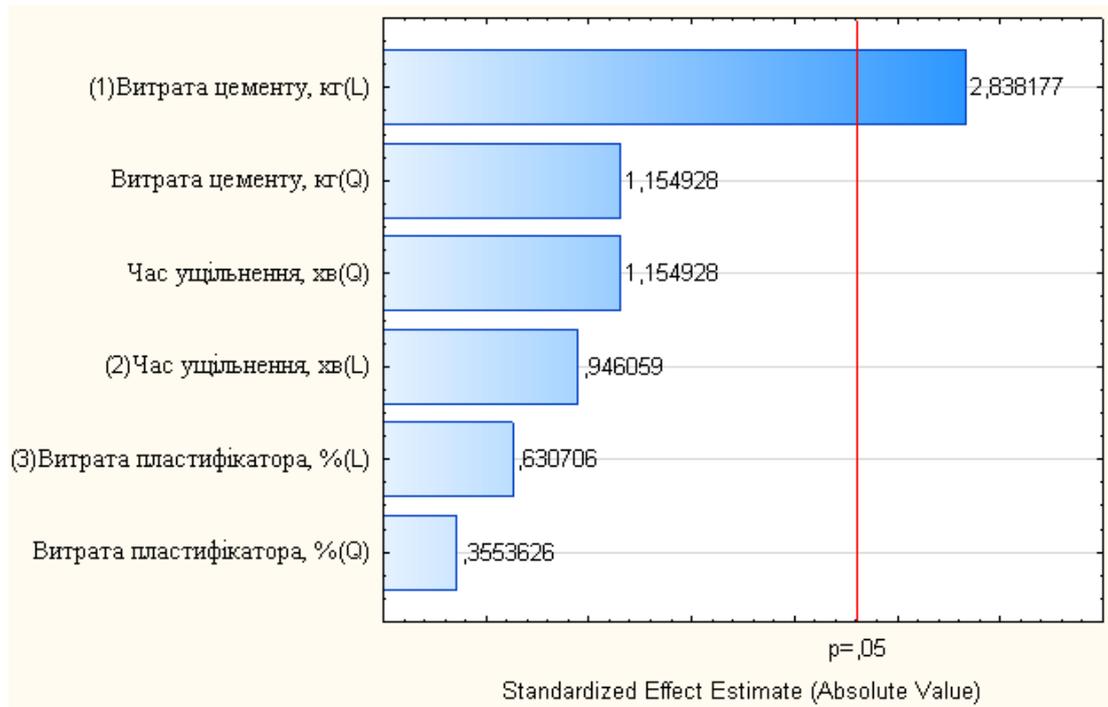


Рисунок 5.4 Карта Парето стандартизованих ефектів

Силу взаємодії факторів можна оцінити коефіцієнтом кореляції. Кореляція (від лат. *Correlatio* - співвідношення, взаємозв'язок), кореляційна залежність - статистичний взаємозв'язок двох або декількох випадкових величин (або величин, які можна з деяким допустимим ступенем точності вважати такими). Коефіцієнт кореляції набуває значень від -1 до +1. Він показує на скільки той чи інший фактор впливає або не впливає на кінцевий результат. В таблиці 5.4 наведено тлумачення значенням коефіцієнта кореляції.

Таблиця 5.3 Значимість коефіцієнта кореляції

Кореляція	Негативна	Позитивна
Відсутня	-0,09 до 0,0	0,0 до 0,09
Низька	-0,3 до -0,1	0,1 до 0,3
Середня	-0,5 до -0,3	0,3 до 0,5
Висока	-1,0 до -0,5	0,5 до 1,0

Таблиця 5.4 Кореляція факторів

Фактор	Коефіцієнт ущільнення
(1)Витрата цементу, кг(L)	0,59
Витрата цементу, кг(Q)	0,42
(2)Час ущільнення, хв(L)	0,20
Час ущільнення, хв(Q)	0,42
(3)Витрата пластифікатору, %(L)	0,13
Витрата пластифікатору, %(Q)	0,30

Таблиця 5.4 підтверджує попередні висновки.

Побудуємо поверхні залежності коефіцієнту ущільнення від факторів варіювання.

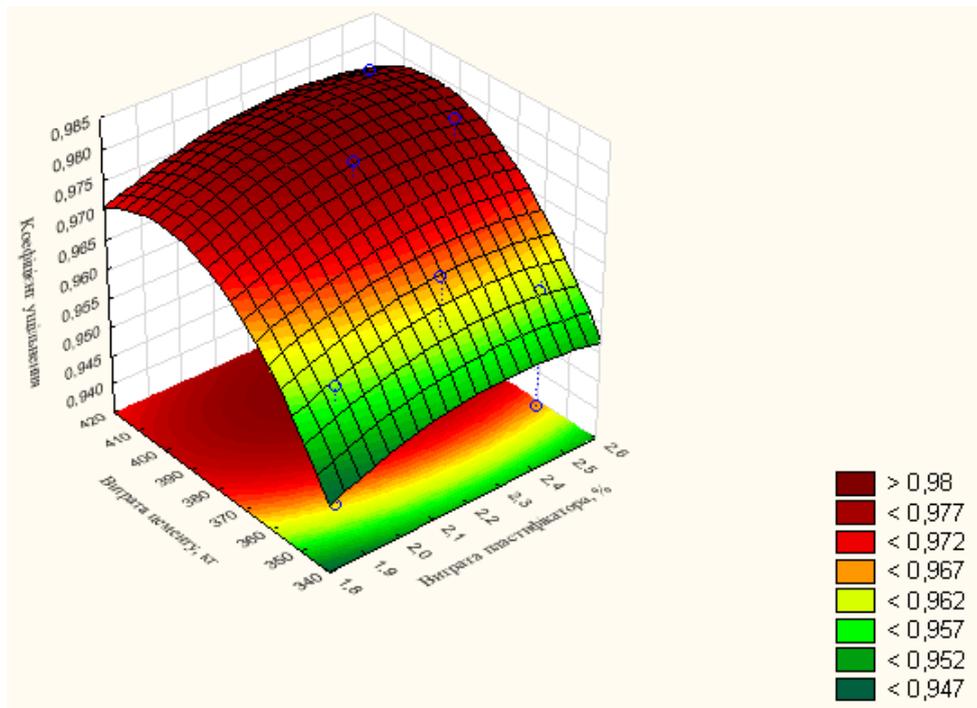


Рисунок 5.5 Поверхня впливу витрати цементу та витрати пластифікатору на значення коефіцієнту ущільнення

Вищенаведений рисунок наочно показує, як між собою пов'язані коефіцієнт ущільнення та витрата цементу з пластифікатором.

Якщо спроектувати поверхню на площину (рисунок 5.6) то буде явно видно, що найбільші значення коефіцієнту ущільнення досягаються при витраті цементу, котра знаходиться в околі 400 кг/м³, та витраті пластифікатору, котра знаходиться в околі 2,4 %. Поверхня має пік, а отже в результаті проведення експерименту вдалося визначити найкращі співвідношення вищезазначених компонентів.

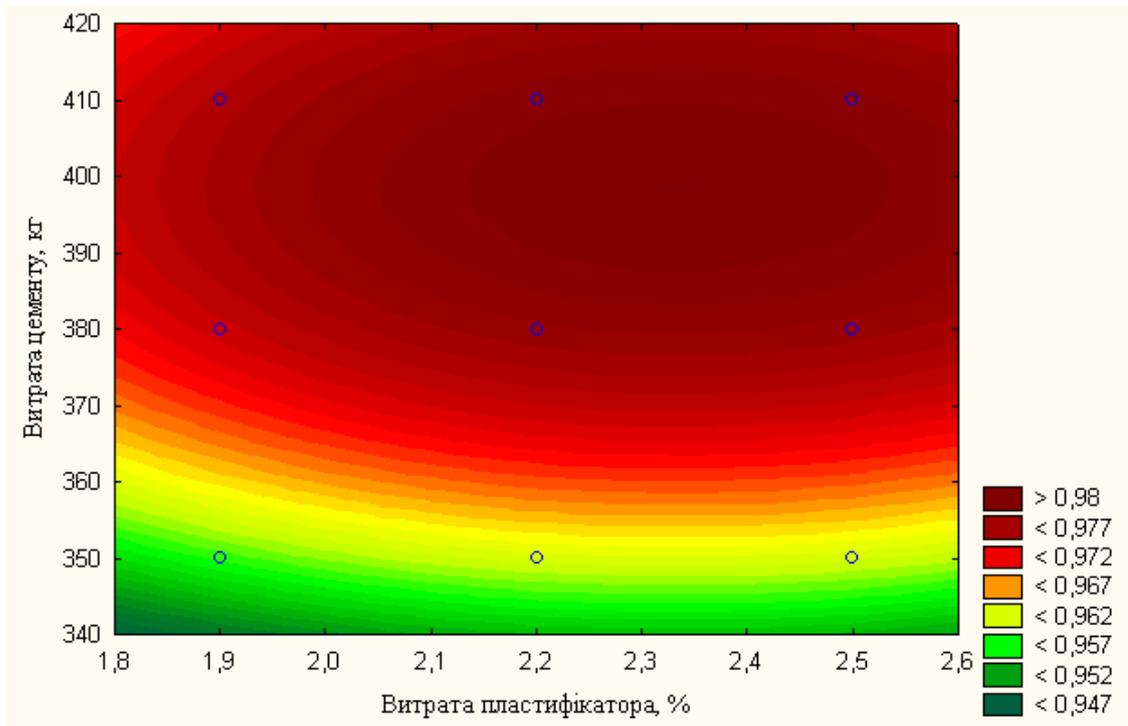


Рисунок 5.6 Проекція поверхні 5.5 на площину

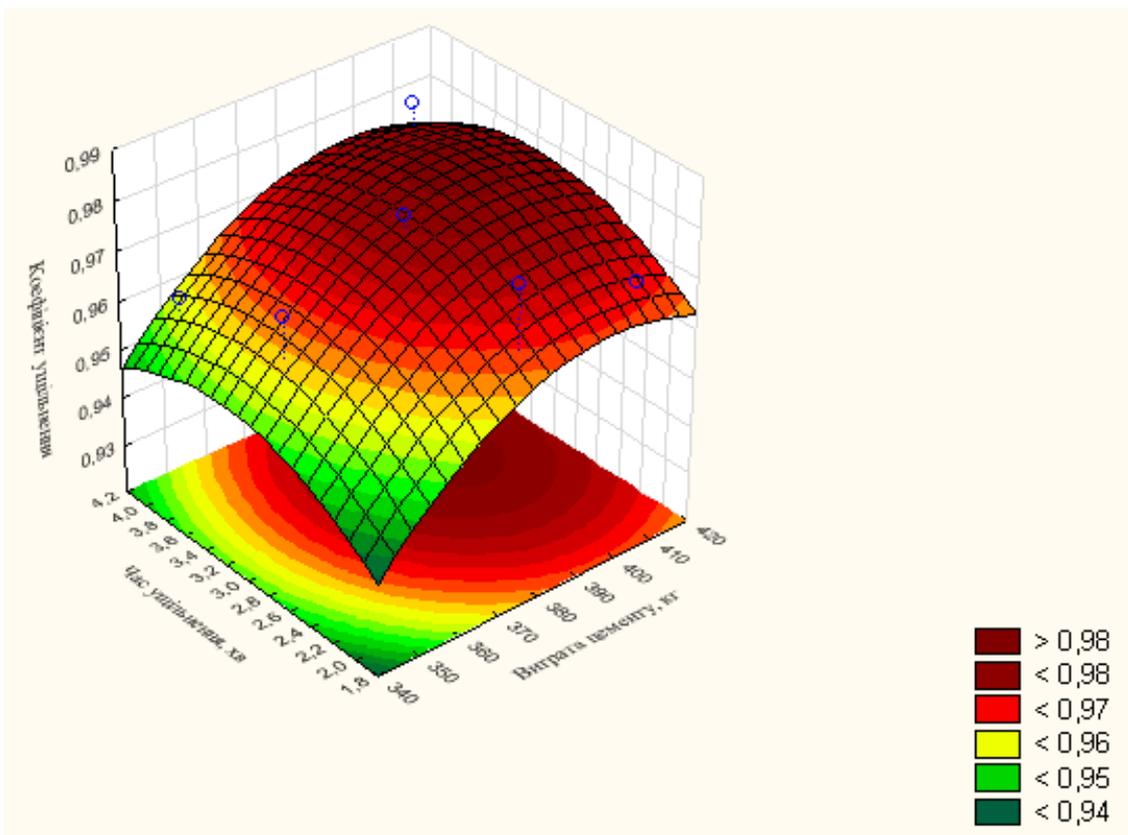


Рисунок 5.7 Поверхня витрати цементу та часу ущільнення на коефіцієнт ущільнення

Дивлячись на рисунок 5.7 та 5.8 можна побачити, що оптимальний час ущільнення складає приблизно 3,2 хвилини. З рисунку 5.8 видно, що при збільшенні витрати цементу вагомість часу ущільнення зменшується.

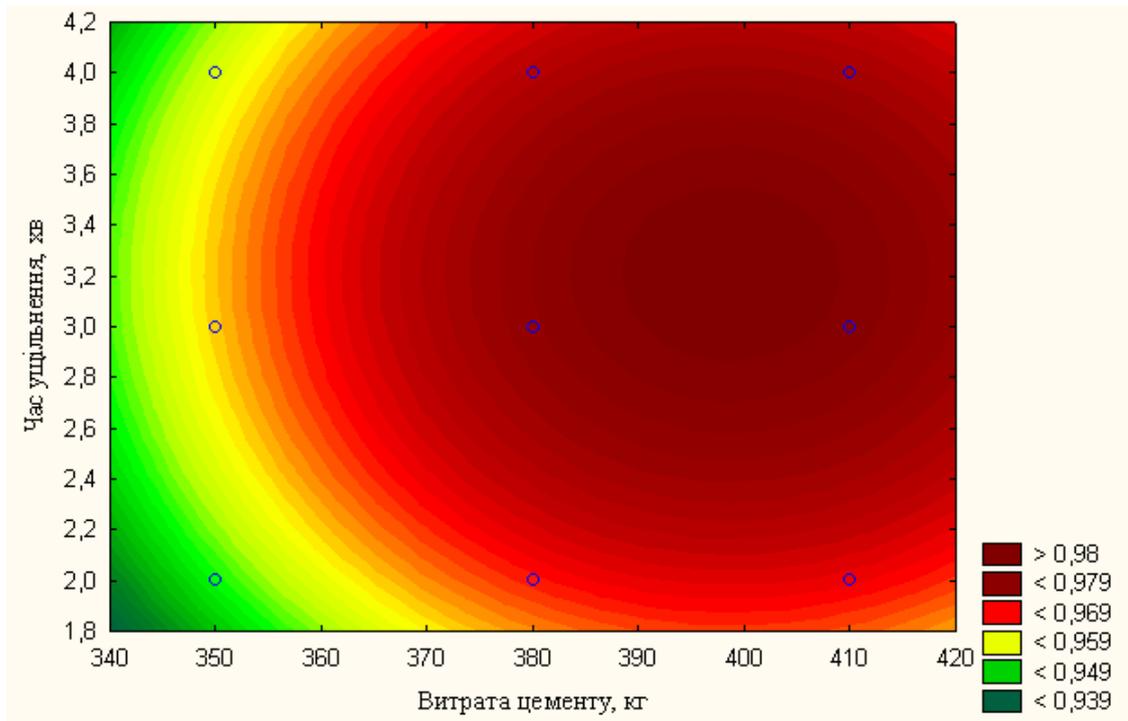


Рисунок 5.8 Проекція поверхні 5.7 на площину

5.2 Результати визначення середньої густини зразків

Бетон, з якого виготовлялися зразки для досліджень, планувався як важкий. Літературою для такого бетону подається значення густини 2,2-2,5 г/см³. Результати визначень середньої густини серій зразків наведені у таблиці 5.5

Таблиця 5.5 Результати визначення середньої густини зразків

Серія	Густина, середнє значення, г/см ³
1	2
1	2,237
2	2,238
3	2,209
4	2,232
5	2,294
6	2,249

Продовження таблиці 5.5

1	2
7	2,205
8	2,166
9	2,251
10	2,278
11	2,284
12	2,323
13	2,353
14	2,346
15	2,306
16	2,318
17	2,318
Контрольні	2,416

Як видно з таблиці 5.5 майже в усіх випадках, окрім серії 8, вдалося досягти відповідного рівня середньої густини. Також можна помітити, що густина контрольних зразків з піском виявилася дещо вищою, ніж зразків виготовлених з використанням золошлаку. Це може бути пов'язано з особливістю золошлакового матеріалу, котрий є більш пористим у порівнянні зі щільною структурою кварцового піску.

Скориставшись можливостями програмного комплексу STATISTICA, визначимо коефіцієнти рівняння регресії (таблиця 5.6)

Таблиця 5.6 Результати обрахунку коефіцієнтів регресії =

Factor	Regressn - Coeff.	Std.Err.	t(8)	p	-95,% - Cnf.Limt	+95,% - Cnf.Limt
Mean/Interc.	-9,72118	3,147903	-3,08814	0,014931	-16,9803	-2,46210
(1)Витрата цементу, кг(L)	0,06396	0,017680	3,61753	0,006807	0,0232	0,10473
Витрата цементу, кг(Q)	-0,00008	0,000023	-3,61203	0,006861	-0,0001	-0,00003
(2)Час ущільнення, 60в.(L)	0,23637	0,126047	1,87523	0,097618	-0,0543	0,52703
Час ущільнення, 60в.(Q)	-0,03661	0,020933	-1,74896	0,118421	-0,0849	0,01166
(3)Витрата пластифікатору, %(L)	-0,45601	1,024009	-0,44532	0,667892	-2,8174	1,90536
Витрата пластифікатору,%(Q)	0,10432	0,232590	0,44852	0,665678	-0,4320	0,64068

Підставивши отримані коефіцієнти у рівняння 5.1 отримаємо рівняння 5.3, котре є рівнянням регресії для досліджуваної величини.

$$y = -9,72118 + 0,06396x_1 - 0,00008x_1^2 + 0,23637x_2 - 0,03661x_2^2 - 0,45601x_3 + 0,10432x_3^2. \quad (5.3)$$

Скориставшись можливостями комплексу MS Office Excel побудуємо графіки залежності середньої густини від факторів варіювання на максимальному (рисунок 5.9), середньому (рисунок 5.10) та мінімальному (рисунок 5.11) рівнях.

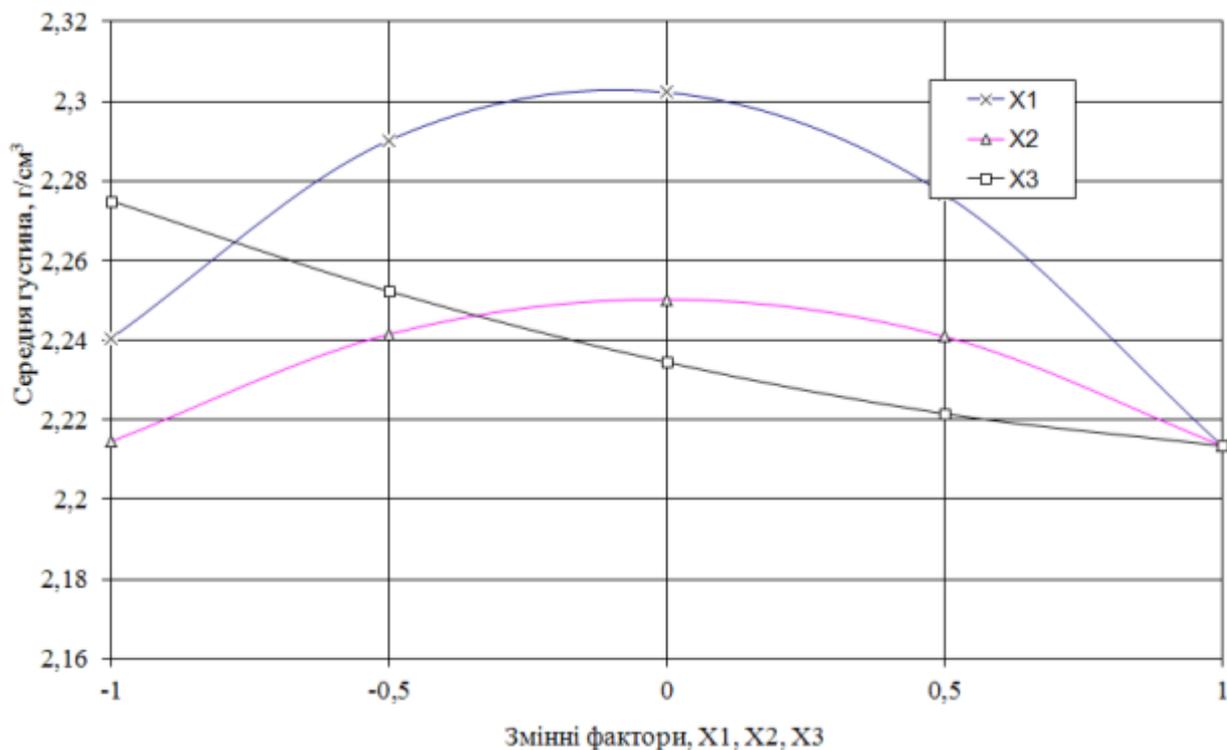


Рисунок 5.9 Залежність середньої густини зразків від витрати цементу, часу ущільнення та витрати пластифікатора, максимальний рівень

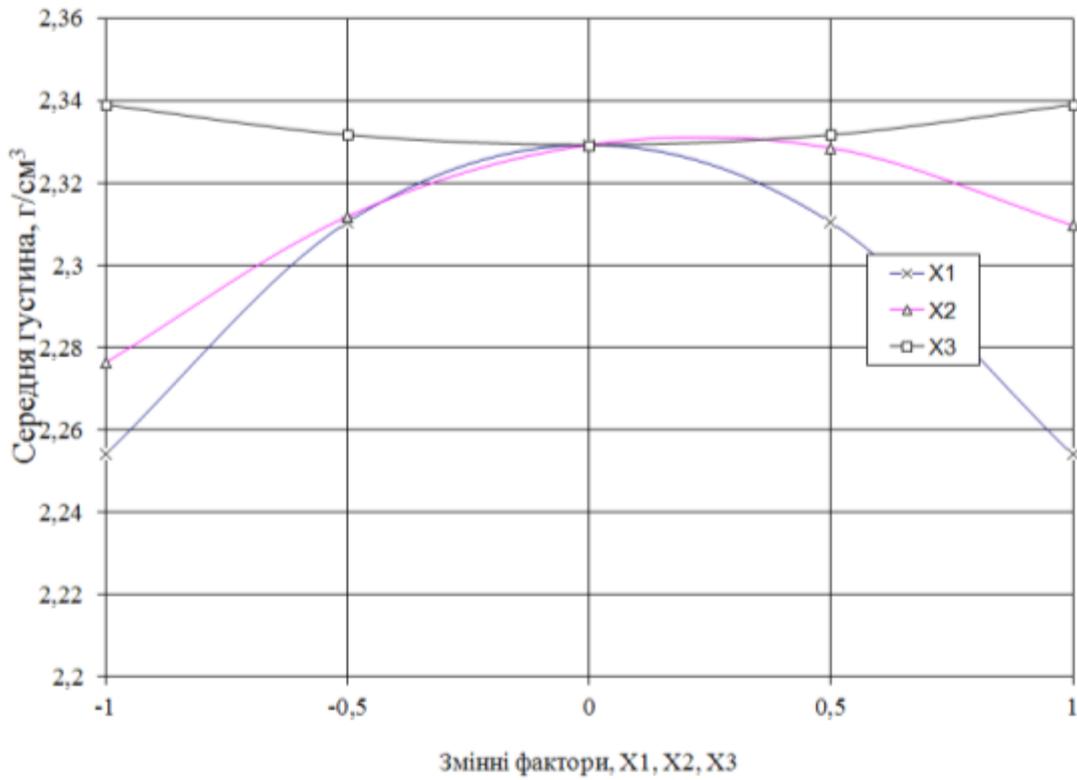


Рисунок 5.10 Залежність середньої густини зразків від витрати цементу, часу ущільнення та витрати пластифікатору, нульовий рівень

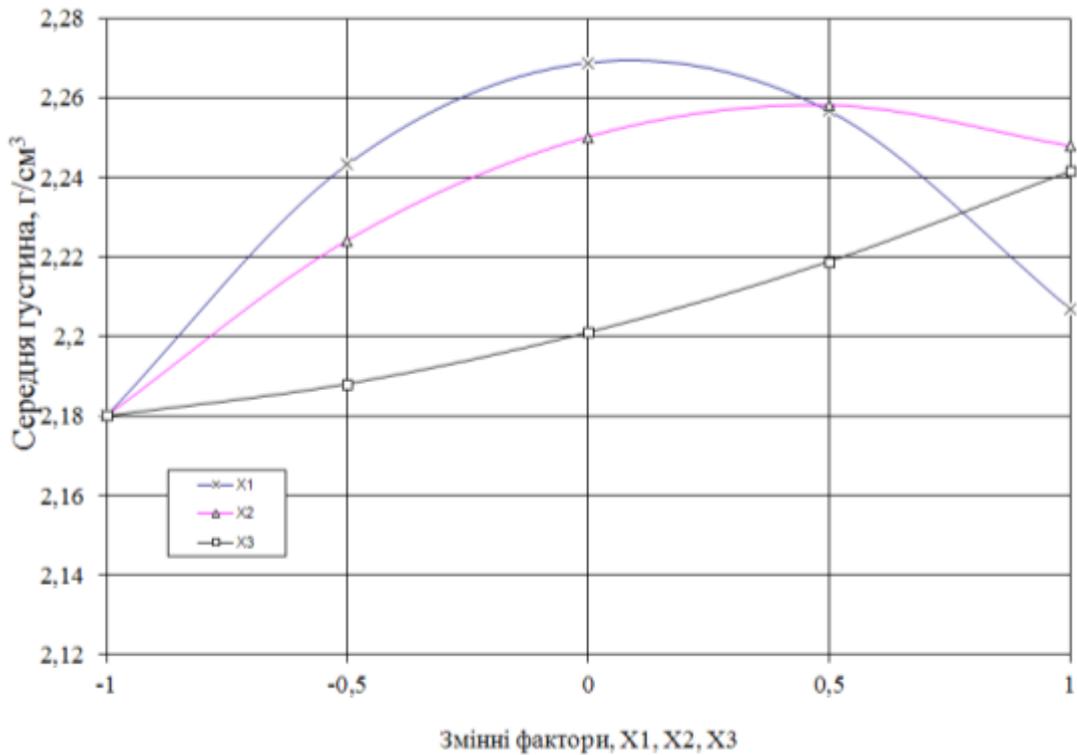


Рисунок 5.11 Залежність середньої густини зразків від витрати цементу, часу ущільнення та витрати пластифікатору, мінімальний рівень

Як видно з рисунків 5.9 - 5.11, найкращих значень середня густина набуває тоді, коли змінні фактори перебувають на нульовому рівні.

Для наочності відображення можна побудувати поверхні впливу за допомогою програмного комплексу STATISTICA.

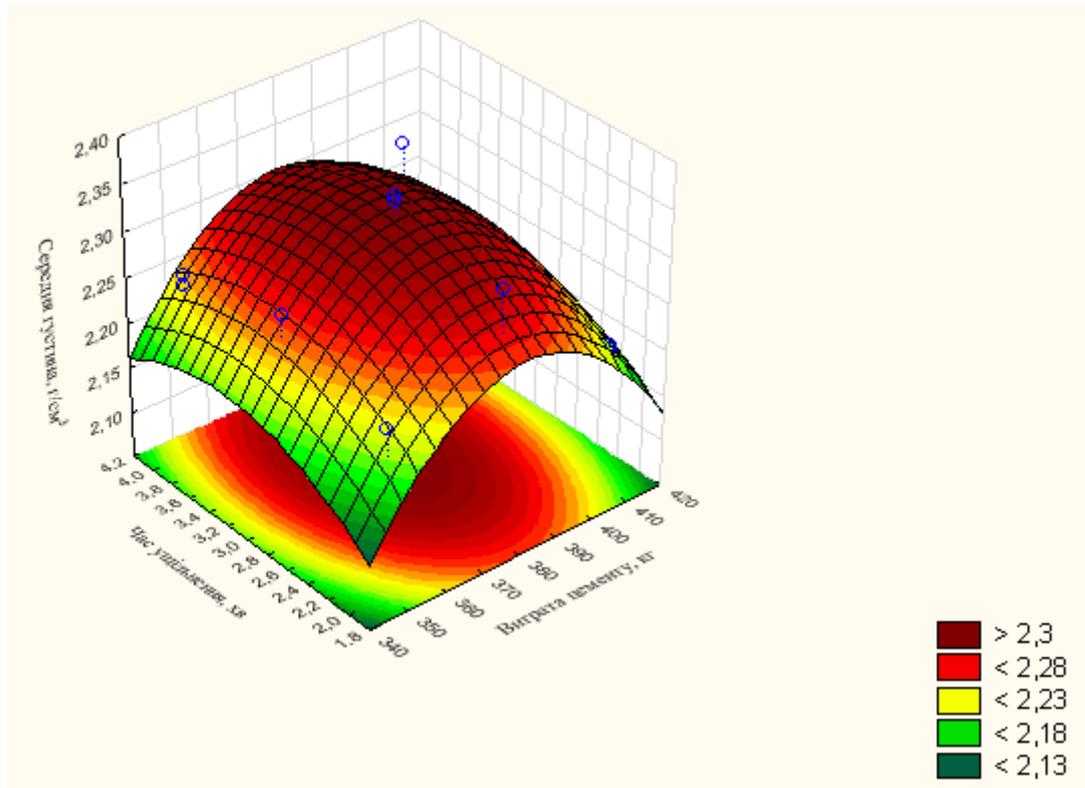


Рисунок 5.12 Поверхня впливу витрати цементу та часу ущільнення на середню густину

Для пояснення вищезазначеного факту, а саме, що найбільша середня густина отримується при середніх витраті цементу та часові ущільнення, визначимо залежність досліджуваного відгуку від інших факторів (т. з. кореляцію). У цьому нам допоможе програмний комплекс STATISTICA.

Таблиця 5.7 Результати визначення коефіцієнтів кореляції

Фактор	Середня густина, г/см ³
(1)Витрата цементу, кг(L)	0,05
Витрата цементу, кг(Q)	0,79
(2)Час ущільнення, хв(L)	0,26
Час ущільнення, хв(Q)	0,57
(3)Витрата пластифікатору, %(L)	0,01
Витрата пластифікатору, %(Q)	0,32

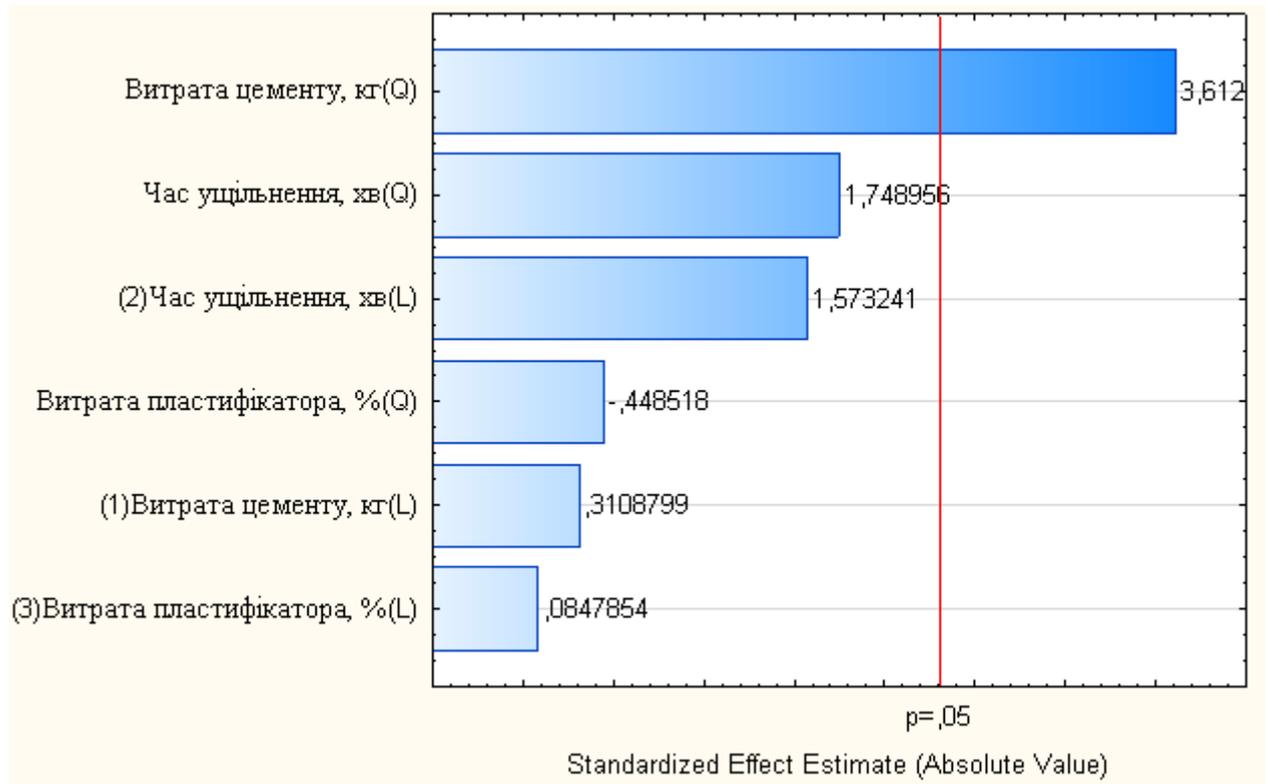


Рисунок 5.13 Карта Парето стандартизованих ефектів

З таблиці 5.7 видно, що досліджуваний фактор сильно пов'язаний з витратою цементу та часом ущільнення суміші, а витрата пластифікатора володіє середньої кореляцією (для пояснення див. таблицю 5.3). STATISTICA дає можливість визначити кореляцію не тільки між залежними і незалежними змінними але і силу зв'язку між відгуками (таблиця 5.8)

Таблиця 5.8 Кореляція середньої густини з відгуками

Фактор	Середня густина, г/см ³
Коефіцієнт ущільнення	0,60
Водопоглинання за масою, %	-0,52
Міцність при стиску, МПа	0,20
Морозостійкість, цикли	0,51

Найбільш пов'язаним із середньою густиною є коефіцієнт ущільнення, що не дивно. При його обчисленні, ми використовували таке поняття як теоретична густина, як би коефіцієнт ущільнення був одиницею, то середня густина досліджуваних зразків набувала теоретичного значення. Саме цим пояснюється висока ступінь зв'язку між середньою густиною та коефіцієнтом ущільнення.

Поглянувши у таблицю 5.1 і співставивши її з планом експерименту (таблиця 3.1), легко помітити, що чим більша витрата цементу тим менша

теоретична густина. Тобто теоретично, найбільшою середньою густиною повинні б володіти зразки, для яких витрата цементу була найменшою, проте в силу того, що для них не вдалося забезпечити належного ступеню ущільнення, найбільший рівень мають зразки з витратою цементу 380 кг/м³.

5.3 Результати визначення водопоглинання

Відповідно до теоретичного обґрунтування, викладеного у розділі 2, бетон, котрий застосовується для виготовлення тротуарних виробів, повинен мати водопоглинання не більше 6 % (п. 4.2.5 [18]).

Таблиця 5.9 Результати визначення водопоглинання зразків

№		маса сухого, г	маса насиченого, г	Водопоглинання , %	Водопоглинання , середнє
1		2	3	4	5
1	1	1987	2092	5,28	5,13
	2	2109	2214	4,98	
2	1	1999	2098	4,95	4,97
	2	1983	2082	4,99	
3	1	1983	2294	5,18	5,04
	2	2181	2271	4,90	
4	1	2129	2187	2,72	2,82
	2	2064	2124	2,91	
5	1	2070	2116	2,22	2,52
	2	1990	2046	2,81	
6	1	2085	2149	3,07	2,99
	2	2101	2162	2,90	
7	1	2175	2225	2,30	2,00
	2	2181	2218	1,70	
8	1	1996	2074	3,91	3,89
	2	2200	2285	3,86	
9	1	2115	2172	2,70	2,86
	2	2220	2287	3,02	

Продовження таблиці 5.9

1		2	3	4	5
10	1	2297	2355	2,53	2,67
	2	2232	2295	2,82	
11	1	2252	2297	2,00	2,14
	2	2244	2295	2,27	
12	1	2237	2286	2,19	2,08
	2	2231	2275	1,97	
13	1	2146	2198	2,42	2,66
	2	2075	2135	2,89	
14	1	2167	2221	2,49	2,28
	2	2230	2276	2,06	
15	1	2210	2288	3,53	2,96
	2	2221	2274	2,39	
16	1	2200	2248	2,18	2,25
	2	2149	2199	2,33	
17	1	2150	2205	2,56	2,44
	2	2190	2241	2,33	
Контрольні	1	2072	2136	3,09	3,07
	2	2124	2189	3,06	

Як видно із таблиці 5.9 усі виготовленні серії зразків мають водопоглинання менше 6 %, тобто, бетони відповідних складів за водопоглинанням, можуть бути використані для виготовлення тротуарних виробів.

Таблиця 5.10 Результати обрахунку коефіцієнтів регресії

Factor	Regressn - Coeff.	Std.Err.	t(8)	p	-95,% - Cnf.Limt	+95,% - Cnf.Limt
Mean/Interc.	153,6688	86,72448	1,77192	0,114351	-46,3182	353,6559
(1)Витрата цементу, кг(L)	-0,6772	0,48709	-1,39029	0,201898	-1,8004	0,4460
Витрата цементу, кг(Q)	0,0009	0,00064	1,39201	0,201397	-0,0006	0,0024
(2)Час ущільнення, хв(L)	-0,6947	3,47257	-0,20004	0,846438	-8,7024	7,3131
Час ущільнення, хв(Q)	0,1478	0,57671	0,25624	0,804228	-1,1821	1,4777
(3)Витрата пластифікатору, %(L)	-22,5114	28,21136	-0,79795	0,447934	-87,5669	42,5441
Витрата пластифікатору, %(Q)	5,6420	6,40784	0,88048	0,404273	-9,1345	20,4185

Підставимо отримані коефіцієнти (з таблиці 5.10) у рівняння 5.1 і отримаємо рівняння 5.4, котре є рівнянням регресії водопоглинання.

$$y = 153,6688 - 0,6772x_1 + 0,0009x_1^2 - 0,6947x_2 + 0,1478x_2^2 - 22,5114x_3 + 5,642x_3^2. \quad (5.4)$$

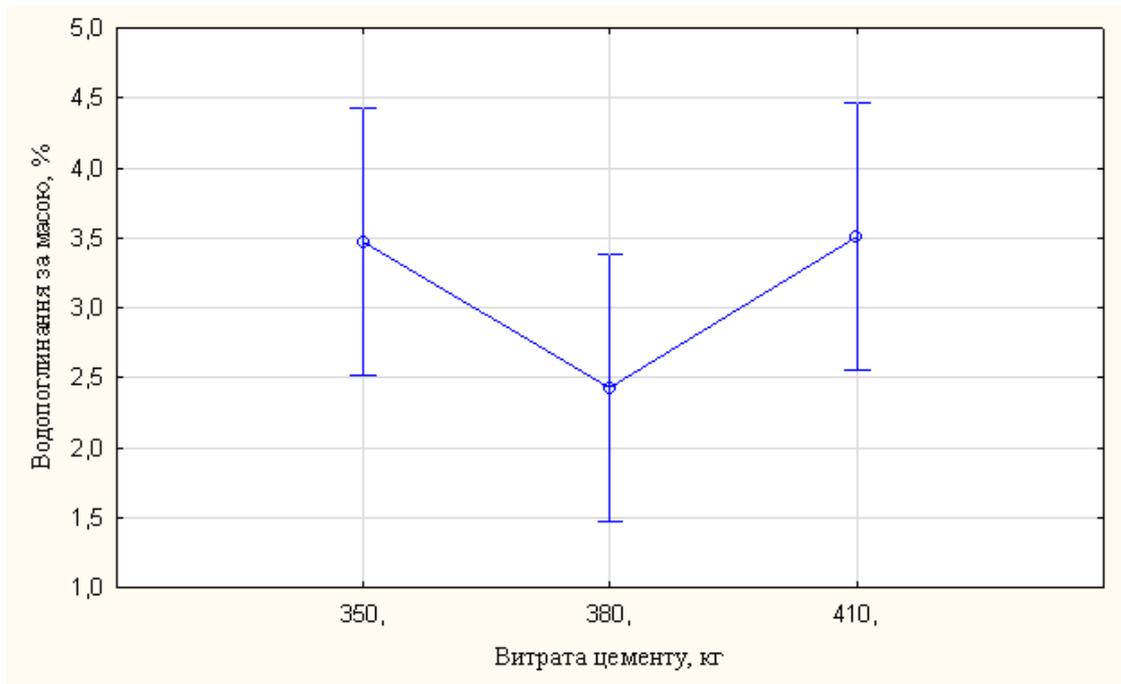


Рисунок 5. 14 Діаграма маргінальних середніх залежності водопоглинання від вмісту цементу

Як видно з рисунку 5.14 найменше значення водопоглинання досягається при використанні 380 кг/м³ цементу. Користуючись вищенаведеною теорією, можна пояснити це тим, що низька витрата цементу передбачає високу теоретичну густину, котра в свою чергу (при належному ущільненні) дає більш щільну структуру, з меншою кількістю пор. Матеріал з більш щільною структурою володіє меншим рівнем водопоглинання.

Зменшити рівень пористості можна за рахунок зменшення кількості води замішування, з цією метою до складу бетону вводився пластифікуючий елемент, у якості такого виступав полікарбоксилатний суперпластифікатор GLENIUM 51. Цей факт мав би призвести до покращення показників водопоглинання, тобто зі збільшенням рівня добавки водопоглинання повинно було б зменшуватись.

Проте, якщо поглянути на таблицю 5.11, в котрій приведена кореляція факторів, видно, що водопоглинання та витрата пластифікатору мають сильну позитивну взаємодію.

Таблиця 5.11 Результати визначення коефіцієнтів кореляції

Фактор	Водопоглинання за масою, %
(1)Витрата цементу, кг(L)	0,02
Витрата цементу, кг(Q)	-0,48
(2)Час ущільнення, хв.(L)	0,15
Час ущільнення, хв.(Q)	-0,30
(3)Витрата пластифікатору, %(L)	0,54
Витрата пластифікатору, %(Q)	-0,40

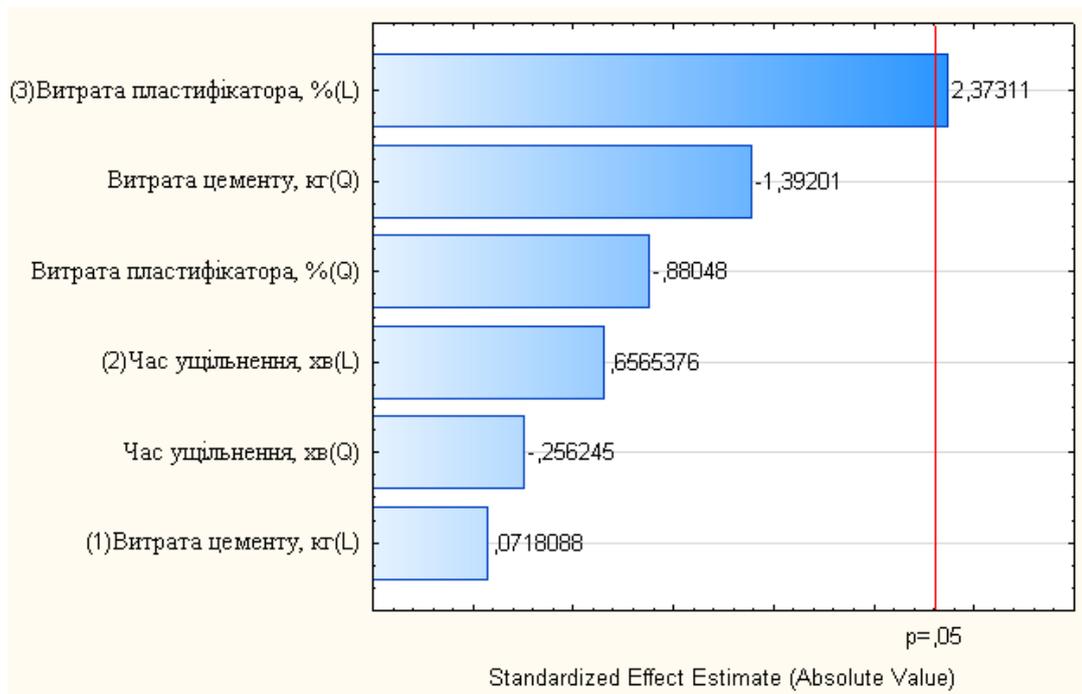


Рисунок 5.15 Карта Парето стандартизованих ефектів

Для наочності побудуємо поверхню залежності водопоглинання від витрати цементу та витрати пластифікатору (рисунок 5.16). Чітко помітно, що при зростанні витрати пластифікуючої добавки росте і водопоглинання зразків.

Для пояснення цього факту необхідно згадати про те, що матеріал, котрий виступав в якості дрібного наповнювача (золошлак ТЕС), не є інертним і може вступати у хімічну взаємодію. Добавка ж є полікарбонатною, тобто має органічну основу. Таке поєднання компонентів могло призвести до появи

новоутворень у структурі бетону, завдяки яким бетон і набув підвищеного значення водопоглинання.

Час ущільнення має низьку кореляцію, тому його вплив не є суттєвим, що і помітно з рисунку 5.17

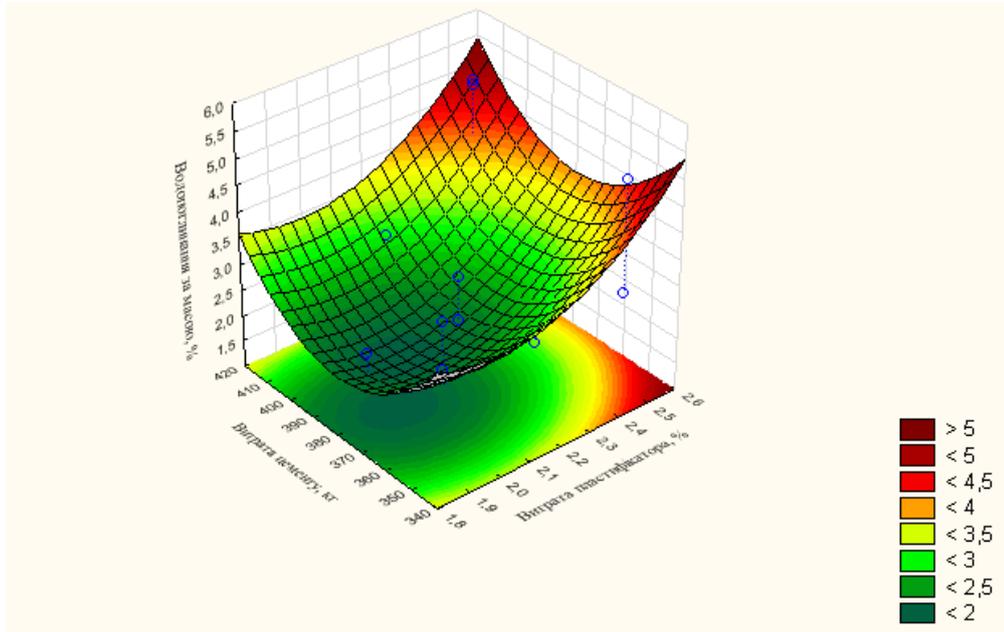


Рисунок 5.16 Поверхня впливу витрати цементу та кількості пластифікатора на водопоглинання

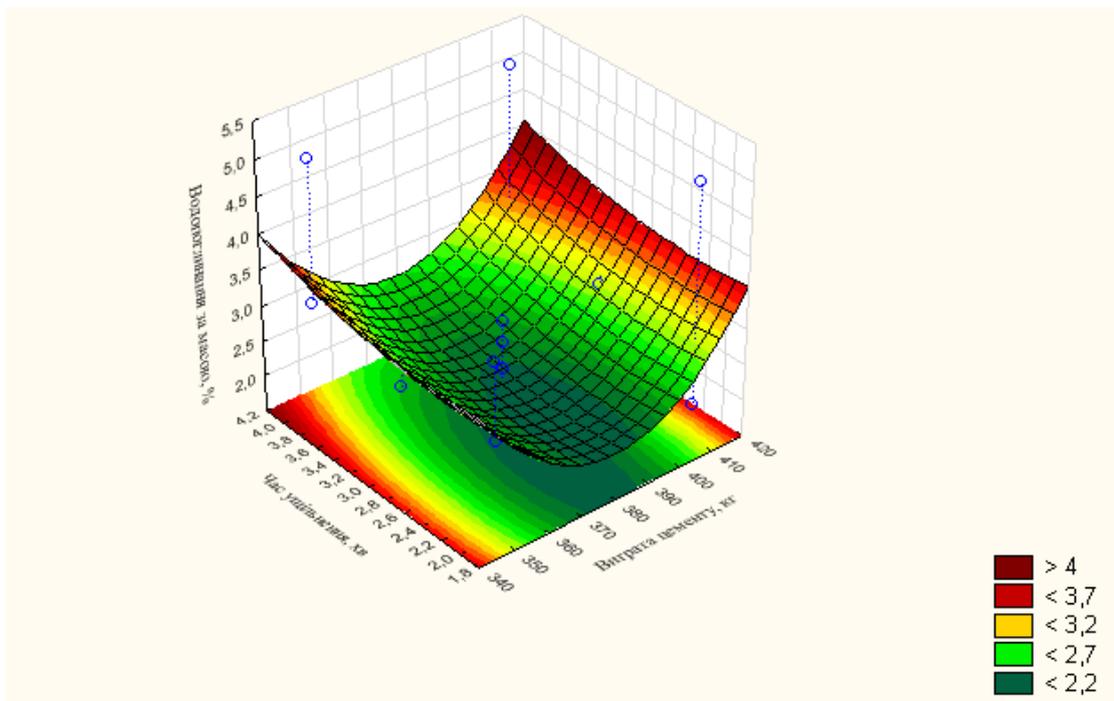


Рисунок 5.17 Поверхня впливу витрати цементу та часу ущільнення на водопоглинання

5.4 Результати визначення міцності

Для того, щоб майбутні тротуарні вироби відповідали вимогам п. 12.4 [18], у розділі 3 цієї роботи за проектний клас бетону було прийнято В30.

Випробування на міцність проводилися на гідравлічному пресі ПГ-250



Рисунок 5.18 Прес гідравлічний ПГ-250

На рисунку 5.19 можна побачити характер руйнування продемонстрований зразками.



Рисунок 5.19 Характер руйнування зразків

Результати випробувань занесені до таблиці 5.12.

Таблиця 5.12 Результати визначення міцності зразків при стиску

№		Площа для навантаження, см ²	Руйнівне зусилля, кгс	Границя міцності, МПа	Границя міцності середнє значення
1		2	3	4	5
1	1	92,07	25000	27,15	28,46
	2	96,6	27000	27,95	
	3	99,75	30200	30,28	
2	1	86,24	26000	30,15	29,06
	2	98,7	28000	28,37	
	3	84,48	24220	28,67	
3	1	96,04	29000	30,20	29,48
	2	95,06	28000	29,46	
	3	100,8	28900	28,67	
4	1	96	24250	25,26	25,42
	2	90,25	24000	26,59	
	3	104,04	25500	24,51	
5	1	87,42	32000	36,60	35,79
	2	86,4	29800	34,49	
	3	97,02	35200	36,28	
6	1	89,24	31000	34,74	33,45
	2	94,08	32300	34,33	
	3	93,73	32000	34,14	
7	1	93,12	32000	34,36	34,59
	2	89,3	32000	35,83	
	3	98,88	33200	33,58	
8	1	95,06	25000	26,30	27,4
	2	99	27000	27,27	
	3	101,97	29200	28,64	
9	1	95,06	24000	25,25	25,76
	2	100	27000	27,00	
	3	102,96	26000	25,25	
10	1	95,06	32400	34,08	33,5
	2	91,2	29800	32,68	
	3	86,7	29250	33,74	
11	1	98,01	28200	28,77	29,4
	2	100	29800	29,80	
	3	92,7	27800	29,99	

Продовження таблиці 5.12

1		2	3		
12	1	98,01	32600	33,26	31,43
	2	99	29200	29,49	
	3	87,55	27600	31,52	
13	1	93,12	26000	27,92	28,08
	2	91,18	25200	27,64	
	3	99,91	29000	29,03	
14	1	94,09	29800	31,67	32,34
	2	96,03	30000	31,24	
	3	97,92	33400	34,11	
15	1	99	28200	28,48	28,53
	2	96,04	27200	28,32	
	3	98,94	28400	28,70	
16	1	91,08	30000	32,94	31
	2	94,08	29000	30,82	
	3	91,8	26800	29,19	
17	1	91,08	27900	30,63	31,14
	2	94,08	29800	31,68	
	3	96,03	30000	31,24	
Контрольні	1	88,11	25600	29,05	30,11
	2	92,82	29000	31,24	
	3	92,92	27800	29,92	

Дивлячись на таблицю 5.12 важко робити висновок про те, чи вдалося нам досягти бажаного класу за міцністю. Тому зробимо перетворення за формулою 5.5 (див. с. 360 [29]), котра дає можливість перевести середнє значення міцності у клас бетону за міцністю на стиск.

$$B = \bar{R} \cdot ((1 - 1,64 \cdot C_v)), \quad (5.5)$$

де B – чисельне значення класу бетону, МПа;

\bar{R} – середня міцність бетону, МПа;

C_v – коефіцієнт варіації, котрий при проектуванні конструкцій становить 13,8 %.

Виконавши обрахунки запишемо результати у таблицю (таблиця 5.13)

Таблиця 5.13 Клас бетону зразків за міцністю при стиску

№	Границя міцності середнє значення	Клас бетону за міцністю на стиск	
		Обраховане значення	Найближче, менше
1	28,46	22,02	B20
2	29,06	22,49	B20
3	29,48	22,78	B20
4	25,42	19,69	B15
5	35,79	27,69	B25
6	33,45	26,62	B25
7	34,59	26,76	B25
8	27,40	21,2	B20
9	25,76	19,99	B15
10	33,50	25,92	B25
11	29,40	22,84	B20
12	31,43	24,31	B20
13	28,08	21,81	B20
14	32,34	25,02	B25
15	28,53	22,05	B20
16	31,00	23,97	B20
17	31,14	24,13	B20
Контрольні	30,11	23,27	B20

Як помітно із таблиці 5.13 міцність жодної серії зразків не досягнула класу В30. Навіть контрольні зразки не досягли показника міцності відповідного класу. Це можна пояснити тим, що в якості заповнювача для них був використаний дрібний пісок (див. розділ 4).

Відповідно до п. 12.4 [18], мінімально допустимий клас бетону для тротуарних виробів складає В25, за цим показником деякі серії зразків відповідають вимогам, а саме: 5, 6, 7, 10, 14 (див. таблицю 5.13).

Визначимо за допомогою програмного комплексу STATISTICA коефіцієнти рівняння регресії, результати викладені у таблиці 5.14.

Таблиця 5.14 Результати визначення коефіцієнтів регресії

Factor	Regressn - Coeff.	Std.Err.	t(8)	p	-95,% - Cnf.Limt	+95,% - Cnf.Limt
Mean/Interc.	49,5093	289,7788	0,170852	0,868582	-618,722	717,7403
(1)Витрата цементу, кг(L)	0,1165	1,6276	0,071572	0,944700	-3,637	3,8697
Витрата цементу, кг(Q)	-0,0001	0,0021	-0,060832	0,952985	-0,005	0,0048
(2)Час ущільнення, хв(L)	-3,2227	11,6032	-0,277741	0,788254	-29,980	23,5343
Час ущільнення, хв(Q)	0,6678	1,9270	0,346539	0,737876	-3,776	5,1114
(3)Витрата пластифікатору, %(L)	-30,3147	94,2646	-0,321591	0,756004	-247,689	187,0600
Витрата пластифікатору, %(Q)	5,1420	21,4110	0,240156	0,816249	-44,232	54,5158

Якщо підставити отримані коефіцієнти у рівняння 5.1 отримаємо рівняння 5.6, котре являє собою рівняння регресії міцності бетонних зразків.

$$y = 49,5093 + 0,1165x_1 - 0,0001x_1^2 - 3,2227x_2 + 0,6678x_2^2 - 30,3147x_3 + 5,142x_3^2. \quad (5.6)$$

Побудуємо діаграми маргінальних середніх залежності міцності від факторів варіювання.

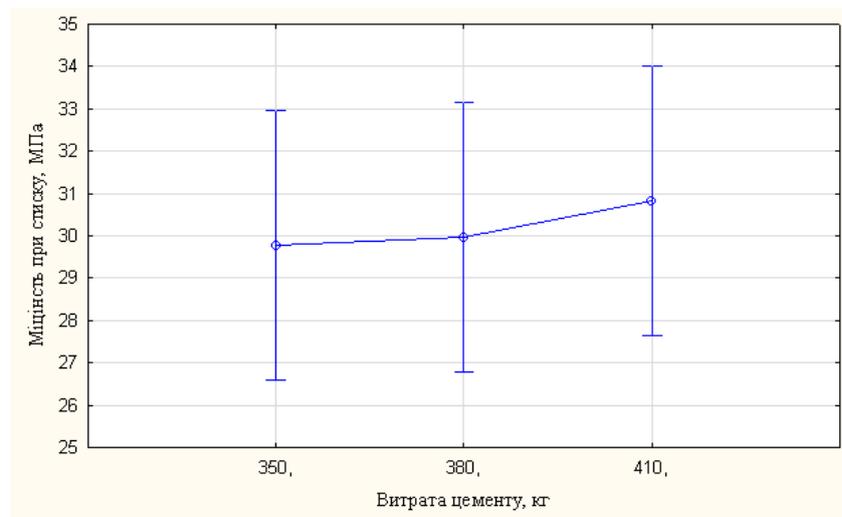


Рисунок 5.20 Діаграма маргінальних середніх залежності міцності від витрати цементу

З рисунку 5.20 видно, що найбільша міцність досягається при найбільшій витраті цементу. Як указують данні літератури, зокрема [2], підвищення витрати цементу сприяє підвищенню міцності. Як бачимо для бетонів, з використанням золошлаку це твердження також істинне.

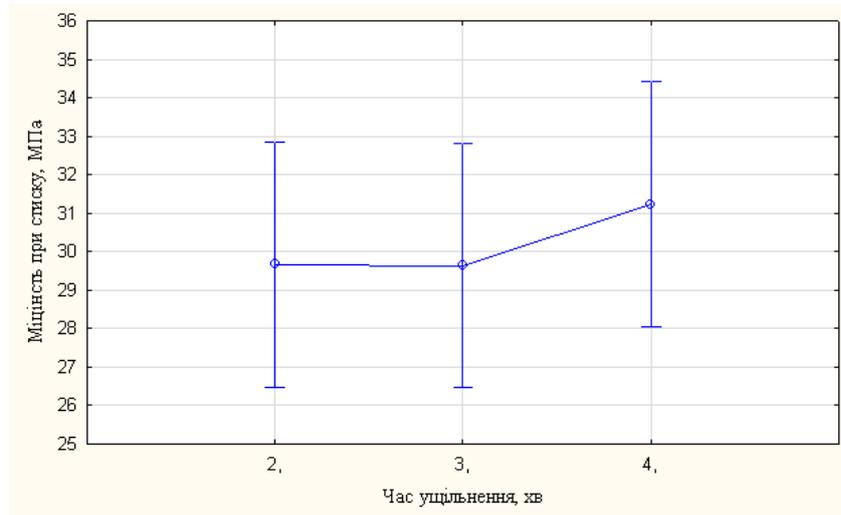


Рисунок 5.21 Діаграма маргінальних середніх залежності міцності від часу ущільнення

Як бачимо з рисунку 5.21 збільшення часу ущільнення також сприяє незначному підвищенню міцності.

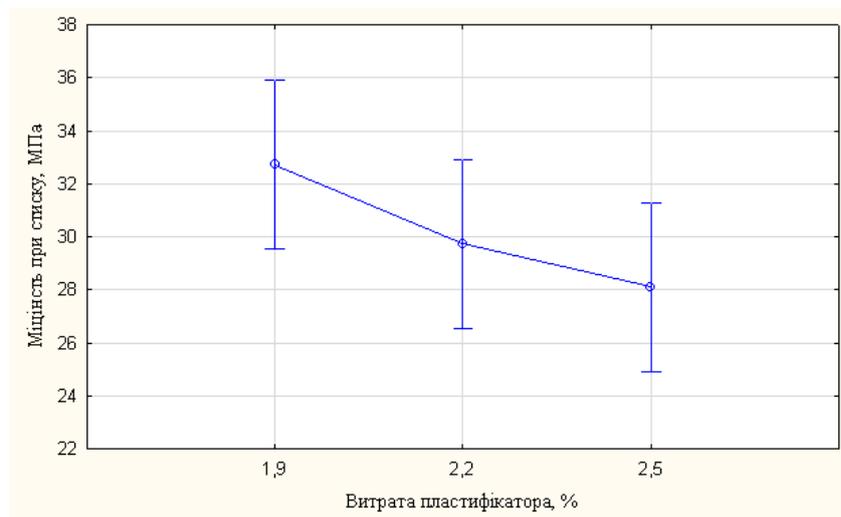


Рисунок 5.22 Діаграма маргінальних середніх залежності міцності від витрати пластифікатора

А от підвищення витрати пластифікатора навпаки, призводить до погіршення міцності при стиску зразків (див. рисунок 5.22). Про можливі причини цього явища вже зазначалося у попередньому пункті.

Можливо саме через негативний вплив добавки-пластифікатору і не вдалося досягти бажаного рівня міцності.

Про істинність даного твердження може говорити висока негативна кореляція витрати пластифікатору (див. таблицю 5.15).

Таблиця 5.15 Результати визначення коефіцієнтів кореляції

Фактор	Міцність при стиску, МПа
(1)Витрата цементу, кг(L)	0,14
Витрата цементу, кг(Q)	-0,05
(2)Час ущільнення, хв(L)	0,21
Час ущільнення, хв(Q)	-0,12
(3)Витрата пластифікатора, %(L)	-0,61
Витрата пластифікатора, %(Q)	-0,10

Побудувавши карту Парето, наочно помітимо вищенаведені міркування (див. рисунок 5.23).

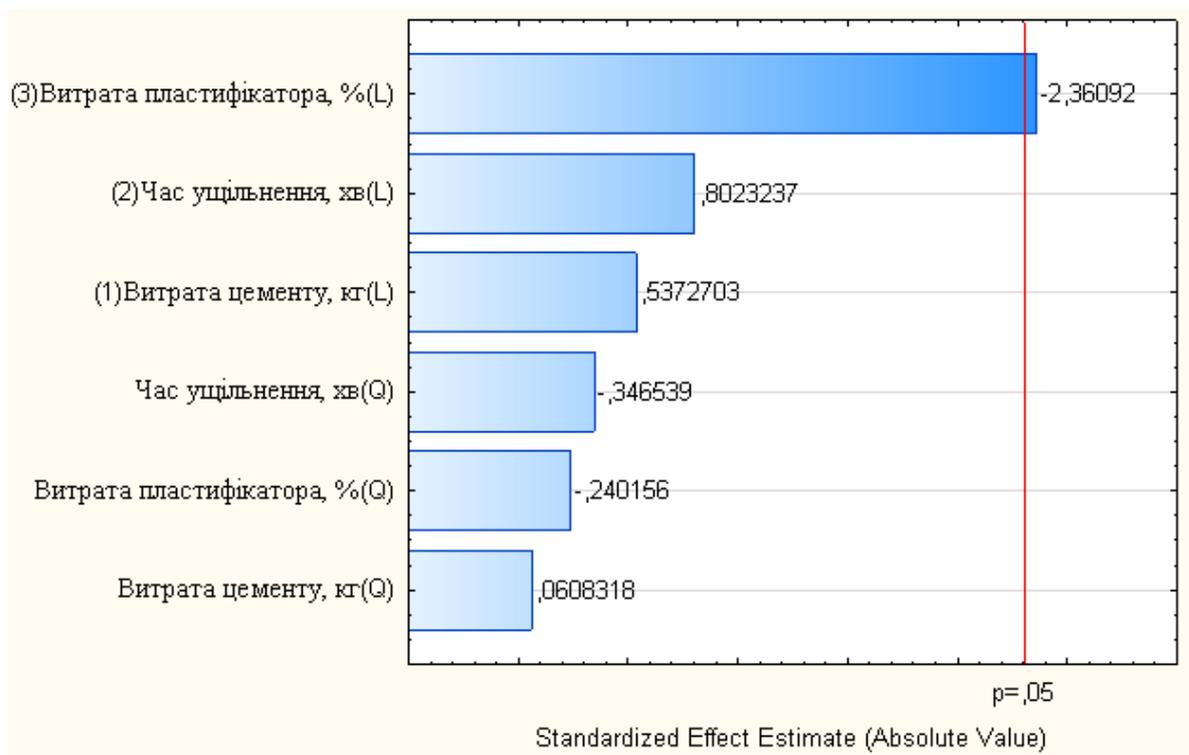


Рисунок 5.23 Карта Парето стандартизованих ефектів

Нижче наведені поверхні впливу (рисунок 5.24, 5.25), котрі показують, що найбільш оптимальними значеннями варійованих факторів, з огляду на міцність зразків, є значення витрати цементу, котре знаходиться в околі 410 кг/м³, та значення витрати пластифікатору – в околі 1,8 %.

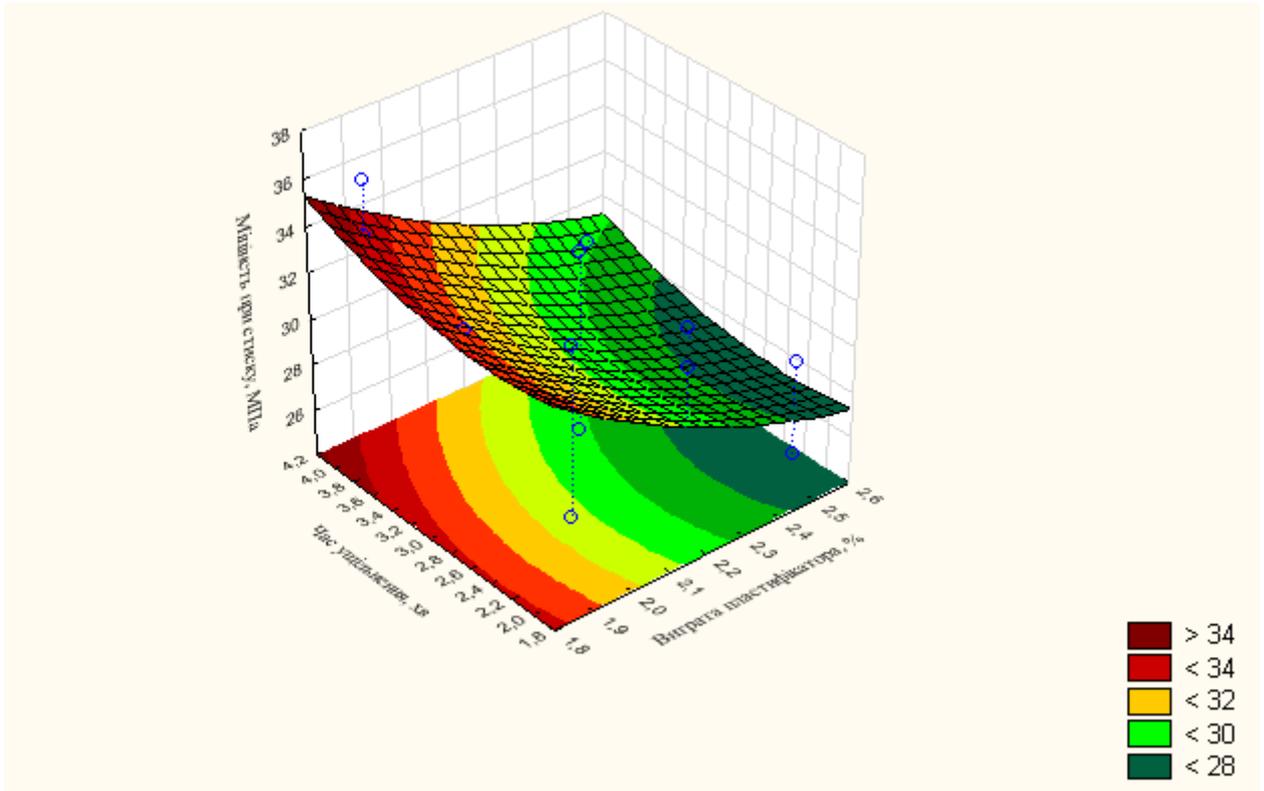


Рисунок 5.24 Поверхня впливу витрати пластифікатору та часу ущільнення на міцність при стиску

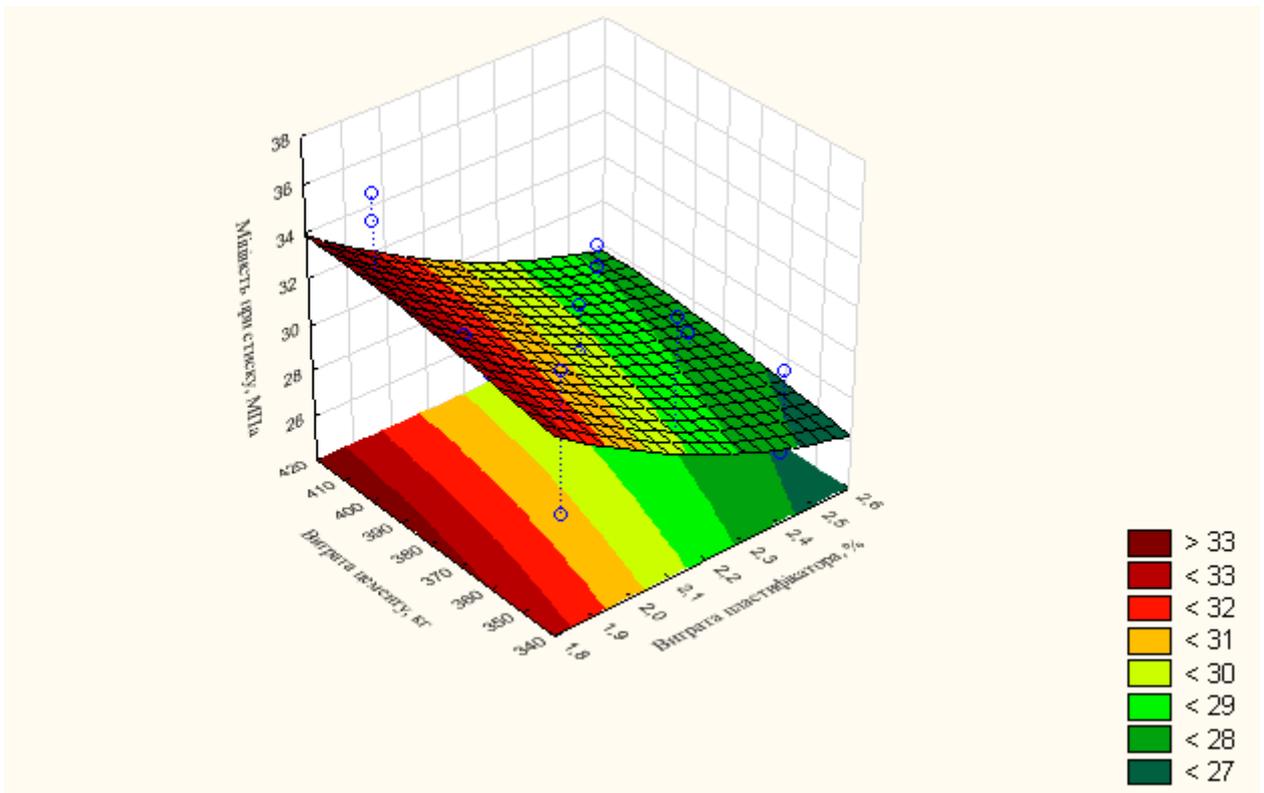


Рисунок 5.25 Поверхня впливу витрати пластифікатору та цементу на міцність при стиску

5.5 Результати визначення морозостійкості

Як уже вказувалося раніше (розділ 2) метою цієї роботи є розробка такого складу бетону, котрий володів би значенням морозостійкості не менше ніж F200.

Морозостійкість визначалася за допомогою приладу «Бетон-Фрост». Після визначення всі результати оброблялися на ПК з використанням супутньої до приладу програми. Вона, окрім всього іншого, дозволяє визначити водопоглинання за об'ємом зразків та будує графіки зміни об'єму зразків у часі. Після корегування параметрів зразків, котрі випробувалися, програма видає звіти по випробуванням. Приклад звіту та графіку зміни об'єму з часом наведені на рисунку 5.26 та у таблиці 5.16 (дані для зразка 2 зразка 11 серії).

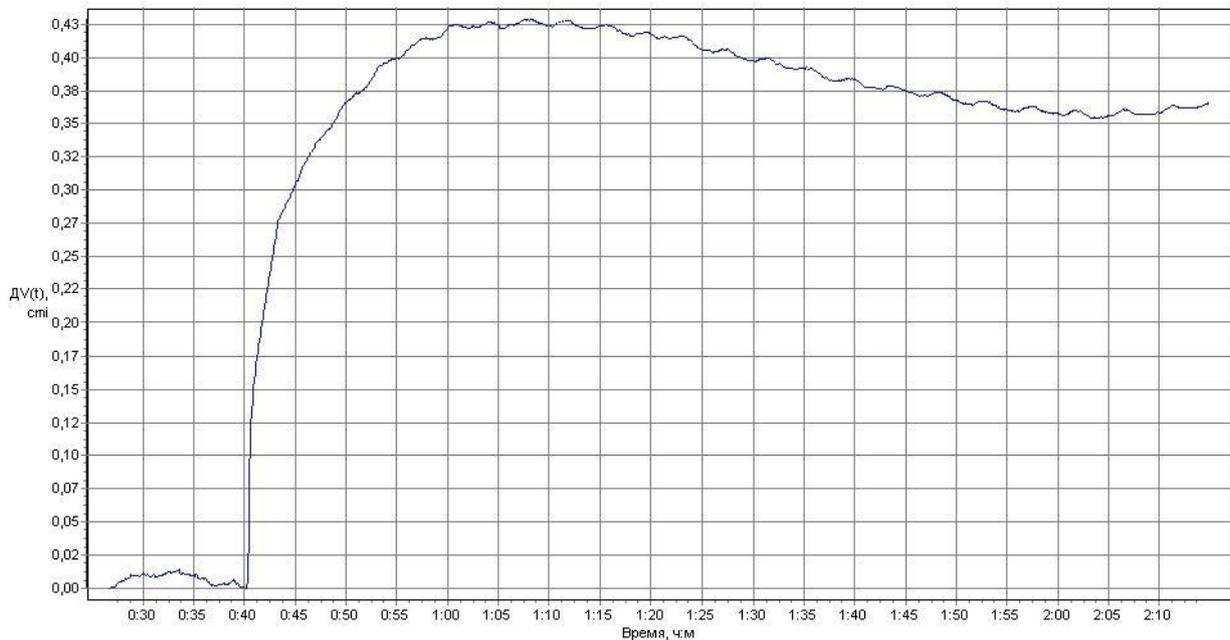


Рисунок 5.26 Зміна об'єму зразка з часом при випробуванні на морозостійкість

Таблиця 5.16 Результати випробувань на морозостійкість для зразка 11.2

№ об-разца (канала)	Возраст, сут. (усл. тверд.)	Размер, mm	Объём, см ³	Масса, г		Водопоглощение, %		Показатели морозостойкости			Марка бетона по морозостойкости F(N)
				исход-ная	насы-щенная	по массе	по объёму	ДV, см ³	Их10i	<И>х10i	
1	140	99,0x 100,0x 99,0	980,1	2252,0	2297,0	2,0	4,6	0,43	0,44	0,44	300 (367) бетон тяжёлый

Після завершення випробувань та обробки результатів у програмі зв'язку було отримано результати, котрі занесені до таблиці 5.17.

Таблиця 5.17 Результати випробувань на морозостійкість

Серія	Морозостійкість	
	Кількість циклів	Марка
1	188	150
2	172	150
3	297	200
4	175	150
5	313	300
6	191	150
7	350	300
8	119	100
9	328	300
10	344	300
11	352	300
12	325	300
13	281	200
14	303	300
15	325	300
16	268	200
17	305	300
Контрольні	211	200

З таблиці 5.17 видно, що майже всі зразки подолали бар'єр у 200 циклів (винятки складають серії зразків 1, 2, 4, 6, 8). Якщо поглянути на таблицю 3.2, де відображені склади бетонів для серій зразків, то можна помітити певні закономірності. А саме, що невисокою морозостійкістю відзначилися зразки, котрі виготовлені із максимальною витратою пластифікатору, а також ті, котрі містили найменшу кількість цементу. Нижче приведений детальний аналіз цих явищ.

Спочатку, скориставшись програмою STATISTICA, визначимо коефіцієнти рівняння регресії (таблиця 5.18) та запишемо саме рівняння (рівняння 5.7).

Таблиця 5.18 Результати обрахунку коефіцієнтів регресії

Factor	Regressn - Coeff.	Std.Err.	t(8)	p	-95,% - Cnf.Limt	+95,% - Cnf.Limt
Mean/Interc.	-9013,80	5174,070	- 1,74211	0,119660	-20945,2	2917,630
(1)Витрата цементу, кг(L)	26,40	29,060	0,90847	0,390176	-40,6	93,414
Витрата цементу, кг(Q)	-0,03	0,038	- 0,85416	0,417859	-0,1	0,056
(2)Витрата пластифікатора, %(L)	3533,57	1683,118	2,09942	0,069000	-347,7	7414,845
Витрата пластифікатора, %(Q)	-815,43	382,298	- 2,13297	0,065489	-1697,0	66,150
(3)Час ущільнення, хв(L)	156,33	207,177	0,75459	0,472122	-321,4	634,085
Час ущільнення, хв(Q)	-26,89	34,407	- 0,78150	0,457012	-106,2	52,453

$$y = -9013,8 + 26,4x_1 - 0,03x_1^2 + 3533,57x_2 - 815,43x_2^2 + 156,33x_3 - 26,89x_3^2. \quad (5.7)$$

Побудуємо діаграму маргінальних середніх залежностей морозостійкості від факторів варіювання.

Зробивши це для залежності морозостійкості від витрати цементу (рисунок 5.27), помітимо все ту ж залежність: чим більша витрата цементу, тим менша морозостійкість. А для витрати цементу у 350 кг/м^3 , як уже відзначалося раніше, не вдалося забезпечити достатнього ущільнення.

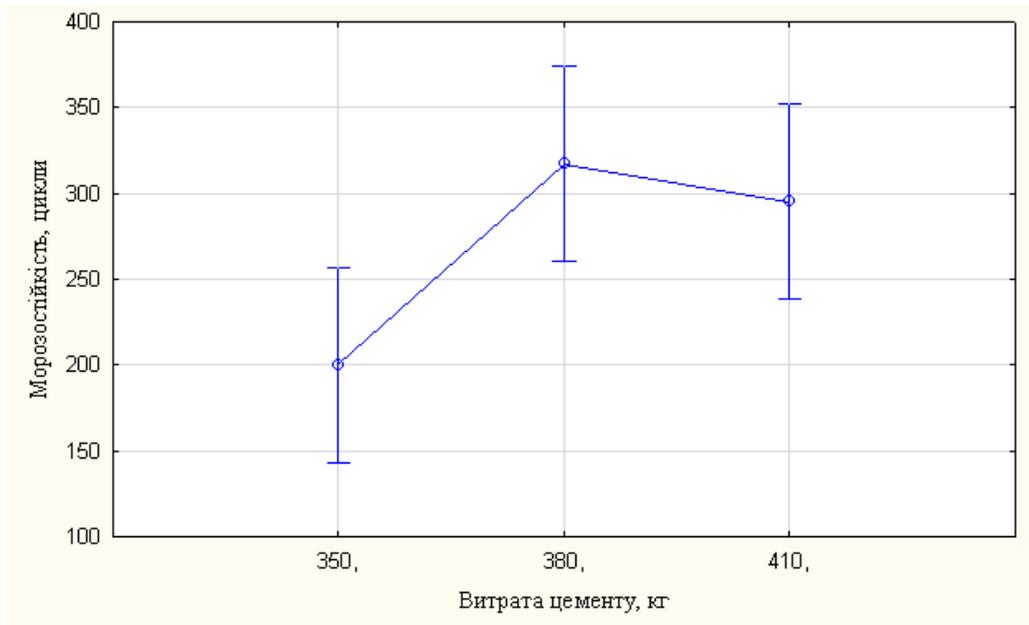


Рисунок 5.27 Діаграма маргінальних середніх залежності морозостійкості від витрати цементу

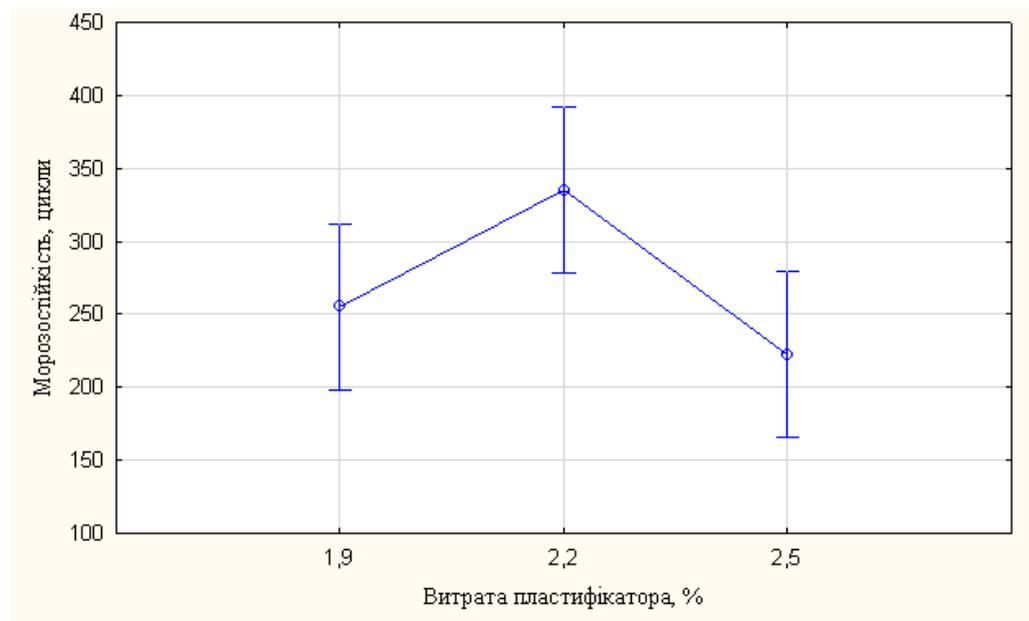


Рисунок 5.28 Діаграма маргінальних середніх залежності морозостійкості від витрати пластифікатора

Іншим цікавим висновком є те, що висока витрата пластифікатора дає негативний вплив на морозостійкість зразків. Можливою причиною може бути те, що хімічно активний заповнювач (золошлак) вступає у взаємодію з органічними компонентами добавки-суперпластифікатора, результатом чого є поява новоутворень, котрі й чинять негативний вплив на морозостійкість зразків.

Низька витрата пластифікатора також чинить негативний вплив на морозостійкість, оскільки за такої умови не достаньо проявляється пластифікуюча дія добавки, не вдається забезпечити відповідний рівень пористості, наслідком чого і є низька морозостійкість.

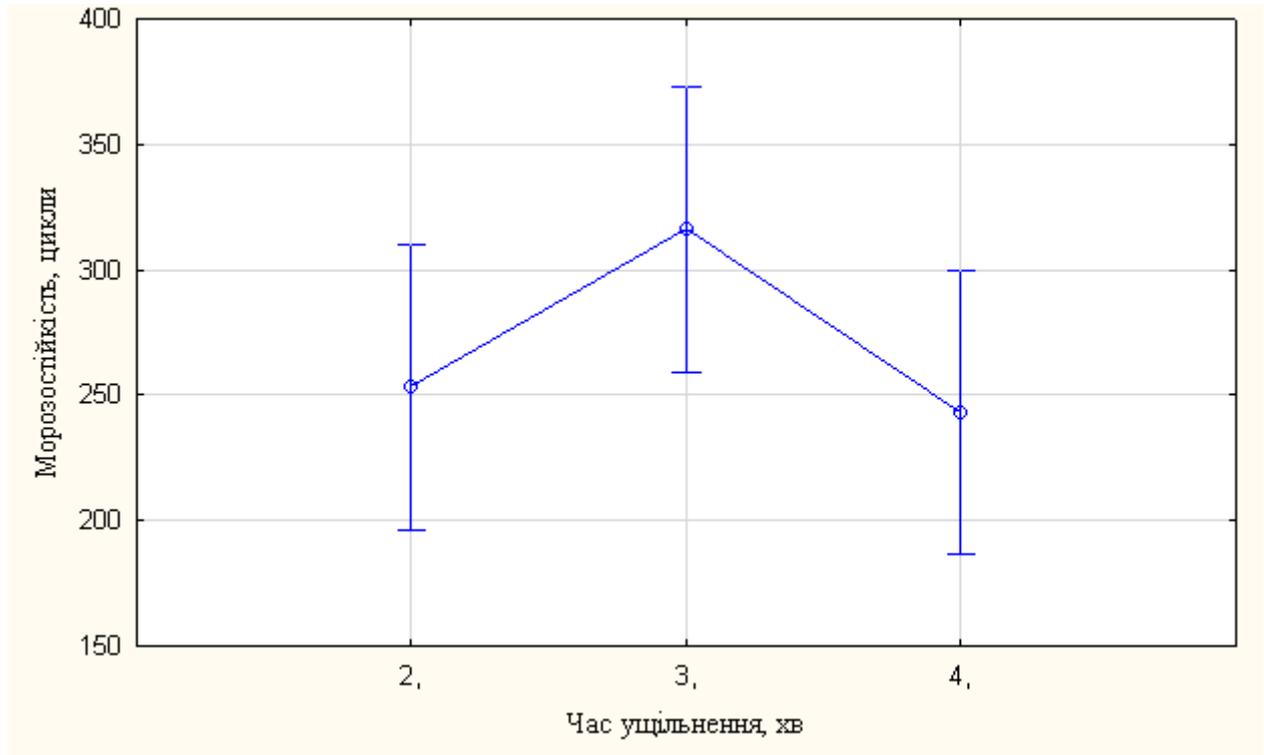


Рисунок 5.29 діаграма маргінальних середніх залежності морозостійкості від часу ущільнення

В результаті проведення експрименту вдалося визначити оптимальний час ущільнення зразків, котрий складає 3 хв.

Визначемо взаємозв'язок морозостійкості та факторів варіювання. Для цього розрахуємо відповідні коефіцієнти кореляції.

Таблиця 5.19 Результати обрахунку коефіцієнтів кореляції

Фактор	Морозостійкість, цикли
(1)Витрата цементу, кг(L)	0,51
Витрата цементу, кг(Q)	0,43
(2)Витрата пластифікатора, %(L)	-0,18
Витрата пластифікатора, %(Q)	0,60
(3)Час ущільнення, хв(L)	-0,05
Час ущільнення, хв(Q)	0,42

З таблиці 5.19 видно, що найбільший вплив на морозостійкість чинить витрата пластифікатору.

Для наочного відображення впливу на морозостійкість факторів варіювання за допомогою програмного комплексу STATISTICA побудуємо поверхні впливу.

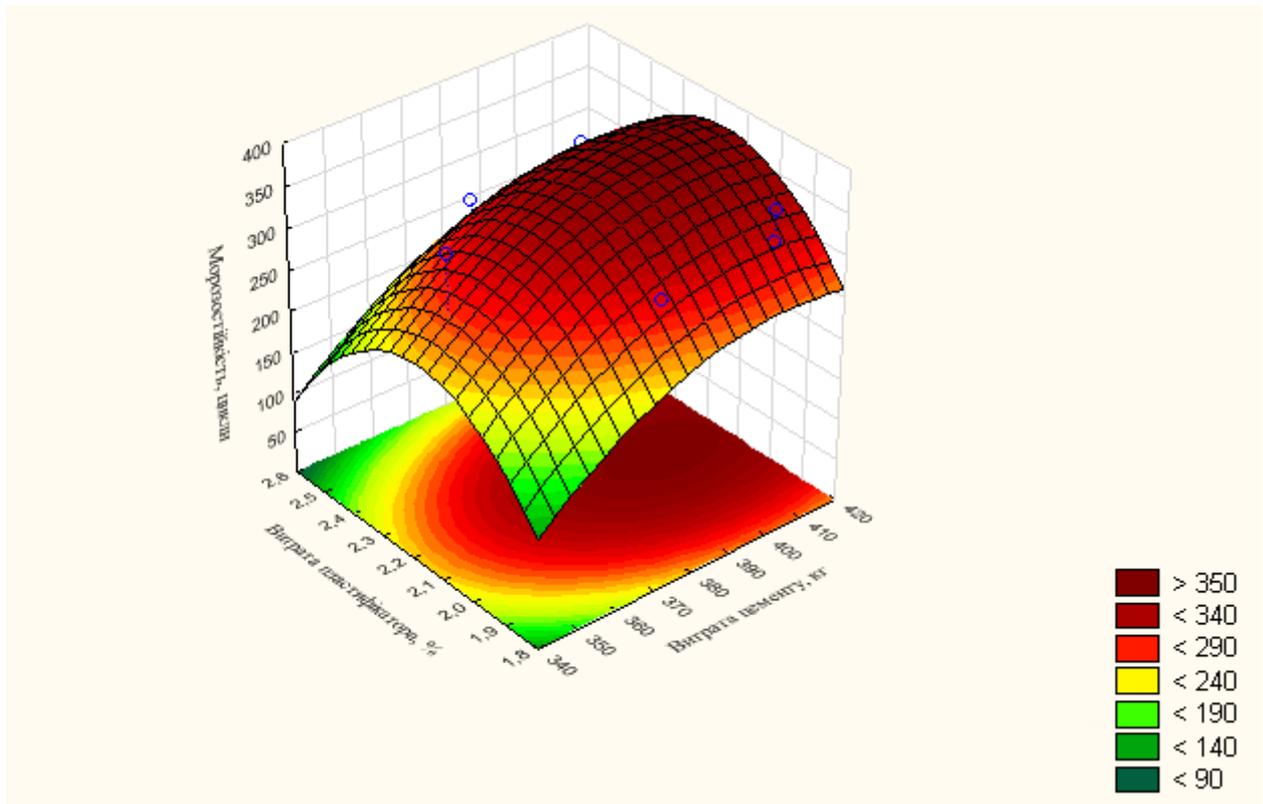


Рисунок 5.30 Поверхня впливу витрати пластифікатору та цементу на морозостійкість

З даного малюнку випливає, що найвищою морозостійкістю відзначаються зразки, для яких витрата цементу знаходиться в околі 400кг/м^3 , а витрата пластифікатору – 2.2 %.

З рисунку 5.31 випливає, що найоптимальніший час ущільнення складає приблизно 3 хвилини.

З рисунків 5.31, 5.32 можна, також, помітити, що вплив часу ущільнення на морозостійкість є значно меншим у порівнянні із витратою пластифікатору та цементу.

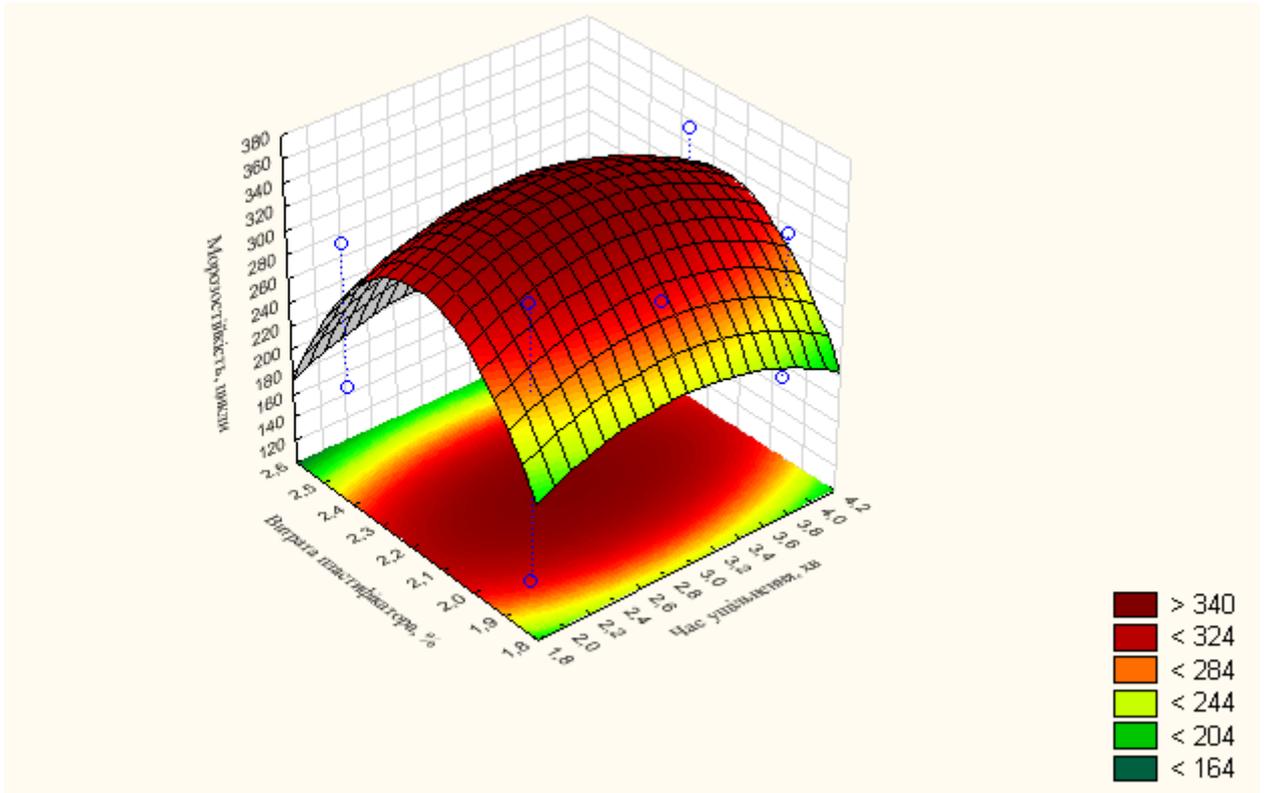


Рисунок 5.31 Поверхня впливу витрати пластифікатору та часу ущільнення на морозостійкість

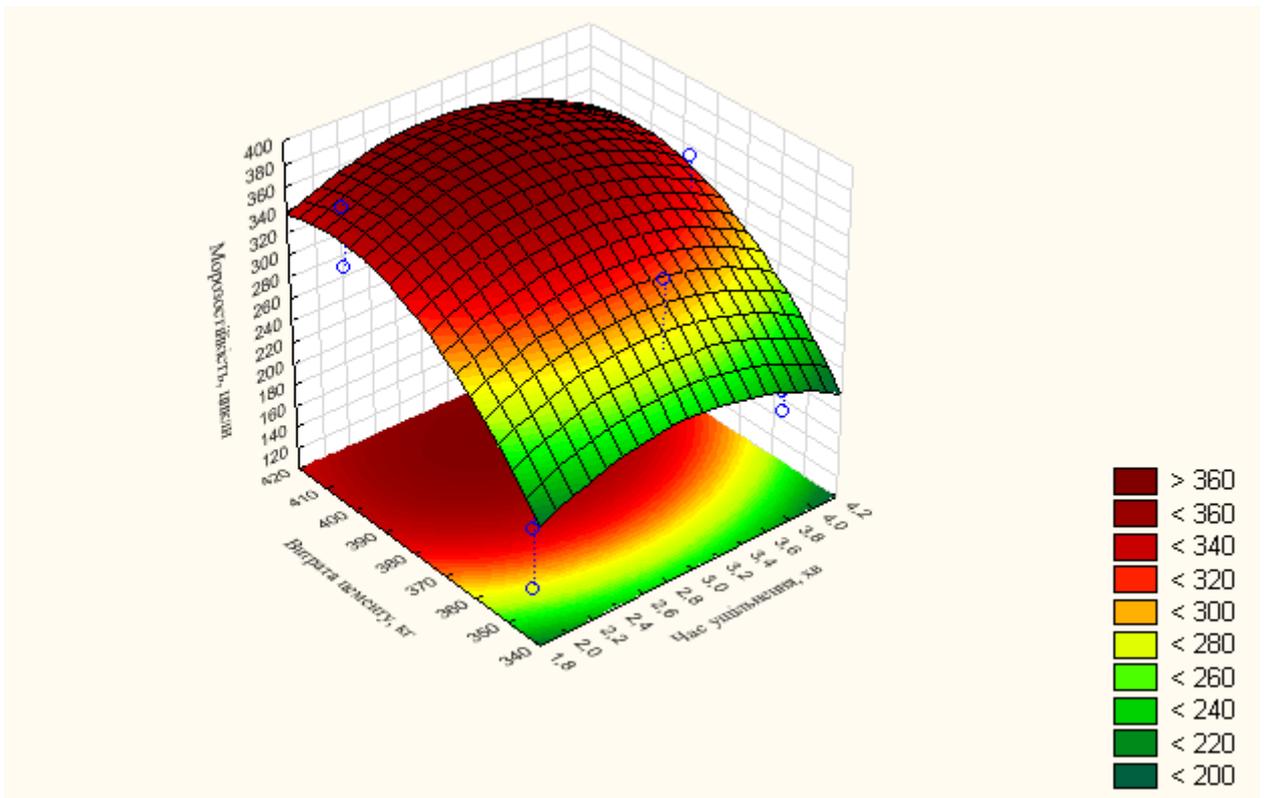


Рисунок 5.32 Поверхня впливу витрати цементу та часу ущільнення на морозостійкість

Візуальний аналіз графіків та поверхонь дає лише приблизні значення оптимальних співвідношень компонентів. Проте програмний комплекс STATISTICA дозволяє визначити значення факторів, за яких досліджувана величини досягає максимального значення (таблиця 5.33).

Таблиця 5.33 Критичні значення змінних

Factor	Observed - Minimum	Critical - Values	Observed - Maximum
Витрата цементу, кг	350,0000	404,2439	410,0000
Витрата пластифікатора, %	1,9000	2,1667	2,5000
Час ущільнення, хв	2,0000	2,9070	4,0000

Прогнозоване значення відгуку (морозостійкості) при вищевказаних критичних значеннях вхідних факторів становить порядку 377 циклів.

Таблиця 5.34 Зв'язок морозостійкості з іншими залежними змінними

Фактор	Морозостійкість, цикли
Міцність при стиску, МПа	0,40
Водопоглинання за масою, %	-0,60
Середня густина, г/см ³	0,51
Коефіцієнт ущільнення	0,62

З таблиці 5.34 випливає, що найбільш пов'язаними із морозостійкістю факторами виявились коефіцієнт ущільнення, водопоглинання за масою та середня густина.

РОЗДІЛ 6

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

6.1 Аналіз шкідливих і небезпечних факторів, які діють на працюючих

При виробництві бетонних тротуарних неармованих виробів на працюючих можуть впливати такі небезпечні та шкідливі фактори:

- електричний струм – оскільки робота пов'язана з обладнанням, котре працює від електромережі існує небезпека ураження працюючих електричним струмом;
- запиленість повітря – так, як на виробництві використовуються дрібнодисперсні матеріали (цемент), існує небезпека потрапляння їх у повітря і утворення пилоповітряної суміші, котра при потраплянні в організм людини може спричинювати негативні наслідки;
- підвищений рівень шуму та вібрації – при формуванні виробів для їх ущільнення використовується вібротрамблер з частотою коливань 70 Гц та амплітудою 0,5 мм, а також рухомі частини обладнання, що використовується здатні створювати шумовий фон;
- недостатнє освітлення робочого місця – так, як виробництво знаходиться у приміщенні, існує можливість шкідливого впливу на працюючих недостатнього освітлення робочих місць;
- рухомі частини обладнання – при необережному поводженні та при порушенні техніки безпеки можливе спричинення рухомими частинами обладнання працюючим травм.

6.2 Технічні засоби і організаційні заходи із усунення дії шкідливих і небезпечних виробничих факторів

6.2.1 Технічні засоби та організаційні заходи по упередженню можливої дії на працюючих електричного струму

Технічні заходи з електробезпеки реалізуються в конструкції електроустановок при їх розробці, виготовленні і монтажі відповідно до чинних нормативів. За своїми функціями технічні засоби і заходи забезпечення електробезпеки діляться на дві групи:

- технічні заходи і засоби забезпечення електробезпеки при нормальному режимі роботи електроустановок;
- технічні заходи і засоби забезпечення електробезпеки при аварійних режимах роботи електроустановок.

Для технологічної лінії по виробництву виробів бетонних тротуарних неармованих можна застосувати такі заходи з електробезпеки:

- ізоляцію струмовідних частин (забезпечує технічну працездатність електроустановок, зменшує вірогідність попадань людини під напругу, замикань на землю і на корпус електроустановок, зменшує струм через людину при доторканні до неізольованих струмовідних частин в електроустановках, що живляться від ізольованої від землі мережі за умови відсутності фаз з пошкодженою ізоляцією);
- недоступність струмовідних частин (статистичні дані щодо електротравматизму свідчать, що більшість електротравм пов'язані з дотиком до струмовідних частин електроустановок (біля 56%). Якщо в установках до 1000В небезпека електротравм пов'язана, переважно, з дотиком до неізольованих струмовідних елементів електроустановок, то при напрузі більше 1000В електротравми можливі і при дотику до ізольованих струмовідних частин. Основними заходами забезпечення недоступності струмовідних частин є застосування захисних огорожень, закритих комутаційних апаратів (пакетних вимикачів, комплектних пускових пристроїв, дистанційних електромагнітних

приладів управління споживачами електроенергії тощо), розміщення неізольованих струмовідних частин на недосяжній, для ненавмисного доторкання до них інструментом, висоті, різного роду пристосуваннями тощо, обмеження доступу сторонніх осіб в електротехнічні приміщення.);

– блоківки безпеки (блоківки безпеки застосовуються в електроустановках, експлуатація яких пов'язана з періодичним доступом до огорожених струмовідних частин (випробувальні і дослідні стенди, установки для випробування ізоляції підвищеною напругою), в комутаційних апаратах, помилки в оперативних переключеннях яких можуть призвести до аварії і нещасних випадків, в рубильниках, пусковій апаратурі, автоматичних вимикачах, які працюють в умовах підвищеної небезпеки (електроустановки на плавзасобах, в гірничодобувній промисловості. Призначення блоківки безпеки: унеможливити доступ до неізольованих струмовідних частин без попереднього зняття з них напруги, попередити помилкові оперативні та керуючі дії персоналу при експлуатації електроустановок, не допустити порушення рівня електробезпеки та вибухозахисту електрообладнання без попереднього відключення його від джерела живлення. Основними видами блоківки безпеки є механічні, електричні і електромагнітні);

– засоби орієнтації в електроустановках (дають можливість персоналу чітко орієнтуватись при монтажі, виконанні ремонтних робіт і запобігають помилковим діям. До засобів орієнтації в електроустановках належать: маркування частин електрообладнання, проводів і струмопроводів (шин), бирки на проводах, забарвлення неізольованих струмовідних частин, ізоляції, внутрішніх поверхонь електричних шаф і щитів керування, попереджувальні сигнали, написи, таблички, комутаційні схеми, знаки високої електричної напруги, знаки постійно попереджувальні тощо. Попереджувальні сигнали використовують з метою забезпечення надійної інформації про перебування електрообладнання під напругою, про стан ізоляції та пристроїв захисту, про небезпечні відхилення режимів роботи від номінальних тощо. Світловою сигналізацією обладнуються в електроустановках напругою понад 1000В

комірки роз'єднувачів, масляних вимикачів, трансформаторів. У ввідних шафах комплектних трансформаторних підстанцій, незалежно від величини напруги, передбачається попереджувальна сигналізація станів “Увімкнено” і “Вимкнено”).

Для упередження появи напруги на неструмовідних частинах електроустановок пов'язана з пошкодженням ізоляції і замиканням на корпус. Основними технічними заходами щодо попередження електротравм при замиканнях на корпус є захисне заземлення, занулення, захисне відключення.

Для лінії по виробництво виробів бетонних тротуарних неармованих було використано захисне заземлення.

Відповідно до ГОСТ 12.1.009-76, захисне заземлення - це навмисне електричне з'єднання з землею чи її еквівалентом металевих неструмовідних частин електроустановок, які можуть опинитись під напругою. Принципова схема функціонування захисного заземлення наведена на рис. 6.1.

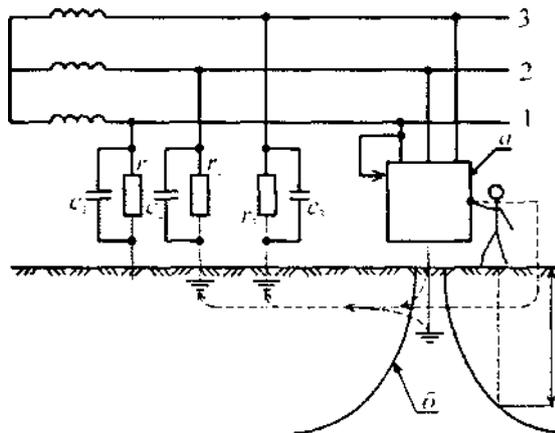


Рисунок 6.1. Принципова схема функціонування захисного заземлення: а - електроустановка; б - розподіл потенціалів на поверхні землі в зоні розтікання струму.

При пошкодженні в установці ізоляції фазного проводу 1 (показано стрілкою на рис. 6.1) корпус установки може опинитися під напругою. Якщо людина доторкнеться у цьому випадку до корпусу установки, то це буде майже рівноцінно доторканню до неізольованого проводу.

При наявності заземлення паралельно людині буде мати місце додатковий струмопровід, і струм замикання на землю буде розподілятися між цим

струмопроводом і людиною обернено пропорційно їх опорам, що забезпечує захист людини від ураження електричним струмом. Крім того, при наявності захисного заземлення має місце розтікання струму в землі, в результаті чого на поверхні землі виникає поле підвищених потенціалів відносно нульового потенціалу землі,

Конструктивно захисне заземлення включає заземлюючий пристрій і провідник, що з'єднує заземлюючий пристрій з обладнанням, яке заземлюється — заземлюючий провідник.

Для заземлюючих провідників використовують неізольовані мідні провідники поперечним перерізом не менше 4 мм^2 або сталеві струмопроводи діаметром $5\text{...}10 \text{ мм}$. Заземлюючі провідники між собою і з заземлювачами з'єднуються зварюванням, а з обладнанням, що заземлюється — зварюванням або за допомогою гвинтового з'єднання з застосуванням антикорозійних заходів. У виробничих приміщеннях заземлюючі провідники прокладаються відкрито, а обладнання приєднується до внутрішньої магістралі заземлення індивідуально шляхом паралельних приєднань.

6.2.2 Технічні засоби та організаційні заходи по упередженню можливої дії на працюючих пилу

Пил – основний шкідливий фактор на багатьох промислових підприємствах, обумовлений недосконалістю технологічних процесів. Природний пил знаходиться в повітрі в звичайних умовах мешкання людини в межах концентрацій $0,1\text{-}0,2 \text{ мг/м}^3$, в промислових центрах, де діють великі підприємства він не буває нижче $0,5 \text{ мг/м}^3$, а на робочих місцях запиленість повітря іноді сягає 100 мг/м^3 . Значення ГДК для нейтрального пилу, що не має отруйних властивостей, дорівнює 10 мг/м^3 .

Основні фізико-хімічні властивості пилу: хімічний склад, дисперсність (ступінь подрібнення), будова частинок, розчинність, щільність, питома поверхня, нижня та верхня концентраційна границя вибуховості суміші пилу з повітрям, електричні властивості та ін. Знання усіх цих показників дає

можливість оцінити ступінь небезпечності та шкідливості пилу, його пожежо- та вибухонебезпечність.

Для очищення повітря від пилу застосовують пиловловлювачі і фільтри. До фільтрів відносяться пристрої, в яких відділення пилових частинок від повітря проводиться шляхом фільтрації через пористі матеріали. Апарати, засновані на інших принципах пилевідділення, прийнято називати пиловловлювачами.

Залежно від природи сил, що діють на зважені в газі пилові частинки для їх відділення від газового потоку, використовують такі типи пиловловлюючих апаратів:

- сухі механічні пиловловлювачі (зважені частинки відділяються від газу за допомогою зовнішньої механічної сили);
- мокрі пиловловлювачі (зважені частинки відділяються від газу шляхом промивання його рідиною, захоплюючої ці частинки);
- електричні пиловловлювачі (частки пилу відокремлюються від газового потоку під дією електричних сил);
- фільтри (пористі перегородки або шари матеріалу, що затримують пилові частинки при пропусканні через них запиленого повітря);
- комбіновані пиловловлювачі (використовуються одночасно різні принципи очищення).

За функціональним призначенням пиловловлювальне обладнання поділяють на два види:

- 1) для очищення припливного повітря в системах вентиляції та кондиціонування;
- 2) для очищення повітря і газів, що викидаються в атмосферу системами промислової вентиляції.

В умовах конкретного підприємства по виготовленню виробів бетонних тротуарних неармованих, при дозуванні компонентів у бетонозмішувач можливе потрапляння у повітря цементного пилу. Для упередження шкідливої дії на

працюючих у цеху планується використовувати циклони для очищення повітря від пилу.

Відцентрові пиловідокремлювачі – циклони – знаходять більш широке застосування, оскільки при порівняно простій конструкції забезпечують високу ступінь знепилення повітря (80 ... 90%).

Циклон складається з циліндричного корпусу, до якого тангенціально підведений вхідний патрубок, нижньої конічної частини і вихлопного патрубку, що розміщується всередині корпусу співвісно з ним. Входячи в циклон зі швидкістю 16 ... 20 м / с, запилене повітря набуває обертальний рух і опускається вниз. При цьому частки пилу, під дією сил інерції, відкидаються до стінок апарату і, ковзаючи по них вниз, потрапляють в бункер. Очищений, потік повітря повертається вгору і через вихлопну трубу виходить з циклону.

Ефективність пиловловлювання зростає зі збільшенням швидкості входу повітря в циклон, однак при дуже великій швидкості зростає турбулізація повітряного середовища і ефективність циклону падає. Максимальну швидкість повітря приймають зазвичай не більше 20 м / с. На ефективність цих апаратів впливає і їх діаметр: з його збільшенням ефективність падає, тому діаметр циклонів приймається не більше 1 м.

Гідравлічний опір циклонів коливається в межах 500 ... 1100 Па. Він залежить від конструкції апарату і швидкості повітря на вході в нього.

6.2.3 Технічні засоби та організаційні заходи по упередженню можливої дії на працюючих вібрації

Існують такі способи боротьби з шумом механічного походження та вібрацією:

– зменшення шуму та вібрації безпосередньо в джерелах їх виникнення, застосовуючи обладнання, що не утворює шуму, замінюючи ударні технологічні процеси безударними, застосовуючи деталі із недзвінких матеріалів (пластмаса, гума, деревина та ін), підшипники ковзання замість кочення,

косозубі та шевронні зубчасті передачі замість прямозубих, проводячи своєчасне обслуговування та ремонт елементів, що створюють шум та ін.;

– зменшення шуму та вібрації на шляхах їх розповсюдження заходами звуко- та віброізоляції, а також вібро- та звукопоглинання;

– зменшення шкідливої дії шуму та вібрації, застосовуючи індивідуальні засоби захисту та запроваджуючи раціональні режими праці та відпочинку.

Виробництво бетонних тротуарних виробів в процесі формування потребує обов'язкового ущільнення. Для цієї мети на виробництві наявний вібромайданчик з частотою коливань 70 Гц та амплітудою 0,5 мм. Для зменшення впливу вібрації на працюючих від даного обладнання було застосовано заходи щодо віброізоляції.

РОЗДІЛ 7

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Підсумовуючи усе, що було викладено у попередніх розділах, можна стверджувати наступне:

- найвище значення коефіцієнту ущільнення досягається при витраті цементу у 380 кг/м^3 . З поміж варійованих факторів, саме витрата цементу здійснює найбільший вплив на ступінь ущільнення суміші, оскільки при високій витраті цементу у суміші зменшується витрата золошлаку, котрий володіє підвищеною водопотребою, а отже збільшується загальна пластичність суміші;

- найбільшим значенням середньої густини відмітилися зразки 13-ї серії ($\rho_m=2,353 \text{ г/см}^3$), проте густина контрольних зразків, з піском у якості заповнювача, виявилася все одно більшою ($\rho_{mk}=2,416 \text{ г/см}^3$), тобто, у порівнянні з класичним бетоном, бетон на заповнювачі із золошлаку володіє меншою густиною, внаслідок того, що пісок володіє більшою щільністю, а отже і вагою. Найбільшим рівнем впливу на середню густину відзначилося варіювання витрати цементу. Найвище значення густини досягається за витрати цементу близько 380 кг/м^3 , внаслідок того, що суміші з низькою витратою цементу є теоретично більш важкими, а для сумішей з найменшою витратою цементу, котра становила 350 кг/м^3 , не вдалося забезпечити відповідного рівня ущільнення;

- усі серії зразків, котрі були виготовлені, володіли водопоглинанням, меншим за 6 %, зразки 7-ї серії мали водопоглинання за масою 2%. Найбільшим впливом на показник відзначилася витрата пластифікатору, при його високому вмісті (2,5 %) спостерігалось підвищення водопоглинання, до рівня в 5,13%. При цьому негативним впливом на водопоглинання відзначилася і витрата цементу, так при витраті цементу у 410 кг/м^3 , середнє значення водопоглинання за результатами експериментів склало 3,5%, у той час, як для 380 кг/м^3 – 2,5%.

Контрольні зразки відзначилися вищим рівнем водопоглинання (3,07%) ніж зразки на золошлаку;

– міцнісні показники зразків виявилися дещо меншими, ніж планувалося. Найбільше отримане значення міцності склало 35,79 МПа (для 5-ї серії зразків), що є дещо вищим ніж значення міцності контрольних зразків (30,11). При перерахунку середньої міцності на клас, найбільше отримане значення – В25 (для 5-ї, 6-ї, 7-ї, 10-ї та 14-ї серій зразків). Збільшення витрати цементу не має суттєвого впливу на міцність, так при 350 кг/м³ витрати цементу, середнє значення міцності на стиск склало 29,766 МПа, при 380 кг/м³ – 29,956 МПа, а при 410 кг/м³ – 30,816 МПа. Час ущільнення також чинить не значну дію, хоча при 4 хвиликах ущільнення відзначається невисоке підвищення міцності (4хв. – 31,232 МПа, 3 хв. – 29,642 МПа, 2 хв. – 29,664 МПа). Витрата пластифікатору, як і у випадку з водопоглинанням, здійснює негативний вплив на міцність бетону, так при витраті пластифікатору в 1,9 % від маси цементу міцність при стиску склала – 32,714 МПа, при 2,2 % - 29,724 МПа, а при 2,5 % - 28,1 МПа. Саме витрата пластифікатору має найбільший вплив на міцність зразків;

– майже в усіх випадках, окрім 1-ї, 2-ї, 4-ї, 6-ї та 8-ї серій зразків, вдалося досягти бажаного рівня морозостійкості. Необхідно відзначити, що деякі зразки з використанням золошлаку відзначилися вищим рівнем морозостійкості ніж контрольні, так наприклад зразки 11-ї серії мали морозостійкість порядку 352 циклів у той час, як контрольні всього лише 211. Найвищого рівня морозостійкості (середнє значення 317,2 цикли) вдалося досягти за витрати цементу у 380 кг/м³. Як і на водопоглинання та міцність, на морозостійкість негативний вплив здійснює підвищена витрата пластифікатору, так при його найбільшій кількості (2,5 %) середня морозостійкість зразків склала 222,6 циклу, оптимальна кількість, встановлена за допомогою програмного комплексу STATISTICA, складає 2,1667 % від маси цементу. Також програма дозволила встановити оптимальні значення й інших варійованих факторів, для цементу – 404,2439 кг/м³, та час ущільнення 2,907 хв., за таких умов теоретична

морозостійкість сягне 377 циклів. В рамках дослідження було встановлено, що найсильніший вплив на значення морозостійкості мали коефіцієнт ущільнення та водопоглинання, коефіцієнти кореляції 0,62, та -0,6 відповідно.

З поміж усіх досліджуваних серій зразків, найкраще проявила себе 7-ма серія, для якої значення коефіцієнту ущільнення склало 0,96, середня густина – 2,205 г/см³, водопоглинання за масою склало 2 %, а за об'ємом – 4,5 % значення міцності при стиску – 34,59 МПа, що відповідає класу бетону В25 (за коефіцієнту варіації 13,8%), значення морозостійкості для даної серії сягнуло 350 циклів, тобто марка F 300, що суттєво перевищує проєктовані показники та показники контрольної серії зразків.

Зразки, із застосуванням в якості заповнювача золошлаку ТЕС, відзначилися більшою морозостійкістю та міцністю ніж контрольні зразки. Тобто заміна піску у складі бетону на золошлаковий наповнювач забезпечує не тільки утилізацію відходів, а і певне підвищення вищезазначених характеристик.

Ґрунтуючись на результатах експерименту, можна стверджувати про вірогідність використання золошлаку для виготовлення бетонних тротуарних неармованих виробів. Жорсткість бетонної суміші з таким заповнювачем, в силу його властивостей, передбачає лише вібропресований метод виробництва, котрий є найбільш розповсюдженим. Тобто використання золошлакових наповнювачів не потребує суттєвих змін у технології виробництва.

Підсумовуючи результати експериментів з визначення морозостійкості не можна не відмітити те, що метод, котрий використовувався для цього є прискореним і не може дати повної відповіді на те, як буде вести себе конкретний матеріал за реальних умов, тому перед впровадженням складу бетону у виробництво необхідно провести повні випробування на морозостійкість.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л. Основи бетонознавства: на-вч. посіб. / Л.Й. Дворкін, Дворкін О.Л. - К.: Основа, 2007. – 613 с..
2. Bondar V.O. Experimental study of properties of heavy concrete with bottom ash from power stations / Victor Bondar, Volodymyr Shulgin, Oksana Demchenko, Ludmila Bondar // MATEC Web of Conferences 116, 02007 (2017) DOI: 10.1051/matecconf/20171160200.
3. Bieliatynskiy, A., He, Yu., Pershakov, V., Akmalidina, O., & Krayushkina, K. (2022). The study of the effectiveness of the use of ash and slag in the construction of road pavement during maintenance. *Scientific Horizons*, 25(8), 75-84. [https://doi.org/10.48077/scihor.25\(8\).2022.75-84](https://doi.org/10.48077/scihor.25(8).2022.75-84).
4. Большаков В.І., Єлісеєва М.В. О., Щербак С.А. (2014). Контактна міцність механоактивованих дрібних бетонів із гранульованих доменних шлаків. *Science and Transport Progress*, 5(53), 138 -149 . doi: 10.15802/stp2014/29975.
5. Будівельне матеріалознавство: Підручник / Кривенко П.В., Пушкарьова К.К., Барановський В.Б. та ін., під ред. П.В. Кривенка. - К.: ТОВ УВПК «ЕксОб», 2006. - 704 с.
6. Використання техногенних продуктів у будівництві: Навчальний посібник / Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Пушкарьова К.К. та ін. - Рівне, 2019. - 340 с.
7. ДСТУ Б В.2.7-264:2011 Заповнювачі пористі неорганічні для будівельних робіт. Методи випробувань (ГОСТ 9758-86, MOD).
8. ДСТУ Б В.2.7-205:2009. Будівельні матеріали. Золи-виносу теплових електростанцій для бетонів. Технічні умови
9. Дворкін Л.І., Гарницький Ю.В., Риженко І.Н. Дослідження золи-виніс як компонента сухих будівельних суцільних // Матеріали IV науково-практ. семінару «Структура, властивості та склад бетону». - Київ, 2007. - С. 47-53.
10. Дворкин Л. І. Эффективные золовмісні бетони і розчини: *Монографія*. – Рівне: НУВГП, 2022.- 419 с.

11. Дворкин Л. І., Будівельні в'язучі матеріали. – Рівне: НУВГП, 2019.- 622 с.
12. ДСТУ Б В.2.7-42-97. Методи визначення водопоглинання, густини та морозостійкості будівельних матеріалів і виробів.
13. ДСТУ Б В.2.7-46-2010 Цементи загально будівельного призначення. Технічні умови.
14. ДСТУ Б В.2.7-47-96 (ГОСТ 10060.0-95) Бетони. Методи визначення морозостійкості. Загальні вимоги.
15. ДСТУ Б В.2.7.50-96 (ГОСТ 10060.3-95) Бетони. Дилатометричний метод визначення морозостійкості.
16. ДСТУ Б В.2.7-71-98. Щебінь і гравій із щільних гірських порід та відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань.
17. ДСТУ Б В.2.7-112-2002 Пісок щільний природний для будівельних робіт. Технічні умови.
18. ДСТУ Б В.2.7-145:2008. Вироби бетонні тротуарні неармовані. Технічні умови.
19. ДСТУ Б В.2.7-185:2009. Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення нормальної густоти, строків тужавлення та рівномірності зміни об'єму.
20. ДСТУ Б В.2.7-187:2009. Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення міцності на згин та стиск.
21. ДСТУ Б В.2.7-188:2009. Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення тонкості помелу.
22. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками.
23. ДСТУ Б В.2.7-215:2009. Бетони. Правила підбору складу.
24. ДСТУ Б В.2.7-232:2010 Пісок для будівельних робіт. Методи випробування.

25. Додатки для бетонів і будівельних розчинів: навчальний посібник. – Ніжин: ТОВ «Видавництво «АспектПоліграф», 2010. – 228 с..
26. Зайченко Н. М., Сердюк А. І. Бетони с високим вмістом золи для масивних залізобетонних конструкцій // Вісник ДНАБіА. – 2013. – 1(99). – С. 137-144.
27. Краснянський , Г. ., Клапченко , В., & Азнаурян , І. . (2023). Прогнозування морозостійкості бетону за різних температур заморожування. Управління розвитком складних систем, (53), 135–139. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.53.135-139>.
28. Кривенко П. В., Пушкарьова Е. К., Гоц В. І., Ковальчук Г. Ю. Цементи і бетони на основі паливних зол та шлаків: Монографія. – К.: ООО «ІПК Експрес-Полиграф», 2012. – 258 с.
29. Кривенко П. В., Пушкарьова К. К., Барановський В. Б., Кочевих М. О., Гасан Ю. Г., Константиновський Б. Я., Ракша В. О. Будівельне матеріалознавство. – К: «Видавництво Ліра-К», 2012. – 624 с.
30. Кашковський В. Зольні та золошлакові відходи як багатофункціональна сировина // Наука та інновації. — 2017. Золошлакові матеріали – вигідна альтернатива природним матеріалам для будівництва доріг. URL: https://ppv.net.ua/uploads/work_attachments/Ash_Use_in_the_Road_Construction.
31. Марків Т. Є., Новосад П. В., Новосад О. П., Саїв І. В. Модифіковані бетони з поліпшеними експлуатаційними властивостями // Вісник НУЛП. – 2010. – 664. – С. 93-99.
32. Пушкорьова К. К., Гончар О.Л., Павлюк В.В. Комплексне використання відходів паливно-енергетичної промисловості для отримання композиційних матеріалів з покращеними експлуатаційними характеристиками // Матеріали конф. «Енергозберігаючі технології. Застосування відходів промисловості в будівельних матеріалах та будівництві». - К.,-2004. -С. 96-103 с.
33. Саницький М. А., Позняк О. Р., Марущак У. Д. Енергозберігаючі технології в будівництві: навч. посібник /. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 236 с.

34. Саницький М. А. Особливошвидкотверднучі композиції для високофункціональних бетонів // М. А. Саницький, У. Д. Марущак, І. І. Кіракевич, Т. А. Мазурак / Вісник НУ “Львівська політехніка” “Теорія і практика будівництва”. – 2013. – №755 – С. 385–390.

35. Руденко Д. В. Бетон на основі дисперсно модифікованої цементної системи / Д. В. Руденко // Наука и прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – № 64 (4). – 2016. – С. 169–175.

36. Шишкін А., Нетеса М., Щерба В. (2017). Вплив залізозмісного наповнювача на міцність бетону. Східно-Європейський журнал підприємницьких технологій, 5/6(89), 11-16. doi: 10.15587/1729-4061.2017.109977.

37. Троян В. В., Товстоніс В. В. Дослідження спеціальних властивостей високоміцних бетонів // Вісник КНУБА. – 2010. – 32. – С. 138-146.

38. Shulgin V. Increasing the water resistance of magnesium binders /Volodymyr Shulgin, Oksana Demchenko, Ruslan Petrash, and Olga Gukasian// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 708, Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings, DOI: 10.1088/1757-899X/708/1/012105.

39. Aitcin, P.C. “The Art and Science of Durable High-Performance Concrete.” // Proceedings of the Nelu Spiratos Symposium. Committee for the Organization of CANMET ACI Conferences. – 2003. – P. 69-88.

40. Ang B. W., Su B. Carbon emission intensity in electricity production: A global analysis // Energy Policy. — 2016. — Т. 94. — С. 59

41. Berry E.E., Hemmings R.T., Zhang M.H., Cornelius B.J., Golden D.M. Hydration in High Volume Fly ash Concrete Binders // Supplemental Proc. Fourth Intern. Conf. «On Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. High-Volume Fly Ash Concrete Session». - 2000. - P. 2-27.

42. Dvorkin, L., Dvorkin, O., and Ribakov, Yu. (2013). Multi – Parametric Concrete Compositions Design. New York: Nova Science Publishers Inc., 223.

43. Culton G.L., Farrington S.A. Rapid repair mortar based on a high- calcium fly ash binder // Proc. of the Intern. Conf. «Concrete 2000. Economic and Durable Construction through Excellent)» / Eds. Dhir R.K. and Jones. - Dundee, Scotland, UK. 1993
44. Carrette G.G., Bilodeau A., Chevrier R., Malhotra V.M. Mechanical Properties of Concrete Incorporating High Volumes of Fly Ash from Sources in the U.S.A. // Presentation at 4th CANMET «ACI Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete». - Istanbul, Turkey, 2002. - P. 120-132.
45. Malhotra, V.M., and P.K. Mehta. High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete. Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development. Ottawa, Canada, 2002. – 101 pp.
46. M. Thomas Optimizing the use of fly ash in concrete // Concrete Thinking/ Portland Cement Associations. – 2007. – P. 1-24.
47. P. Kumar Mehta High-performance, high-volume fly ash concrete for sustainable Development. - International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology. – 2004. – 5. P. 3-14.
48. Webber, J. B. W. (2010). Studies of nano-structured liquids in confined geometries and at surfaces. Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy, 56, 78–93.
49. Feistel, R., and Wagner, W. (2006). A new equation of state for H₂O ice. *J. of Phys. Chem. Reference Data*, 35, 1021–1047.
50. Culton G.L., Farrington S.A. Rapid repair mortar based on a high- calcium fly ash binder // Proc. of the Intern. Conf. «Concrete 2000. Economic and Durable Construction through Excellent)» / Eds. Dhir R.K. and Jones. - Dundee, Scotland, UK.
51. Carrette G.G., Bilodeau A., Chevrier R., Malhotra V.M. Mechanical Properties of Concrete Incorporating High Volumes of Fly Ash from Sources in the U.S.A. // Presentation at 4th CANMET «ACI Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete». - Istanbul, Turkey, 2002. - P. 120-132.

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Навчально – науковий інститут архітектури, будівництва та землеустрою
Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Графічні та табличні матеріали до магістерської
кваліфікаційної роботи

Дослідження міцності та морозостійкості важких бетонів з використанням золошлаків теплових електростанцій



Виконав: студент групи 601-мБТ

Керівник:

Завідувач кафедри:

Рецензент:

Т. В. Страшко

О.В. Демченко

О.В. Семко

Н.М. Лаптева

Використання золошлаків у важких бетонах

- На сучасному етапі золи ТЕС використовують при виготовленні як монолітних, так і збірних бетонних та залізобетонних конструкцій.
- Золи ТЕС при введенні їх у бетонну суміш завдяки своїй дисперсності виконують роль мікронаповнювача, ущільнюючи кінцевий продукт, за рахунок заповнення об'ємів пористості між зернами піску та щебеню. Щільна структура дозволяє значно зменшити пористість виробу та його водопоглинання. Тобто одним із способів безпечної утилізації золошлакових відходів є використання їх у будівельній галузі для виробництва різноманітних матеріалів .



Проблемою при застосуванні відходів ТЕС для виготовлення бетонів є їхня дрібнодисперсність, яка повинна різко збільшувати сумарну питому поверхню, а отже і кількість необхідної води замішування. Так, в свою чергу збільшується В/Ц. Проте зола та золошлаки ТЕС завдяки особливостям своєї будови чинять додаткову пластифікуючу дію та сприяють кращому розподіленню води у бетонній суміші у поєднанні з органічними пластифікаторами створюється особливий органо-мінеральний комплекс, який також володіє певним рядом позитивних властивостей.

Мета та задачі роботи

Мета роботи є розробка складу бетону з використанням золошлаків теплових електростанцій з морозостійкістю не менше F200. Дослідження міцності та морозостійкості важких бетонів.

Задачі дослідження:

- експериментальний пошук найбільш оптимального співвідношення компонентів, для отримання бетону з високою морозостійкістю;
- визначення факторів, що можуть чинити значний вплив на досліджувану величину;
- запланувати повний факторний експеримент, з метою визначення впливу зміни значення варійованих величин (витрата цементу, витрата пластифікатору та час ущільнення) на морозостійкість;

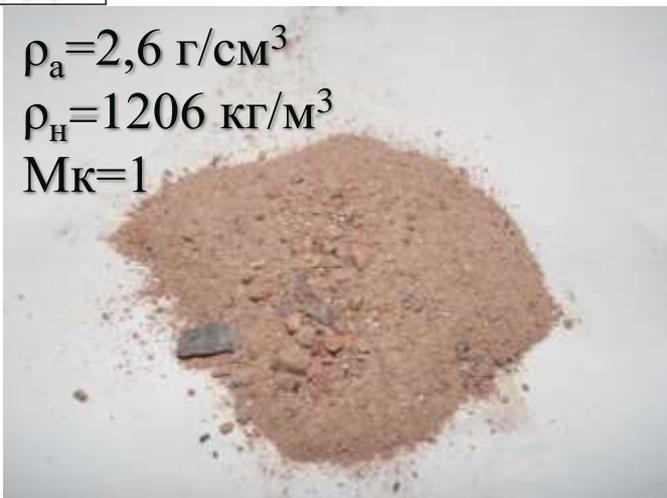
Об'єкт дослідження міцність і морозостійкість бетонів, виготовлених із застосуванням в якості заповнювачів золошлаків теплових електростанцій.

Предметом дослідження даної магістерської роботи є зразки, виготовлені з бетону для якого в якості заповнювача використовують золошлаки теплових електростанцій.

Характеристика вихідних матеріалів

Золошлак ТЕС

$\rho_a = 2,6 \text{ г/см}^3$
 $\rho_H = 1206 \text{ кг/м}^3$
 $M_k = 1$



Щебінь



$\rho_H = 1361 \text{ кг/м}^3$
 Фракція: 5-10

Цемент

цемент ПЦ І-500-Н.
 Нормальна густота
 – 27,5 %



План експерименту

Серія	Цемент, кг	Добавка, л	Час ущільнення, хв
1	410	10	4
2	350	8	4
3	410	10	2
4	350	8	2
5	410	7	4
6	350	6	4
7	410	7	2
8	350	6	2
9	410	8	3
10	350	7	3
11	380	8	4
12	380	8	2
13	380	9	3
14	380	7	3
15	380	8	3

**При формуванні зразків
використовувалась
спеціально виготовлена
насадка для
привантаження,**



Вимірювач об'ємних деформацій «Бетон-фрост» з'єднувальний блок

Вимірювальна
камера



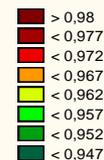
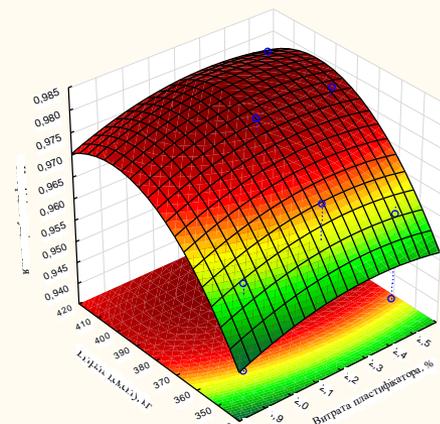
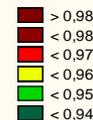
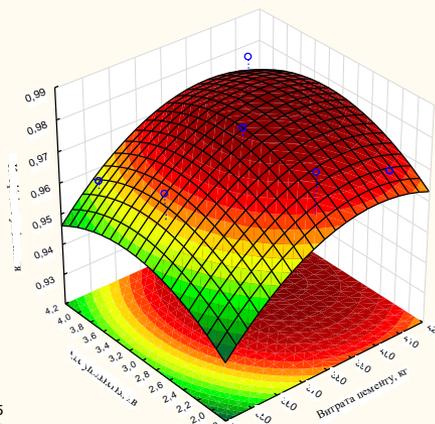
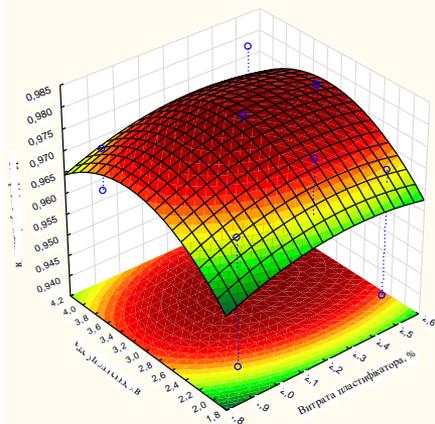
з'єднувальний
блок



Електронний
блок

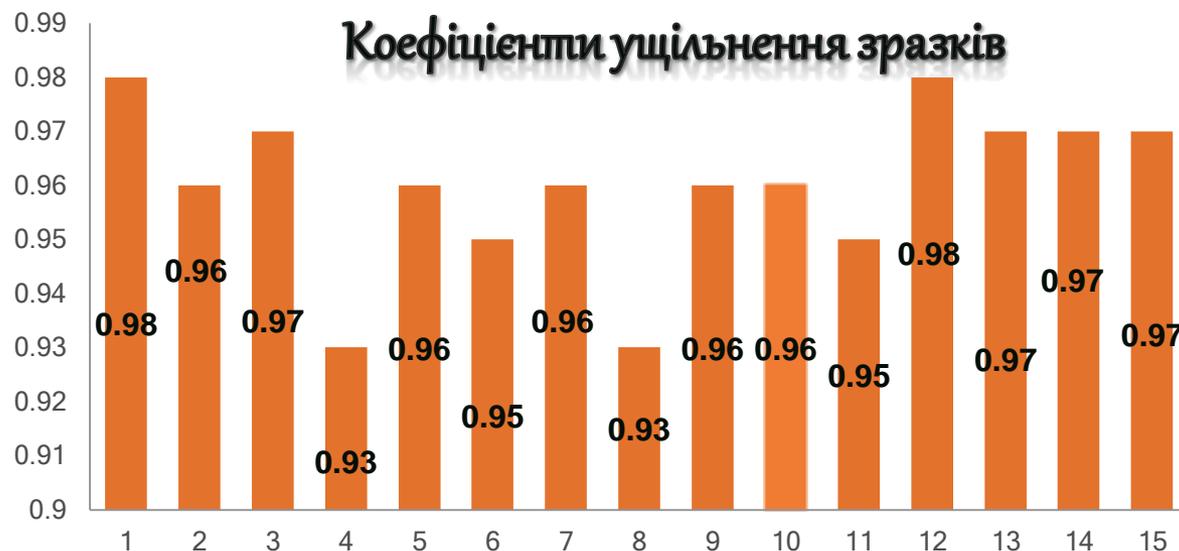


Результати визначення коефіцієнту ущільнення

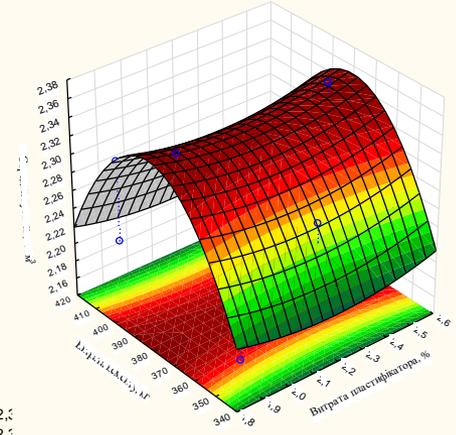
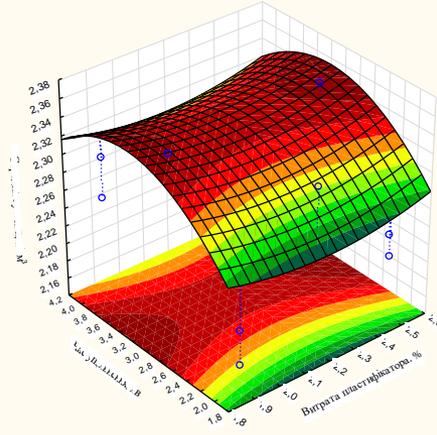
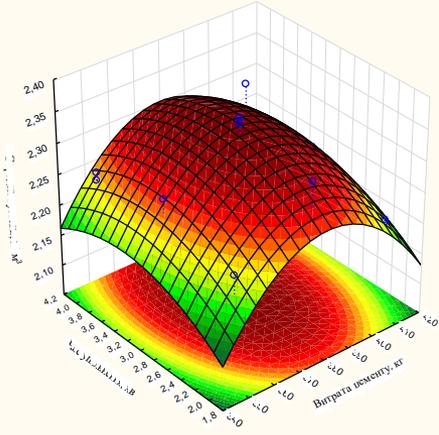


Найвище значення коефіцієнту ущільнення досягається при витраті цементу у 380 кг/м^3 з поміж варійованих факторів, саме витрата цементу здійснює найбільший вплив на ступінь ущільнення суміші.

Коефіцієнти ущільнення зразків



Результати визначення середньої густини



Найбільшим значенням середньої густини

відміtilись зразки 13-ї серії ($\rho_m = 2353 \text{ кг/м}^3$). Найбільшим рівнем впливу на середню густину відзначилося варіювання витрати цементу.

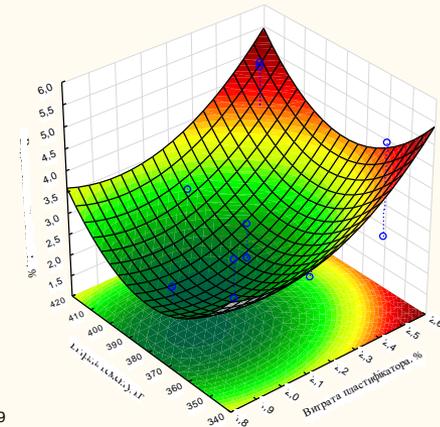
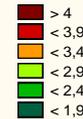
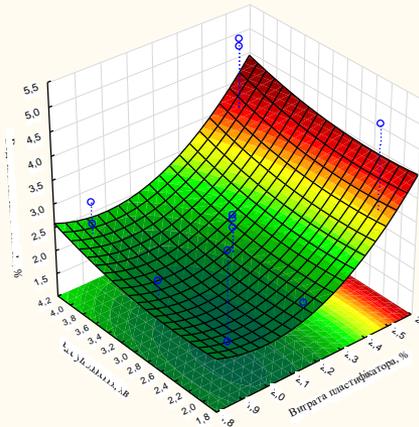
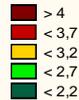
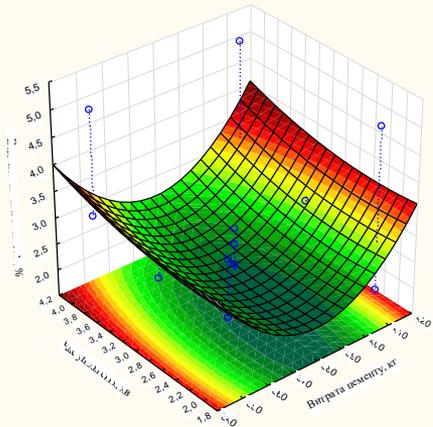
Найвище значення густини досягається за витрати цементу близько 380 кг/м^3 .

2.4
2.35
2.3
2.25
2.2
2.15
2.1
2.05

Середня густина зразків, кг/м^3



Результати визначення водопоглинання за масою

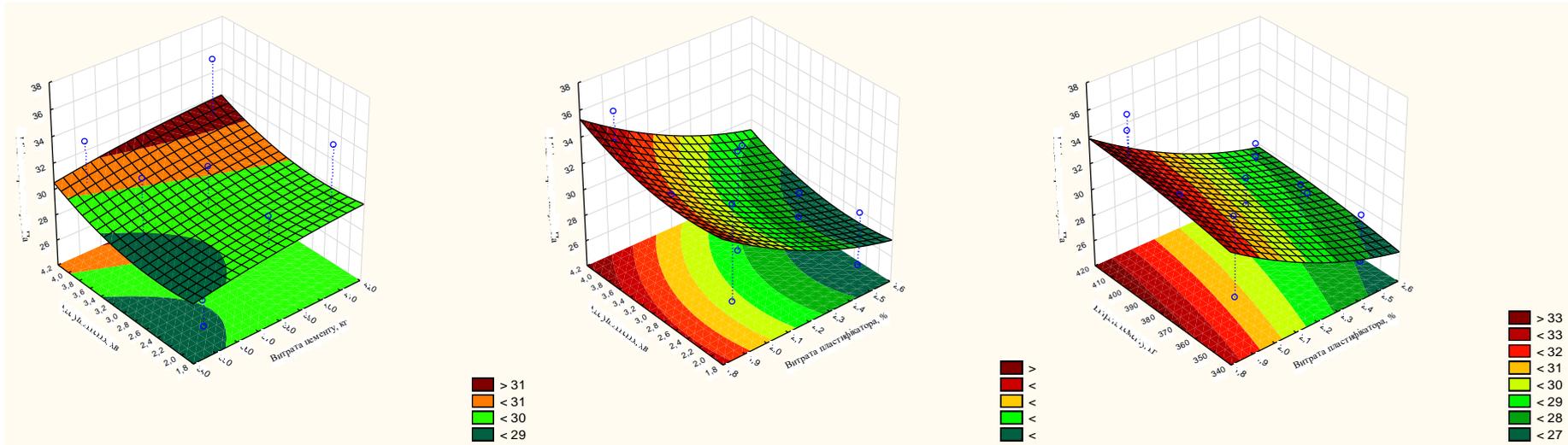


Усі серії зразків, котрі були виготовлені, мали водопоглинанням, менше за 6 %, зразки 7-ї серії мали водопоглинання за масою 2%. Найбільшим впливом на показник відзначилася витрата пластифікатора, при його високому вмісті (2,5 %) спостерігалось підвищення водопоглинання, до рівня в 5,13%.

Водопоглинання зразків, %



Результати визначення міцності



Найбільше отримане значення міцності склало 35,79 МПа (для 5-ї серії зразків). Збільшення витрати цементу не має суттєвого впливу на міцність, час ущільнення також чинить не значну дію. Витрата пластифікатора має найбільший вплив на міцність зразків;



Випробування на морозостійкість

11

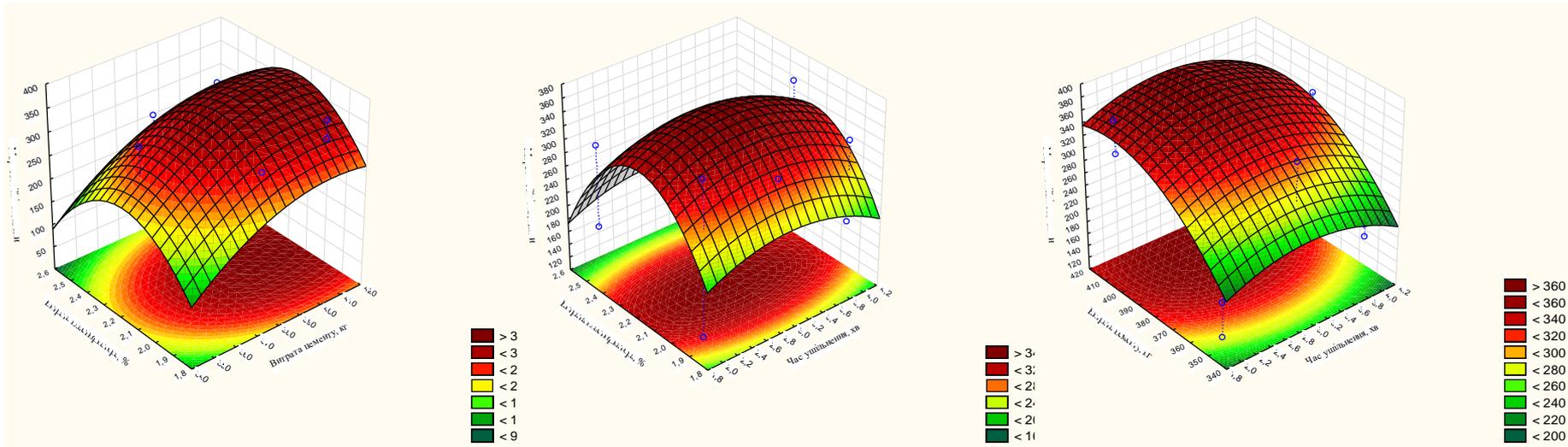


**Заправка камери
приладу та
встановлення
зразку.**

Результати визначення морозостійкості

Серія	Морозостійкість	
	Кількість циклів	Марка
1	188	150
2	172	150
3	297	200
4	175	150
5	313	300
6	191	150
7	350	300
8	119	100
9	328	300
10	344	300
11	352	300
12	325	300
13	281	200
14	303	300
15	325	300
16	268	200
17	305	300

Результати визначення морозостійкості



Найвищою морозостійкістю відзначаються зразки, для яких витрата цементу знаходиться в околі 400кг/м³, а витрата пластифікатору – 2.2 %.

Найоптимальніший час ущільнення складає приблизно 3 хвилини, вплив часу ущільнення на морозостійкість є значно меншим у порівнянні із витратою пластифікатору та цементу.

Висновки

- найвище значення коефіцієнту ущільнення досягається при витраті цементу у 380 кг/м^3 . З поміж варійованих факторів, саме витрата цементу здійснює найбільший вплив на ступінь ущільнення суміші, оскільки при високій витраті цементу у суміші зменшується витрата золошлаку, котрий володіє підвищеною водопотребою, а отже збільшується загальна пластичність суміші;
- найбільшим значенням середньої густини відмітилися зразки 13-ї серії ($\rho_m=2,353 \text{ г/см}^3$), проте густина контрольних зразків, з піском у якості заповнювача, виявилася все одно більшою ($\rho_{mk}=2,416 \text{ г/см}^3$), тобто, у порівнянні з класичним бетоном, бетон на заповнювачі із золошлаку володіє меншою густиною, внаслідок того, що пісок володіє більшою щільністю, а отже і вагою. Найбільшим рівнем впливу на середню густину відзначилося варіювання витрати цементу.
- усі серії зразків, котрі були виготовлені, володіли водопоглинанням, меншим за 6 %, зразки 7-ї серії мали водопоглинання за масою 2%. Найбільшим впливом на показник відзначилася витрата пластифікатору, при його високому вмісті (2,5 %) спостерігалось підвищення водопоглинання, до рівня в 5,13%. При цьому негативним впливом на водопоглинання відзначилася і витрата цементу, так при витраті цементу у 410 кг/м^3 , середнє значення водопоглинання за результатами експериментів склало 3,5%;
- Найбільше отримане значення міцності склало 35,79 МПа (для 5-ї серії зразків), що є дещо вищим ніж значення міцності контрольних зразків (30,11). При перерахунку середньої міцності на клас, найбільше отримане значення – В25 Час ущільнення також чинить не значну дію, хоча при 4 хвилинах ущільнення відзначається невисоке підвищення міцності

Висновки

- Витрата пластифікатору, як і у випадку з водопоглинанням, здійснює негативний вплив на міцність бетону, так при витраті пластифікатору в 1,9 % від маси цементу міцність при стиску склала – 32,714 МПа, при 2,2 % - 29,724 МПа, а при 2,5 % - 28,1 МПа. Саме витрата пластифікатору має найбільший вплив на міцність зразків;
- майже в усіх випадках, окрім 1-ї, 2-ї, 4-ї, 6-ї та 8-ї серій зразків, вдалося досягти бажаного рівня морозостійкості. Необхідно відзначити, що деякі зразки з використанням золошлаку відзначилися вищим рівнем морозостійкості ніж контрольні
- Найвищого рівня морозостійкості вдалося досягти за витрати цементу у 380 кг/м³. Як і на водопоглинання та міцність, на морозостійкість негативний вплив здійснює підвищена витрата пластифікатору, так при його найбільшій кількості (2,5 %) В рамках досліду було встановлено, що найсильніший вплив на значення морозостійкості мали коефіцієнт ущільнення та водопоглинання, коефіцієнти кореляції 0,62, та -0,6 відповідно.
- З поміж усіх досліджуваних серій зразків, найкраще проявила себе 7-ма серія, для якої значення коефіцієнту ущільнення склало 0,96, середня густина – 2,205 г/см³, водопоглинання за масою склало 2 %, а за об'ємом – 4,5 % значення міцності при стиску – 34,59 МПа, що відповідає класу бетону В25 (за коефіцієнту варіації 13,8%), значення морозостійкості для даної серії сягнуло 350 циклів, тобто марка F 300, що суттєво перевищує проєктовані показники та показники контрольної серії зразків.