

Національний університет водного господарства та природокористування
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Скрипник Микола Михайлович

УДК 691.327

ДИСЕРТАЦІЯ
ВИСОКОМІЦНИЙ ДРІБНОЗЕРНИСТИЙ БЕТОН ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ
ВІДСІВІВ КАМЕНЕПОДРІБНЕННЯ

05.23.05 – будівельні матеріали та вироби
19 – архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
(доктора філософії)

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ М.М. Скрипник

Науковий керівник: Дворкін Леонід Йосипович, доктор технічних наук,
професор

Рівне – 2019

АНОТАЦІЯ

Скрипник М.М. Високоміцний дрібнозернистий бетон із застосуванням відсівів каменеподрібнення. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.23.05 – «Будівельні матеріали та вироби» (19 – Архітектура та будівництво). – Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне – 2019.

Дисертаційна робота направлена на розробку технології отримання високоміцних дрібнозернистих бетонів з використанням в якості основного заповнювача відсівів подрібнення граніту, що містять значну кількість фракції $\leq 0,16$ мм.

Проведений аналіз літературних джерел, присвячених отримання високоміцних дрібнозернистих бетонів, а також використанню в якості заповнювача цементних бетонів відсівів подрібнення граніту. На основі розглянутого стан наукової проблеми сформульовано гіпотезу, що при умові забезпечення низьких В/Ц у дрібнозернистому бетоні, що можливо за рахунок використання суперпластифікаторів з високим водоредукуючим ефектом, дисперсні частинки, що містяться у відсівах подрібнення граніту, будуть сприяти направленому структуроутворенню твердіючого цементного каменю. Оптимізація складу дрібнозернистого бетону, що містить наповнене дисперсними гранітними частинками цементне тісто та гранітні відсівы з оптимізованим гранулометричним складом дозволить отримати бетон з підвищеною міцністю при раціональних витратах кондиційних матеріалів.

Наведено характеристики вихідних матеріалів та методики досліджень, використаних в роботі.

Результати седиментаційного аналізу свідчать, що частинки відсівів менше 0,16 мм складається переважно з крупних частинок, котрі можуть виступати в якості інертного наповнювача цементних бетонів. Вміст дисперсних частинок, які можуть мати значну кількість активних центрів, та сприяти прискоренню зародження кристалів новоутворень (більше 40...45%).

Аналіз отриманих експериментально-статистичних моделей свідчить, що рухомість і ефективна в'язкість цементного тіста з гранітним наповнювачем перебувають у безпосередній залежності як від його кількісного вмісту, так і від дисперсності. На збільшення рухомості цементного тіста з гранітним наповнювачем та підвищення значення його ефективної в'язкості суттєво впливає добавка ПАР. Важливий вплив на зміну рухомості й ефективної в'язкості цементно- тіста з гранітним наповнювачем (ГН) виконує відношення

V/(Ц+ГН), з ростом якого відбувається підвищення рухомості й зниження ефективної в'язкості.

Як показали отримані результати ступінь гідратації цементу знаходилась у межах від 45 до 76%. Введення гранітного наповнювача сприяє підвищенню показника однорідності однорідності пор (α). Це особливо помітно у початкові терміни твердіння цементного каменю. Композиція, що містить полікарбоксилатний суперпластифікатор гідратує у деякій мірі повільніше, що викликано нижчим водовмістом цементного тіста внаслідок високого водоредукуючого ефекту добавки. Адсорбційна плівка, утворена суперпластифікатором, є досить проникною для молекул води і не створює суттєвих перешкод для гідратації цементу та утворення міцної структури цементного каменю.

Електронно-мікроскопічний аналіз показав, що цементний камінь, наповнений гранітними частинками $<0,16$ мм характеризується більш однорідною структурою. Введення суперпластифікатора спричиняє утворення більш щільної, злитної структури цементного каменю, що є причиною зниженого водопоглинання і максимальної міцності при стиску. Така структура цементного каменю може бути основою для отримання високоміцного бетону при умові забезпечення оптимального співвідношення між складовими, щільного каркасу заповнювача та максимального ущільнення.

Встановлено, що підвищення дисперсності гранітного пилю робить бетонну суміш більш в'язкою і тому суттєво знижує її розшарування. Поряд з цим така підвищена в'язкість викликає значно швидшу втрату «життєздатності» суміші. Доведено, що завдяки введенню суперпластифікатора та пилюватої фракції $\leq 0,16$ мм втрата рухомості протягом 2-х год є незначною, це обумовлено сповільненням процесів початкового структуроутворення.

Отримано комплекс експериментально-статистичних моделей, що визначають вплив технологічних факторів на основні властивості бетонних сумішей, пластифікуючий і водоредукуючий ефект добавок суперпластифікаторів. Показано можливість раціонального поєднання суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу з пластифікуючими добавками інших видів і створення ефективних комплексних добавок, що характеризуються високими пластифікуючим та водоредукуючим ефектами.

Отримано математичні моделі комплексного впливу пластифікуючих добавок різних типів на міцність дрібнозернистого бетону на гранітних відсівах у різному віці (12 год., 1 доба, 7 та 28 діб), що дозволяють проектувати склад комплексної добавки, відповідно встановлених критеріїв оптимізації.

Розроблено розрахункові формули для вибору Ц/В при проектуванні складів бетонної суміші з комплексними добавками та визначено коефіцієнти рівняння міцності для різних співвідношень добавок.

Визначено оптимальний зерновий склад відсівів для дрібнозернистих бетонів різних класів за міцністю. Отримані бетони характеризувались досить високими значеннями міцності при згині (при деяких співвідношеннях факторів до 12 МПа), що пов'язане з особливостями дрібнозернистих бетонів, для яких зазвичай співвідношення між міцністю при стиску та при згині вище ніж для звичайних бетонів внаслідок більшої однорідності. Також підвищена міцність при згині може бути викликана особливістю гранітних відсівів, для яких характерна наявність зерен лещадної і голчатої форми, котрі можуть проявляти деякий армуючий ефект.

Виконані експериментальні дослідження показали, що за умови введення полікарбоксилатного суперпластифікатора в бетонну суміш компенсується негативний вплив пилюватої фракції відсіву, що позитивно відбивається на основних властивостях бетонної суміші та міцності бетону при стиску, при цьому виконує роль активного мікронаповнювача. Встановлені технологічні параметри, дозволяють отримати при застосуванні гранітних відсівів з оптимізованим гранулометричним складом та при введенні добавки суперпластифікатора бетони з міцністю 60...65 МПа.

Додаткове введення алюмосилікатної добавки метакаоліну дозволяє підвищити міцність при стиску у віці 28 діб до 70...75 МПа. Аналіз відповідних кількісних залежностей дозволяє стверджувати, що метакаолін, внаслідок високої дисперсності і пуцоланової активності, забезпечує більшу ефективність ніж гранітний пил. Підвищення міцності дрібнозернистого бетону за рахунок метакаоліну становить (35-38)%, що узгоджуються з відомими даними. Як і для пилюватої фракції відсівів, ефективність введення метакаоліну суттєво зростає при введенні суперпластифікатора, хоча підвищення міцності до (8...10%) спостерігається і для непластифікованих сумішей.

Встановлено, що максимальне зниження відкритої пористості дрібнозернистого бетону забезпечує введення добавки суперпластифікатора 0,5...1% від маси цементу. Підвищення вмісту фракції відсіву менше 0,16 мм при умові сумісного використання суперпластифікатора знижує водопоглинання на 40...50%.

Встановлено, що для дрібнозернистого бетону на гранітних відсівах середнього розміру відкритих капілярних пор (λ) знаходиться в межах – 0,21 – 0,81, показник однорідності розмірів відкритих капілярних пор (α) – 0,19 – 0,76.

Підвищення вмісту фракції відсіву менше 0,16 мм зменшує показник λ із 0,7 до 0,49, введенні добавки суперпластифікатора до 0,38. При цьому показник однорідності пор змінюються в межах від 0,3 до 0,41.

Доведено, що зниження розмірів пор та підвищення їх однорідності, викликане збільшення кількості пиловатих частинок відсівів при вмісті суперпластифікатора 0,5...1% сприяє підвищенню морозостійкості до 500...550 циклів. Досліджувані бетони можна віднести до класів підвищеної (F100...F200) та високої (F400...F500) морозостійкості. Підвищення вмісту фракції відсіву менше 0,16 мм у відсівах без суперпластифікатора внаслідок збільшення водопотреби бетонної суміші і, відповідно, відкритої пористості та розміру пор викликає зниження водонепроникності від W6 до W2. В присутності добавки кількості 0,5-1% водонепроникність зростає до W8-W10.

Розроблено спосіб проектування складу високоміцного дрібнозернистого бетону на гранітних відсівах, який дозволяє визначати співвідношення між компонентами та необхідний вміст добавок, враховуючи необхідну міцність при стиску, вміст фракції менше 0,16 мм у відсівах.

Побудовано номограми морозостійкості та водонепроникності високоміцного дрібнозернистого бетону на гранітних відсівах, що дозволяють додатково враховувати ці параметри при проектуванні складу бетону.

Запропоновані технологічні параметри отримання високоміцних дрібнозернистих бетонів з використанням в якості заповнювача гранітних відсівів з підвищеним вмістом частинок $\leq 0,16$ мм підтверджені випуском дослідно-промислової партії.

Ключові слова: високоміцний дрібнозернистий бетон, гранітний відсів, морозостійкість, водонепроникність, суперпластифікатор.

Список публікацій здобувача:

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

2. Дворкін Л.Й. Ефективні технології бетонів та розчинів із застосуванням техногенної сировини: монографія / Л.Й. Дворкін, В.В. Житковський, В.В. Марчук, Ю.О. Степасюк, М.М. Скрипник// Рівне: НУВГП. – 2017. – 424 с.

Статті у наукових фахових виданнях України:

3. Дворкін Л.Й. Оптимізація зернового складу заповнювача бетоні підвищеної міцності на гранітному відсіві/ Л.Й. Дворкін, В.В. Житковський, А.Р.

Разумовський, М.М. Скрипник // Вісник. ОДАБА – Одеса: ОДАБА. – 2015. – С. 66-71.

4. Дворкін Л.Й. Комплексні пластифікуючі добавки для бетону на основі ефірів полікарбосилату/ Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Скрипник М.М.// Будівельні матеріали та вироби. – 2016. - №1. – С. 38-42.

5. Дворкін Л.Й. Проектування складів комплексних пластифікуючих добавок та бетонів з їх застосуванням/ Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Скрипник М.М.// Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. – Рівне: НУВГП. – 2016. – Вип. 34. – С. 36-45.

6. Дворкін Л.Й. Ефективність бетонів на вітчизняному суперпластифікаторі/ Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Скрипник М.М., Ковальчук Т.В.// Будівництво України. – 2017. - №4. – С. 10-13.

Статті у наукових періодичних виданнях іноземних держав:

7. Дворкин Л.И. Метод оптимизации составов фибробетонов/ Дворкин Л.И., Бордюженко О.М., Скрыпник Н.М.// Технологии бетонов. – Москва, 2019. – № 3-4. – С. 40-44.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Дворкін Л.Й. Високоміцний дрібнозернистий бетон на відсівах подрібнення граніту/ Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Скрипник М.М.// Наука та будівництво. – 2018. - №1. – С.34-42.

9. Дворкин Л.И. Оптимизация составов комплексных добавок/ Дворкин Л.И., Житковский В.В., Скрыпник Н.М.// Бетон и железобетон в Украине. – 2017. - №1. – С. 2-8.

10. Скрипник М.М. Важкий бетон із використанням кам'яних відсівів/ Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Скрипник М.М.// Матеріали X Міжнародної науково-технічної Web-конференції «Композиційні матеріали». – Київ 2017. – С 18-23.

11. Скрипник М.М. Комплексні пластифікуючі добавки на основі ефірів полікарбосилату/ Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Скрипник М.М.// Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Ефективні організаційно-технічні рішення та енергозберігаючі технології в будівництві». – Харків 2016. – С. 33-35.

Патент:

12. Патент №109413, С04В 103/30 (2006.01) від 25.08.2016 р. Комплексна добавка для бетону/ Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Скрипник М.М.; Заявник і патентовласник Національний університет водного господарства та природокористування.

ABSTRACT

Skrypnyk M.M. High-strength fine-grained concrete with the use of granite siftings. - Qualification scientific work as a manuscript.

PhD thesis (Doctor of Philosophy) in Engineering sciences by specialty 05.23.05 «Building materials and products» (19 – Architecture and Construction). – National University of Water and Environmental Engineering, Ministry of Education and Science of Ukraine. – Rivne, 2019.

Thesis is aimed at developing a technology for producing high-strength fine-grained concretes using granite siftings containing a significant amount of ≤ 0.16 mm particles as the main aggregate.

An analysis of literary sources devoted to get of high-strength fine-grained concrete, as well the using of granite siftings a filler of cement concrete. On the basis of the considered state of the scientific problem, the hypothesis is formulated that, provided the low W/C is provided in fine-grained concrete, which is possible due to the use of superplasticizers with a high water-reducing effect, the disperse particles contained in the granite crushing compartments will contribute to the directional structure of the hardening cement stone. Optimization of the fine-grained concrete composition, containing a cement dough filled with dispersed granite particles and granite siftings with an optimized granulometric composition, will allow to obtain concrete with increased durability at rational consumption of conditioned materials.

The characteristics of the source materials and research methods used in the work are described.

The results of the sedimentation analysis indicate that particles of the granite siftings less than 0.16 mm consist mainly of large particles, which can act as an inert filler of cement concrete. The content of dispersed particles, which may have a significant number of active centers, and contribute to the acceleration of nucleation of crystals (more than 40 ... 45%).

The analysis of experimental and statistical models obtained shows that the fluidity and effective viscosity of a cement dough with granite filler are directly related to both its quantitative content and dispersion. An increase in the fluidity of cement dough with granite filler and an increase in the value of its effective viscosity significantly affects the addition of surfactant. An important influence on the change in the fluidity and effective viscosity of the cement paste with granite filler (GF) is the ratio $W/(C+GF)$, with the growth of which there is an increase in mobility and a decrease in effective viscosity.

As the results showed, the degree of hydration of cement was in the range of 45 to 76%. The introduction of granite filler increases the homogeneous homogeneity of

pores (α). This is especially noticeable in the initial terms of hardening of a cement stone. The composition containing the polycarboxylate superplasticizer hydrates more slowly, due to the lower water content of the cement paste due to the high water-reducing effect of the additive. The adsorption membrane, formed by a superplasticizer, is very permeable to water molecules and does not create significant obstacles for the hydration of cement and the formation of a solid structure of cement stone.

An electron-microscopic analysis showed that a cemented stone filled with granite particles <0.16 mm is characterized by a more homogeneous structure. The introduction of a superplasticizer causes the formation of a dense, mixed structure of the cement stone, which causes the reduced water absorption and maximum compressive strength. Such a structure of cement stone can be the basis for obtaining high-strength concrete, provided that the optimum ratio between the components, dense filler frame and maximum sealing is ensured.

It was established that increasing the dispersion of granite dust makes the concrete mixture more viscous and therefore significantly reduces its stratification. Along with this, such increased viscosity causes a much faster loss of "viability" of the mixture. It is proved that due to the introduction of superplasticizer and dust fraction ≤ 0.16 mm, the loss of fluidity for 2 hours is insignificant, due to the deceleration of the processes of initial structuring.

A complex of experimental-statistical models that determine the influence of technological factors on the basic properties of concrete mixtures, the plasticization and water-reducing effect of additives of superplasticizers is obtained. It is shown the possibility of a rational combination of polycarboxylate type superplasticizers with plasticizers of other types and the creation of effective complex additives, which are characterized high plasticizers and water-reducing effects.

The mathematical models of complex influence of plasticizers of various types on the strength of fine-grained concrete on granite deposits at different ages (12 hours, 1 day, 7 and 28 days) are obtained, which allow to design the composition of the complex additive according to the optimization criteria established. The calculated formulas for the selection of C/W at the design of the composition of the concrete mix with complex additives are developed and the coefficients of the strength equation for the various ratios of additives are determined.

The optimum grain composition of the depressions for fine-grained concrete of different classes for strength is determined. The obtained concrete was characterized by rather high values of bending strength (with some factor ratios of up to 12 MPa), which is due to the characteristics of fine-grained concrete, for which the ratio of

compressive strength to bending is usually higher than that of conventional concrete due to greater homogeneity. Also, increased bending strength can be due to the feature of granite depressions, which is characterized by the presence of grains needle shape and swarm form, which can exhibit some reinforcing effect.

The performed experimental studies have shown that if the polycarboxylate superplasticizer is introduced into the concrete mixture, the negative effect of the dusty fraction of withdrawal is compensated, which positively affects the basic properties of the concrete mixture and the strength of the concrete during compression, while acting microfiller. The established technological parameters allow to obtain with application of granite releases with an optimized granulometric composition and when introducing an additive of superplasticizer concrete with a strength of 60...65 MPa.

An additional introduction of the aluminosilicate additive - metakacolin can increase the compressive strength at the age of 28 days to 70...75 MPa. The analysis of the corresponding quantitative dependences suggests that metakacolin, due to high dispersion and pozzolan activity, provides greater efficiency than granite dust. The increase of the strength of fine-grained concrete at the expense of metakaolin is (35-38)%, which is consistent with known data. As for the dusty fraction of withdrawal, the effectiveness of metakolin injection significantly increases with superplasticizer administration, although an increase in strength to (8...10%) is observed for unplasticized mixtures.

It was established that the maximum reduction of the open porosity of fine-grained concrete provides the introduction of a superconductor supplement of 0.5...1% of the weight of the cement. Increasing the content of the fraction of less than 0.16 mm, provided that the use of superplasticizer is compatible, reduces water absorption by 40 ... 50%.

It was established that for fine-grained concrete on granite siftings, the average size of open capillary pores (λ) is within the range of 0.21-0.81, the index of homogeneity of open capillary pores (α) is 0.19-0.76. An increase in the content of a drop fraction of less than 0.16 mm reduces the index λ from 0.7 to 0.49, the introduction of superplasticizer supplements to 0.38. In this case, the index of homogeneity of pores varies in the range from 0,3 to 0,41.

It is proved that reduction of pore sizes and increase of their homogeneity due to an increase in the number of dust particles in the presence of superplasticizer content of 0,5...1% contributes to increasing the frost resistance to 500...550 cycles. The investigated concrete can be classified as elevated (F100 ... F200) and high (F400 ... F500) frost resistance classes. The increase of the fraction less than 0.16 mm in the offsets without the superplasticizer due to increased water consumption of the concrete

mixture and, accordingly, the open porosity and pore size causes a decrease in water proof from W6 to W2. In the presence of an amount of 0.5-1% additive, water proof increases to W8-W10.

The method of designing the composition of high-strength fine-grained concrete on granite siftings is developed, which allows determining the relationship between the components and the required content of additives, taking into account the required compressive strength, the fraction content is less than 0.16 mm in the compartments.

The nomograms of frost resistance and waterproofness of high-strength fine-grained concrete on granite siftings have been constructed, allowing additionally to take into account these parameters when designing the composition of concrete.

The proposed technological parameters for obtaining high-strength fine-grained concrete with the use of granite siftings with an increased content of particles ≤ 0.16 mm are confirmed by the release of a experimental-industrial party.

Keywords: high-strength fine-grained concrete, granite siftings, frost resistance, waterproofing, superplasticizer.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	13
ВСТУП	14
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ. ОБГРУНТУВАННЯ НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	19
1.1. Основні аспекти отримання високоміцних бетонів	19
1.2. Використання відходів каменеподрібнення у цементних бетонах.....	25
1.3. Роль активних мінеральних наповнювачів у процесах структуроутворення цементного каменю.....	30
1.4. Наукова гіпотеза і обґрунтування напрямків дослідження.....	37
РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	39
2.1. Характеристика компонентів, що були використані в дослідженнях ..	39
2.1. Характеристика методів випробувань	57
2.1.1 Визначення властивостей бетонних сумішей бетону	57
2.1.2 Методологія досліджень із застосуванням методики планування експерименту	59
Висновки до розділу	62
РОЗДІЛ 3. ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМЕНЮ, НАПОВНЕНОГО ДИСПЕРСНИМИ КАМ'ЯНИМИ ЧАСТИНКАМИ.....	64
3.1. Вивчення кінетики зміни реологічних властивостей цементних паст з дисперсним гранітним наповнювачем.....	64
3.2. Дослідження структуроутворення цементного каменю з дисперсним гранітним наповнювачем	76
3.3. Особливості гідратації та формування порової структури цементного каменю з гранітним наповнювачем.....	79
Висновки до розділу	87
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІДХОДІВ КАМЕНЕПОДРІБНЕННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ	89
4.1. Вплив відходів каменеподрібнення на характеристики бетонних сумішей	89
4.2. Вплив різних видів добавок-пластифікаторів на властивості бетонних сумішей, що містять відходи каменеподрібнення.....	94
Висновки до розділу	100

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОТРИМАННЯ ВИСОКОМІЦНОГО ДРІБНОЗЕРНИСТОГО БЕТОНУ З ВІДХОДАМИ КАМЕНЕПОДРІБНЕННЯ.....	102
5.1. Міцність дрібнозернистого бетону на відсівах подрібнення граніту.	102
5.3. Оптимізація технологічних параметрів отримання дрібнозернистого бетону підвищеної міцності	117
5.4. Міцність дрібнозернистого бетону з комплексними добавками	126
Висновки до розділу	132
РОЗДІЛ 6. ДОВГОВІЧНІСТЬ ВИСОКОМІЦНИХ ДРІБНОЗЕРНИСТИХ БЕТОНІВ З КАМ'ЯНИМИ ВІДСІВАМИ ТА ПРОЕКТУВАННЯ ЇХ СКЛАДІВ	134
6.1. Властивості дрібнозернистого бетону, що визначають довговічність	134
6.2. Проектування складу високоміцного дрібнозернистого бетону	141
Висновки до розділу	148
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	149
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	152
ДОДАТКИ.....	166

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВДЗБ – високоміцний дрібнозернистий бетон;

СП – суперпластифікатор;

η – вібров'язкість;

$S_{\text{пит}}$ – питома поверхня частинок;

ДР – діаметр розпливу тіста;

Н – наповнювач;

ГН – гранітний наповнювач;

АП – аспіраційний пил;

W_{τ} – водопоглинання зразка за τ годин;

m_n – вміст фракції відсіву $\leq 0,16$;

$K_{н.г}$ – нормальна густина цементу;

ΔOK – зміна рухомості бетонної суміші в часі;

$tg\phi$ – показник кута внутрішнього тертя;

ОК – осадка конуса;

D_p – розпливу стандартного конусу;

ПЕ – пластифікуючий ефект;

ВРЕ – водоредукуючий ефект;

f_{cm} – міцність бетону при стиску;

$f_{c.tf}$ – міцність бетону при згині;

$M_{кр}$ – модуль крупності;

P_v – відкрита пористість;

λ – показник середнього розміру відкритих пор;

α – показник однорідності розмірів пор;

$K_{ц.е.}$ – коефіцієнт цементуючої ефективності мінерального наповнювача.

ВСТУП

Використання відходів різних виробництв є досить важливим шляхом економії матеріальних і енергетичних ресурсів у виробництві цементних бетонів та розчинів. Серед цих відходів важливе місце займають відходи підприємств нерудних матеріалів, котрі виробляють заповнювачі для бетону та інші природні кам'яні матеріали.

В процесі переробки гірських порід утворюється величезна кількість відходів (відсівів подрібнення). За існуючими даними при виготовленні щебеню утворюється від 18 до 25 % відсіву від маси гірської породи, що переробляється. Крім того, останнім часом суттєво збільшився попит на так званий «кубовидний» щебінь при отриманні якого вихід відсівів може досягати 30 – 36 % і більше в залежності від структурно-текстурних особливостей порід. Обсяги відсівів вивержених гірських порід за рахунок виробництва щебеню покращеної форми зерен, що користується сьогодні підвищеним попитом, постійно зростають. Збільшення кількості відходів призводить до утворення відвалів, які займають значні площі сільськогосподарських угідь, а також до забруднення повітряного і водного середовища.

Разом з тим будівельна галузь відчуває гостру необхідність в кондиціонованих заповнювачах. Зокрема в західному регіоні України піски для бетонів і розчинів переважно дрібні, що викликає значну перевитрату цементу. Використання відсівів у бетонах значно обмежене через високий вміст дисперсних частинок, що викликає значну перевитрату цементу.

Останнім часом, з розвитком ефективних суперпластифікаторів з високим водоредукуючим ефектом з'явилась можливість суттєвого зниження водовмісту бетонних сумішей, в таких умовах можна очікувати менш помітного впливу пилюватих частинок відсівів, а також можливість отримання на їх основі високоміцних бетонів, яких потребує будівельна галузь.

Обґрунтування вибору теми. Підприємствами з добування та переробки гірських порід у відвалах в регіоні накопичено мільйони тонн відходів, зберігання яких потребує значних площ, викликає забруднення навколишнього середовища. Утилізація відходів дозволить звільнити та рекультивувати земельні угіддя, зайняті під відвали техногенних продуктів, суттєво поліпшить екологічну обстановку. Однак існуючі методи утилізації вказаних відходів в будівельні матеріали та вироби часто не дозволяють отримати продукцію з нормованими показниками якості.

Досить мало уваги в науковій літературі приділено питанням отримання високоміцних дрібнозернистих бетонів, що передбачають використання відсівів подрібнення вивержених гірських порід як основного заповнювача.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, що викладені в даній роботі були виконані відповідності до науково-дослідної тем №ДР 0115U003047 «Ефективні цементні бетони і розчини з використанням відходів каменеподрібнення», №ДР0116U003759 «Високоміцні швидкотверднучі бетони і фібробетони та конструкції на їх основі для фортифікаційних споруд», а також теми № ДР0114U001141 «Застосування техногенних відходів промисловості (цементного пилу, золи-виносу ТЕС, відходів каменеподрібнення) для виготовлення ефективних будівельних матеріалів: в'язучих, сухих будівельних сумішей, бетонів і розчинів».

Мета і завдання дослідження. Мета даної роботи – розробити оптимальні технологічні параметри виготовлення високоміцних дрібнозернистих бетонів з використанням в якості основного заповнювача відсівів подрібнення граніту, на основі встановлених закономірностей, що пов'язують властивості бетонної суміші та бетону з технологічними факторами.

Щоб досягти поставленої мети, слід вирішити наступні задачі:

1. Вивчити особливості гранулометричного, хімічного та петрографічного складу найбільш розповсюджених видів відсівів вивержених порід.
2. Дослідити вплив дисперсного гранітного наповнювача на реологічні властивості цементних паст та процеси гідратації та структуроутворення наповненого цементного каменю.
3. Дослідити вплив добавок-пластифікаторів різних видів та дисперсних частинок гранітних відсівів на властивості дрібнозернистих бетонних сумішей високої рухомості та бетонів на їх основі.
4. Встановити вплив гранулометричного складу відсівів подрібнення граніту на властивості дрібнозернистого бетону.
5. Дослідити технологічні параметри забезпечення високої міцності дрібнозернистих бетонів на гранітних відсівах.
6. Вивчити властивості, що визначають довговічність високоміцних дрібнозернистих бетонів на гранітних відсівах
7. Розробити методику проектування складів дрібнозернистих високоміцних бетонів на гранітних відсівах з комплексом заданих властивостей.
8. Виконати виробничу перевірку розроблених технологій.

Об'єкт досліджень: цементне тісто та цементний камінь з дисперсним гранітним наповнювачем, бетонні суміші на основі відсіву подрібнення граніту та дрібнозернисті бетон, виготовлений на їх основі.

Предмет досліджень: властивості цементного тіста та особливості гідратації та формування структури цементного каменю з дисперсним гранітним наповнювачем, бетонних сумішей на основі відсіву подрібнення граніту та дрібнозернистого бетону на їх основі залежно від технологічних факторів.

Методи досліджень: характеристики відсівів подрібнення та їх дисперсної складової визначались з використанням петрографічного, рентген-фазового, хімічного та седиментаційного аналізу. Процеси гідратації та формування структури цементного каменю досліджувались із використанням методів встановлення кінетики проходження електричного струму та ультразвукових хвиль, хімічного визначення кількості зв'язаної води. Параметри порової структури визначались за допомогою методу водопоглинання та мікроскопічного аналізу. Основні дослідження та отримання багатофакторних залежностей здійснювалось із застосуванням методів математичного планування експерименту. Будівельно-технічні властивості дрібнозернистих бетонів вивчались за допомогою стандартних методик.

Наукова новизна отриманих результатів. Обґрунтовано та доведено гіпотезу про можливість створення технологічних умов, при яких незбагачені кам'яні відсівы з підвищеним вмістом пилюватих частинок можуть використовуватись як заповнювач у широкому діапазоні класів за міцністю при достатньо високій рухомості бетонної суміші.

Встановлено позитивний вплив дисперсних частинок гранітних відсівів на кінетику структуроутворення і степінь гідратації цементного каменю в умовах дії добавок-суперпластифікаторів з підвищеним водоредукуючим ефектом, а також будівельно-технічні властивості дрібнозернистого бетону.

Встановлено оптимальну кількість, дисперсність частинок гранітних відсівів, а також кількість та вид добавок, що забезпечують отримання дрібнозернистих бетонів класів за міцністю до В60 та покращеними іншими будівельно-технічними властивостями.

Отримано комплекс кількісних залежностей, що дозволили прогнозувати ефективність застосування відсівів з різним вмістом пилюватих частинок та їх дисперсністю залежно від вимог до бетонів, виду пластифікуючих та активних мінеральних добавок.

Встановлено умови раціонального поєднання суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу з пластифікуючими добавками інших видів і

створення ефективних комплексних добавок, що характеризуються високими пластифікуючим та водоредукуючим ефектами. Отримано математичні моделі, що дозволяють виконувати оптимізацію складів комплексних добавок та знаходити основні параметри складів бетонних сумішей з їх застосуванням.

Практичне значення отриманих результатів.

Розроблено технологічні параметри виготовлення високоміцних дрібнозернистих бетонів із застосуванням кам'яних відсівів в якості основного заповнювача.

Встановлено оптимальний зерновий склад відсівів подрібнення за рахунок зміни співвідношення основних фракцій, а також додаткового введення кондиційних пісків, що дозволяє забезпечити максимальну щільність заповнювача і забезпечити максимальну міцність бетону.

Розроблена методологія проектування складів високоміцного дрібнозернистого бетону із застосуванням незбагачених відсівів як заповнювача з використанням експериментально-статистичних моделей, що дозволяє забезпечувати комплекс нормованих властивостей.

Технологія виготовлення високоміцного дрібнозернистого бетону із застосуванням відсівів подрібнення впроваджена на підприємствах ППФ «ТОРГБУДСЕРВІС» торгової марки «Інтербетон» та ПП «Славутський БРЗ» при виробництві товарного бетону.

Економічний ефект від впровадження розробленої технології склав в середньому близько 290 грн. на 1 м^3 бетону.

Особистий внесок здобувача. Запропоновано робочу гіпотезу, котра полягає в тому, що при умові забезпечення низьких В/Ц у дрібнозернистому бетоні, що можливо за рахунок використання суперпластифікаторів з високим водоредукуючим ефектом, дисперсні частинки, що містяться у відсівах подрібнення граніту, будуть сприяти направленому структуроутворенню твердіючого цементного каменю. Оптимізація складу дрібнозернистого бетону, що містить наповнене дисперсними гранітними частинками цементне тісто та гранітні відсівы з оптимізованим гранулометричним складом дозволить отримати бетон з підвищеною міцністю при раціональних витратах кондиційних матеріалів.

Виконано експериментальні дослідження, проведено теоретичний аналіз отриманих результатів, виконані необхідні технологічні обґрунтування.

Розроблено технологію виготовлення високоміцного дрібнозернистого бетону на основі гранітного відсіву і впроваджено її у виробництво.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на наукових і науково-практичних конференціях та семінарах: VI Міжнародна науково-практична конференція «Ефективні організаційно-технологічні рішення та енергозберігаючі технології в будівництві», Харківський національний університет будівництва та архітектури. (Харків 2016); X Міжнародна науково-технічна Web-конференція «Композиційні матеріали», Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ 2017); I Міжнародна науково-практична конференції «Інноваційні технології в архітектурі і дизайні», Харківський національний університет будівництва та архітектури. Харків 2017; науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Національного університету водного господарства та природокористування (Рівне, 2015-2018 рр.).

У повному обсязі дисертаційна робота доповідалася на розширеному науковому семінарі кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства НУВГП (2018 р.), а також на міжкафедральному науковому семінарі з будівельних матеріалів та виробів НУВГП (2019 р.).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи були викладені в 12 друкованих працях, з них 5 статей у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у закордонних виданнях, 3 публікацій в матеріалах вітчизняних та міжнародних конференцій, 1 деклараційний патент на корисну модель, 2 монографії.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із (182 найменування) і 5 додатків. Загальний об'єм дисертації 177 сторінок, в тому числі 133 сторінки основного тексту, 37 таблиць, 60 рисунків і 10 сторінок додатків.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ.

ОБГРУНТУВАННЯ НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Основні аспекти отримання високоміцних бетонів

Бетон є основним конструкційним матеріалом сучасного будівництва і має багато переваг порівняно із іншими видами будівельних матеріалів. Саме тому питання отримання бетону з підвищеними міцнісними характеристиками та довговічністю цікавило багатьох дослідників [1-8]. До високоміцних, зазвичай, відносять бетони з міцністю при стиску не менше 50...100 МПа. Однак, найбільш розповсюдженими в будівництві є високоміцні бетони класів В40...В60.

У 1986 р світовим науковим співтовариством вперше була сформульована концепція функціональних, високоякісних бетонів (High Performance Concrete, HPC) . Під такими бетонами розуміють бетони, відповідні спеціальним вимогам до функціональності і універсальності. За оцінками багатьох дослідників, прогнозований термін служби HPC досягає 500 років.

В даний час вимоги до високофункціональних бетонів, серед яких висока міцність, включаючи високу ранню міцність, стабільність об'єму, високий опір стираючим зусиллям, низька водопроникність, висока хімічна стійкість, морозостійкість, бактерицидність, фунгіцидність та інші характеристики, у багатьох країнах світу введені до національних нормативних документів. Вимоги до таких бетонів стандартизовані провідними спеціалізованими міжнародними організаціями, такими як ACI RILEM, ASCE.

Згідно уявлень, описаних в роботі [4] HPC визначається як інженерний матеріал, в якому одне або більше його специфічних властивостей поліпшені шляхом обґрунтованого підбору компонентів, проектування складу, а також ретельного догляду за бетоном після твердіння. Інша відносно нове визначення HPC - матеріал, що відповідає не звичайним стандартам, а найвищим з встановлених стандартів, які не обмежуються, наприклад, тільки високою міцністю, так як не всі високоміцні бетони є функціональними. При цьому на будь-якому етапі приготування, транспортування, укладання, твердіння, догляду та експлуатації повинні досягатися найвищі показники функціональності і технологічності. Природно, що це важко або неможливо досягти традиційними шляхами.

Використання високоміцних бетонів дозволяє отримати наступні переваги: більш висока початкова міцність, рання розпалубка і попереднє обтиснення, що

забезпечує можливість більш ранньої експлуатації виробу; зменшення товщини або збільшення несучої здатності конструкцій, що працюють на вигин; скорочення витрати бетону та арматури і, відповідно, транспортувальної і монтажної маси елементів; більш висока щільність, водо- і газонепроникність за рахунок низької частки капілярних пор; підвищена зносо- та корозійна стійкість, захист арматури за рахунок повільного поширення карбонізації; підвищена стійкість до хімічно активних речовин; зниження витрат на опалубку [2]. При виготовленні несучих конструкцій з бетону класу В60 замість бетону В30 витрату його зменшується на 26...29 % [1]. При цьому зростає несуча здатність конструкцій.

У багатоповерхових будівлях за рахунок використання високоміцних бетонів стає можливим зменшення перерізу колон без зміни перерізу арматури. При підвищенні класу бетону від В25 до В45 витрата сталі зменшується в середньому на 240 кг на 1 м³ [2].

Для виготовлення високоміцних бетонів необхідно забезпечити створення максимально щільної і міцної структури бетону. Основними шляхами підвищення даних показників є зниження водопотреби бетонної суміші і низького водоцементного відношення ($V/C=0,25...0,4$) за рахунок використання ефективних суперпластифікаторів і комплексних добавок чи інтенсивних методів ущільнення, що забезпечують щільну структуру бетону, застосування чистих високоміцних фракціонованих заповнювачів, високоактивних в'язучих речовин і мікронаповнювачів, ретельного і інтенсивного перемішування і ущільнення бетонної суміші [9]. Важливим також є забезпечення строгого контролю виробництва на всіх стадіях технологічного процесу.

Низьке значення водоцементного відношення є основним чинником, котрий відрізняє високоміцний бетон від звичайного. Р.Фере вперше в 1892 р запропонував залежність міцності бетону від параметра, пропорційного відносної щільності цементного тіста в бетонній суміші (критерій Фере) [10]:

$$R_{\sigma} = k \left(\frac{V_u}{V_u + V_v + V_{vx}} \right)^2, \quad (1.1)$$

де V_u , V_v , V_{vx} – абсолютні об'єми цементу, води і повітря; k - коефіцієнт, залежить від якості цементу, тривалості та режиму твердіння. За Пауерсом міцність при стиску зразків різного віку з цементного каменю, виготовлених при різному водоцементному відношенні, що тверділи в нормальних температурних умовах, відповідає емпіричному рівнянню:

$$R = AX_{ц.к}^n, \quad (1.2)$$

де $X_{ц.к}$ – відношення об'єму цементного гелю до суми об'ємів гелю і капілярного простору; A - коефіцієнт, що характеризує міцність цементного гелю; n - константа, яка залежно від характеристики цементу складає від 2,6 до 3.

Правило (закон) водоцементного відносини було сформульовано вперше Д. Абрамсом, який стверджував, що міцність бетону, приготовленого на одних і тих же вихідних матеріалах, не залежить від складу бетонної суміші і визначається лише водоцементним відношенням [1].

Залежність міцності бетону від В/Ц або Ц/В, яка має вирішальне значення для розрахунку складів бетону, доцільніше розглядати не як якийсь самостійний закон міцності, а як наслідок або правило, що з універсальної фізичної залежності міцності твердих матеріалів від їх відносної щільності або пористості. Аналіз відомих емпіричних формул [11, 12] показує, що в найбільш загальному вигляді для твердих тіл цю залежність можна виразити степеневою функцією:

$$R_{cm} = R_0(1 - P^0)^n, \quad (1.3)$$

де P^0 – пористість; n – показник степеня, що враховує особливості структури матеріалів; R_0 - міцність безпорового матеріалу.

Залежність міцності бетону від Ц/В строго дотримується лише за інших "рівних умовах". Багато досліджень показали вплив на міцність поряд з Ц/В легкоукладальності бетонної суміші, об'ємної концентрації цементного каменю і ряду інших факторів. Склади з великою витратою цементу при тих же значеннях В/Ц характеризуються, як правило, меншою міцністю і навпаки, більш "пісні", але досить ущільнені бетони мають підвищену міцність. Важливу роль відіграють також крупність, водопоглинання, характер поверхні заповнювачів, час з моменту їх дроблення і інші фактори [12].

За даними [1], високоміцні бетони відрізняються від звичайних лише зниженими значеннями В/Ц і підвищеною витратою цементу, причому слід враховувати, що залежності, які розроблені для звичайних бетонів у випадку дуже низьких В/Ц порушуються [11, 12]. Це стосується коефіцієнтів у рівняннях типу (1.1-1.3), а також порушення правила постійності водопотреби при підвищених витратах цементу.

Одержання високої міцності вимагає підвищених витрат цементу, однак збільшення його кількості більше 550...600 кг/м³ економічно недоцільно [7, 11],

так як внаслідок значного підвищення водопотреби мало відображається на міцності.

На думку деяких вчених [13] найбільш дієвий спосіб зниження необхідних витрат цементу при отримання високоміцних бетонів це максимальне підвищення жорсткості бетонної суміші за рахунок зниження вмісту води. Однак застосування такого методу обмежене конфігурацією і особливостями армування виробу, що бетонується, а також ефективністю існуючих методів ущільнення.

При цьому для забезпечення потрібної міцності і щільності бетону, необхідно застосовувати силові методи ущільнення [14, 15]. Через необхідність спеціального обладнання для здійснення формування виробів (пресування, вібропресування, центрифугування, вакуумування тощо), використання наджорстких сумішей було обмеженим, але, з розвитком формувальної техніки, такий шлях економії цементу є дуже перспективним. З наведених методів формування жорстких сумішей на особливу увагу заслуговують пресування та вібропресування, які забезпечують необхідне ущільнення бетонних сумішей при порівняльній простоті формувальних установок [16, 17].

Застосування наджорстких сумішей пов'язане з додатковими витратами енергії на перемішування та вкладання, – формування з них виробів вібропресуванням (особливо дрібноштучних (стінові блоки, черепиця, дорожні вироби)) має переваги над виготовленням бетону з рухомих і литих сумішей вібруванням, які полягають в можливості розпалубки виробів одразу ж після формування [13]. Крім цього, при раціонально підбраному складі бетону та параметрах ущільнення (тиск 50...100 МПа) вироби мають резерв міцності до 200 МПа, при умові подолання сил відштовхування між частинками цементу [18].

Для виготовлення бетонних та залізобетонних виробів безпосередньо на будівельному майданчику використання жорстких та наджорстких бетонних сумішей неможливе, тут значну розповсюдженість знаходять рухомі, високо рухомі та литі суміші. Для отримання литих і високорухомих бетонних сумішей з низькими значеннями В/Ц та обмеженим вмістом цементу необхідне використання вискоефективних розріджувачів [3].

Введення суперпластифікаторів є ефективним способом одержання бетонів високої міцності, що дозволяє при незмінній рухливості бетонної суміші збільшити міцність на 50...60%. Величина приросту міцності залежить від вихідного водоцементного відношення і рухомості суміші. Можливе зниження

витрати цементу при підвищенні вмісту суперпластифікаторів складає 15...25 % [1].

Враховуючи те, що активність цементів, що виготовляються промисловістю, а також якість заповнювачів за останні роки практично змінилась несуттєво, основний резерв, що дозволяє отримати високорухливі бетонні суміші з підвищеною міцністю – це зниження водовмісту за рахунок добавок супер- та гіперпластифікаторів. Такі добавки [7] використовуються промисловістю будівельних матеріалів досить давно, однак з підвищенням їх ефективності та нових напрямків використання відкриваються широкі перспективи щодо отримання високоміцних бетонів.

При виготовленні високоміцних бетонів до суперпластифікаторів пред'являються особливо жорсткі вимоги, які полягають в їх високій реологічній активності і мінімальному впливі на здатність мінералів цементного клінкеру до гідратації на початковій фазі твердіння. В якості суперпластифікаторів найбільш широко використовуються сполуки наступних видів: модифіковані лігносульфанат, сульфовані меламінформальдегідні смоли, продукти конденсації нафталінсульфоїкислоти формальдегіду [19].

Суперпластифікатори дозволили отримати новий вид литого бетону і забезпечити зменшення водопотреби бетонної суміші на 20..30%, що приблизно в два рази вище ніж при використанні традиційних пластифікаторів [5, 20]. За механізмом дії більшість суперпластифікаторів можна віднести до другої і третьої груп ПАР за класифікацією П.О. Ребиндера [21]. Загальним для всіх ПАР є здатність до пептизації (дефлокуляції) агрегованих флокул цементу. Розрідження цементного тіста, а тому і збільшення рухомості бетонної суміші відбувається за рахунок звільнення води, котра іммобілізована (затиснена) у флокулах. В порівнянні з традиційними пластифікаторами, наприклад, лігносульфатного типу, суперпластифікатори мають більшу довжину вуглецевого ланцюга і відповідно більшу адсорбційну здатність [22, 23]. Значний вплив на механізм дії суперпластифікаторів в бетонних сумішах мають колоїдно-хімічні явища на границі розділення фаз [24, 25, 26].

Роль суперпластифікатора зводиться до того, що внаслідок адсорбції ПАР частинки твердої фази отримують однойменний заряд, що призводить до їх відштовхування, полегшення взаємного переміщення і погіршення коагуляції.

У відповідності із сучасними теоретичними уявленнями [26, 27] пластифікація бетонної суміші збільшується із збільшенням молекулярної маси радикала в ланцюзі олігомерів і підвищенням ступеня гідрофільності функціонально-активних груп в них. Суперпластифікатори, так як і більшість

інших ПАР, краще пластифікують бетонні суміші на низькоалюмінатних цементах, що пояснюється високодисперсною коагуляційною структурою гідроалюмінатних новоутворень, які поглинають велику кількість добавки [31]. Відносячись до класу гідрофілізуючих ПАР, суперпластифікатори краще пластифікують суміші з підвищеним вмістом цементного тіста [32].

Можна вважати встановленим [32], що при оптимальному дозуванні нафталінових і мелаїнових суперпластифікаторів і незмінних значеннях В/Ц міцність не знижується, або спостерігається деяке підвищення міцності бетону при стиску, особливо в пізньому віці. При цьому добавки суперпластифікатори практично не знижують границю міцності при розтягу та згині [20]. При рівній рухливості бетони з суперпластифікатором С-3 в результаті зменшення В/Ц мають міцність в 28 діб на 30..50% вище ніж бетони без добавки.

Однак застосування суперпластифікаторів нафталін-формальдегідного типу пов'язане з рядом негативних моментів [1]. Вони потребують підвищених дозувань, бетонні суміші з використанням таких суперпластифікаторів швидко втрачають рухомість, рання міцність бетону на їх основі може знижуватись. Для таких суперпластифікаторів характерне недостатньо контрольоване повітровтягування, яке в деяких випадках може забезпечити підвищення морозостійкості, зменшуючи міцність. Тому перспективним є застосування при виробництві сучасних цементів та бетонів суперпластифікаторів нового покоління, в механізмі дії яких переважає не електростатичний, а стеричний ефект (зменшення тертя між частинками).

Нові добавки отримали назву «полікарбоксилати» і відповідну аббревіатуру РС. Ця назва підкреслює спільність їх основи: полімерний ланцюг, утворений α, β -ненасиченими карбоновими кислотами, а всі вторинні ознаки (співвідношення між кислотними і складноєфірними групами, наявність або відсутність додаткових функціональних груп) лише визначають ступінь відмінності в хімічному складі і обумовлюють відмінності в технологічних ефектах.

Основними позитивними якостями нових добавок є високий водоредукуючий ефект (30 % і вище), здатність проявляти пластифікуючий ефект при низьких і наднизьких водоцементних відношеннях і низькі робочі дозування (0,2...0,4%). Для полікарбоксилатів характерне підвищене повітровтягування (5 % і більше), яке можна регулювати введенням піногасників або повітрягасячих добавок.

Деякі автори [33, 34], втім, відзначають, що недоліком нових суперпластифікаторів є те, що ефективність їх розріджуючої дії залежить від вмісту C_3A в цементі, а також від природи сульфату кальцію (співвідношення

гіпс : напівгідрат : ангідрит) - чим вища алюмінатність цементу, тим більшою мірою початкова рухомість бетонних та розчинових сумішей залежить від швидкості розчинення сульфату кальцію.

Для одержання підвищеної густини і міцності витрати цементу у високоміцних бетонах обмежують: для виробів малих і середніх розмірів – не більше 550 кг/м³; для масивних і монолітних конструкцій – не більше 450 кг/м³. В усіх випадках зниження витрати цементу у високоміцних бетонах сприяє одержанню більш щільної, довговічної і менш дефектної структури.

Сприяє підвищенню міцності бетону насичення його крупним заповнювачем шляхом підбору оптимального зернового складу і зменшення кількості піску. Для забезпечення адгезії цементного тіста до заповнювачів важливо не допускати в них пилоподібних і інших шкідливих включень.

1.2. Використання відходів каменеподрібнення у цементних бетонах

Використання в якості заповнювача цементних бетонів відходів переробки гірських порід на щебінь (відсівів) мало практикується через наявність у їх гранулометричному складі значної кількості (до 20 %) пиловатих частинок, які підвищують водопотребу бетонної суміші. Навіть при видаленні цих частинок, відсівів не можуть бути використані для отримання звичайним способом якісних бетонів через високий вміст лещадних та голчатих зерен [35, 36] та відсутності зерен середніх фракцій (0,63...0,315 мм) [37]. Через це вони здебільшого використовуються як добавка у дрібні піски [38], а також в дорожньому будівництві – як заповнювач асфальтових бетонів та як матеріал для влаштування основ дорожніх покриттів [39, 40].

На окремих підприємствах за допомогою спеціалізованих комплексів проводиться класифікація відсівів за фракціями. Однак ця технологія є досить енергоємною. В даний час актуальним є завдання комплексного вивчення відсівів подрібнення різних порід із метою широкого їх застосування в будівництві.

Основними споживачами на даний момент є дорожньо-будівельні організації. Застосування відсівів подрібнення в дорожньому будівництві відображено в ряді діючих нормативних документів [41, 42]. В основному відсівів подрібнення використовують для приготування асфальтобетонних сумішей, що дає можливість значно знизити вартість будівництва. Піски із відсівів подрібнення успішно застосовуються для будівництва автомобільних доріг в США, Німеччині та низці інших країн [43]. Крім того, відсівів подрібнення із вивержених гірських порід, можуть застосовуватися для приготування піщаних

сумішей, оброблених цементом і для пристрою дренажних та протиморозних шарів, а також як посипання при ожеледиці [44].

В даний час широкого значення набуває архітектурна виразність будівель і споруд, для забезпечення якої широко використовується декоративний бетон та інші види оздоблювальних матеріалів. Заповнювачами для них є спеціально виготовлені декоративні щебінь і пісок із природного каменю, а останнім часом і відсів подрібнення щебеню, які застосовуються зі звичайними і кольоровими цементами.

Для зовнішнього і внутрішнього облицювання будівель і споруд застосовуються плити декоративні з використанням відсівів подрібнення гірських порід на неорганічному або синтетичному в'язучому. Такі матеріали характеризуються високими механічними, експлуатаційними та декоративними властивостями, а їх виробництво не вимагає складного обладнання та значних витрат електроенергії [45-47]. Відсів подрібнення різної крупності також застосовують для обробки стінових панелей різними способами. На думку ряду авторів, перспективним видом заводської обробки панелей є створення на поверхні бетонних і неавтоклавних виробів захисно-декоративного шару з відсівів подрібнення гранітів, мармурів. Для цих цілей пропонуються різні способи обробки поверхні, в тому числі обробка низькотемпературною плазмою, а також кремнійорганічними рідинами [48].

Останнім часом широкого застосування набули навісні вентилязовані фасадні системи на основі матеріалів закордонних і вітчизняних виробників [49, 50]. Варто відзначити розробки в цьому напрямку із застосуванням відсівів подрібнення щебеню з граніту, габро, пегматиту, зміїовика та інших видів гірських порід [51, 52].

Дослідження мозаїчних і брекчія подібних підлог на цементному в'язучому, де в якості наповнювачів застосовували відсів подрібнення граніту та інших вивержених порід, свідчать про підвищення міцності готових виробів. Крім того, введення відсівів покращує декоративні властивості, шліфування і зносостійкість підлог. У ряді випадків застосування відсівів подрібнення також підвищує хімічну стійкість покриття підлоги промислових будівель до агресивних середовищ [53-55].

У будівельній практиці все більшого застосування набувають сухі будівельні суміші (СБС) [56], традиційним заповнювачем для яких є кварцовий пісок. Однак відсутність у ряді регіонів місцевої сировинної бази змушує виробників використовувати місцеву сировину, в тому числі піски з відсів подрібнення щебеню. Так для ґрунтуючих, вирівнюючих, захисно-

оздоблювальних і декоративних СБС, які застосовуються для зовнішніх і внутрішніх робіт у якості заповнювачів, у невеликих об'ємах, використовують відсівів подрібнення граніту, мармуру та інших гірських порід. Декоративні штукатурки з використанням відсівів, завдяки різним технологічним прийомам нанесення, допомагають створити оригінальну структуру поверхні. Крупність відсівів подрібнення залежно від товщини оздоблювального шару і шорсткості поверхні може бути наступною: 1,5 – 2 мм; 2 – 2,5 мм; 2,5 – 5 мм [57].

У сухих будівельних сумішах використовується відсівів із кварцових порід фракцій: 0 – 0,63 мм; 0,16 – 0,63 мм; 0,135 – 0,63 мм; 0,63 – 1,25 мм. Відсівів вивержених, осадових і метаморфічних порід застосовують при випуску тонкої і грубої кераміки, а також вогнетривких матеріалів. Перспективним є використання відсівів фракції 0,16 – 0,35 мм в бетонах [45]. Застосування відсіву щебеню у виробництві бетонів на думку ряду авторів [57] обмежується наступними чинниками: пластинчаста і голчастої форми зерен; високий вміст пилоподібних частинок (18 – 25 %).

За кордоном пісок із різних видів гірських порід успішно застосовується в різних СБС. У США розроблено склади з використанням подрібненої породи від 20 до 95 % від маси суміші [58]. У Німеччині запатентовані штукатурні склади СБС із використанням різних гірських порід, таких як граніт, базальт, крупність зерен яких від 0,2 до 2,5 мм, що дає можливість отримувати поверхні, які імітують різні гірські породи [59].

Відсівів вивержених і метаморфічних порід, що мають декоративний колір і текстуру, застосовують для виготовлення фасадних плит і наливних підлог.

Проведено дослідження з оцінки можливості використання пульпи від промивання граніту в якості кремнеземистого компонента в пористих і щільних бетонах автоклавного твердіння. При виробництві силікатної цегли заміна гранітними відсівами 30 % піску дає можливість підвищити характеристики міцності сирцю і готових виробів. Доведено можливість підвищення міцності на стиск і морозостійкості ніздрюватих бетонів при використанні в якості кремнеземистої сировини суміші відсівів подрібнення граніту і 20 – 30 % кварцового піску [60].

У вітчизняних і закордонних літературних джерелах описані дослідження спеціальних видів бетонів із використанням відсівів подрібнення, з яких відомо, що застосування відсівів подрібнення гранітного щебеню у сталевібробетон підвищує міцність на розтяг при згині на 4 – 5 % [61]. Також підтверджується перспективність поєднання металевих матриць із наповнювачами з відсівів подрібнення різних гірських порід. Канадськими вченими отримані хороші

результати за показником водонепроникності при вивченні властивостей бетонів на суміші відсівів подрібнення і піску в співвідношенні від 95: 5 до 80:20 [62].

Виконані також цікаві дослідження з комбінації відсівів подрібнення з іншими видами відходів та застосування їх в бетонах, розроблені склади бетонів, де в якості в'язучого застосовували відходи сірчаного виробництва, а заповнювача – відсиви подрібнення базальту та діабазу [63].

Використання пісків із відсівів подрібнення передбачено ДСТУ Б В.2.7-210:2010 «Пісок із відсівів подрібнення вивержених гірських порід для будівельних робіт» [64]. У бетонах різного призначення відсиви, велика частина яких відноситься до крупних і дуже крупних пісків (із модулем крупності $M_{кр} =$ більше 2,5 до 3,2 – 3,6), застосовуються як укрупнююча добавка до природних дрібних і дуже дрібних пісків. Така укрупнююча добавка дає можливість замінити до 50 % піску відсівами подрібнення і знизити витрату в'язучого на 15 – 20 % [51].

Перешкодою для широкого використання відсівів подрібнення є перш за все велика кількість частинок менше 0,16 мм, яка у вивержених гірських породах може досягати 25 %, в тому числі глинистих частинок, які визначаються методом відмулювання – до 12%, що тягне за собою збільшення водопотреби від 9 до 18 % і перевитрати цементу до 20 %, а також неправильна форма зерен і шорстка поверхня [51].

Згідно [64] за погодженням зі споживачем виробники піску з відсівів можуть постачати матеріал з підвищеним вмістом пилюватих і глинистих домішок. За умови, що дані домішки представлені більше пилюватими частинками вихідних гірських порід і не містять значної кількості глини, використання таких відсівів можливе, однак більш раціонально одночасно використовувати методи, що дозволяють нівелювати негативний вплив дисперсних частинок на водопотребу бетонної суміші.

Відсиви з підвищеним вмістом пилоподібних частинок (понад 10 %) спільно з комплексними пластифікуючими і повітровтягувальними добавками застосовують для отримання цементно-бетонних покриттів автомобільних доріг. При цьому забезпечується їх необхідна міцність і морозостійкість [65].

У відсівах подрібнення граніту фракції 0 – 10 мм міститься щебінь фракції 5 – 10 мм в кількості 12 % від маси, і фракції 2,5 – 5 мм – 9 %. Решта – пісок і пил.

На підприємствах організовується переробка відсівів з отриманням із нього фракції 2,5 – 10 мм. Частина, що залишилася фракція 0 – 2,5 мм практично не використовується. Отримані результати досліджень по використанню відсівів

подрібнення гірських порід у технології бетону. За даними авторів об'єм відсівів подрібнення, що утворюються після другої і третьої стадії подрібнення, досягає 20 – 25 % від об'єму гірської маси, що переробляється [66].

Зерна щебеню у відсівах подрібнення мають неправильну форму і шорстку поверхню, тому за рахунок великої кількості пустот мають високу водопотребу. З приводу впливу підвищеного вмісту частинок менше 0,16 мм у відсівах подрібнення на властивості бетонів єдиної думки не існує. Більшість дослідників сходяться на думці про негативний вплив цих частинок на властивості бетонних сумішей (підвищення водопотреби, зменшення легкоукладальності) [67]. Перспективним, на думку багатьох дослідників, є використання відсівів в якості дрібного заповнювача для бетонів після додаткової переробки – збагачення з виділенням частинок менше 0,16 мм, а в деяких випадках також частинок менше 0,315 мм. Однак також відзначено погіршення морозостійкості бетонів на митих відсівах подрібнення. За іншими даними міцність бетонів на відсівах подрібнення практично не відрізняється від міцності бетону на природному кварцовому піску [68].

В дисертаційній роботі Е.Н. Іполітова [69] відмічено інтенсифікацію процесів формування структури (збільшення критичної пластичної міцності, зростання швидкості структуроутворення) із введенням до складу ДЗБ кам'яної муки (відходу розпилювання граніту та мармуру та хвостів збагачення залізистих кварцитів). Разом з тим спостерігалось зниження контракції і збільшення кількості хімічно зв'язаної води та об'єму новоутворень. Помічено щільне проникнення часток наповнювача в масу гідросилікатів, завдяки механічному зчепленню з волокнистою поверхнею хвостів та пористою – зерен кам'яної муки.

Не дивлячись на це результати досліджень [70] вказують на можливість використання кам'яних відсівів в цементних бетонах. У даній роботі відмічено позитивний вплив відсіву кварцитового пісковіку на властивості бетону з пластифікатором, причому дрібні частинки (менше 0,16 мм), вміст яких складає 5...15%, виконують функції дрібнозернистого наповнювача порівняно низької водопотреби, що дозволяє знизити витрату цементу та підвищити міцність.

Також В.В. Житковським [71] встановлено позитивний вплив пилюватої фракції гранітного відсіву на кінетику структуроутворення вібропресованого бетону і степінь гідратації портландцементу в умовах недостатньої кількості води. Обґрунтовано закономірності розподілу води в бетонних сумішах для вібропресування, отримано і експериментально підтверджено розрахункову залежність для визначення їх оптимального водовмісту.

Підвищений вміст частинок менше 0,16 мм в ряді випадків може створювати позитивний вплив. Так відомо, що отримання в високорухомих сумішей і сумішей що не розшаровуються на відсівах подрібнення можливо лише при наявності підвищеної кількості дрібних фракцій [55], або введенням дрібних або дуже дрібних пісків.

Отримані склади бетонів марок С15 – С40 із пластифікуючими добавками на незбагачених відсівах подрібнення гранітів у суміші з дрібним піском в присутності пластифікатора витримали 500 циклів заморожування і відтавання без ознак руйнування і зниження маси за міцністю. Таким чином підвищена водопотреба може бути компенсована за рахунок застосування пластифікуючих добавок, тому без таких добавок застосування відсівів в бетон є не раціональним [73].

Як показали проведені дослідження, застосування комплексних пластифікуючих і повітровтягувальних добавок дає можливість ефективно застосовувати відсівів подрібнення із вмістом пилоподібних частинок до 10 % за масою в суміші з природним піском у дрібнозернистих бетонах. Використання відсівів подрібнення щебеню із вивержених гірських порід найбільш ефективно в бетонах, структури яких близькі до дрібнозернистих [74, 75].

На підставі наведених даних можна припустити, що високодисперсна фракція, яка міститься у відсівах щебеню, також може чинити позитивний вплив на структуру і властивості цементного каменю, виступаючи у ролі активного мікронаповнювача цементного каменю

1.3. Роль активних мінеральних наповнювачів у процесах структуроутворення цементного каменю

Доцільність введення наповнювачів в цементні композити значною мірою впливає з відомих уявлень, запропонованих В. М. Юнгом [76], про цементний камінь як "мікробетон", в якому роль матриці виконує гідратна фаза, отримана при хімічній взаємодії з водою зерен цементу менше 30 мкм, а роль наповнювача- більш крупні зерна цементу, які гідратуються лише з поверхні. При забезпеченні досить високої тонкості помелу клінкерної складової, виходячи з цієї концепції, частину зерен цементу можна замінити дисперсними матеріалами, в т.ч., які не вступають в хімічну взаємодію з водою. Вже в 1930 р П. П. Будніков і М. І. Некріч запропонували [77] менш "концентрований" цемент, вводячи в нього карбонатні добавки. Вони прийшли до висновку, що зазначені добавки в певній кількості (не менше 10%) не викликають різкого падіння міцності. Спочатку позитивний ефект наповнювачів дослідники [78, 79, 80] пов'язували з т.зв. "ефектом дрібних порошків", які розширюють вільний

простір, в якому осідають продукти гідратації цементу, що прискорює процес твердіння.

Доцільність введення наповнювачів до складу бетонів і розчинів впливає також з необхідності забезпечити їх достатню щільність без перевитрати цементу. За даними П. І. Боженова [81] для заповнення пустот між зернами заповнювача може витратитися більше 60% в'язучого, при цьому активно бере участь у формуванні клейового прошарку лише менша частина в'язучого. Отримання суміші заповнювачів з мінімальною пустотністю є складним техніко-економічним завданням, вона вимагає застосування великого числа фракцій. Більш перспективним є збільшення загальної витрати порошкоподібної частини цементних композитів за рахунок розбавлення цементу мінеральними наповнювачами, введення яких можливе як в процесі отримання цементу, так і отриманні розчинових або бетонних сумішей у стані готовому до вживання або в сухому вигляді.

Мінеральні наповнювачі в цементних системах часто умовно поділяють на активні та інертні [82]. До активних відносять дисперсні мінеральні речовини, які здатні взаємодіяти з гідроксидом кальцію, що виділяється при гідролізі клінкерних мінералів (т.зв. активні мінеральні добавки). До активних наповнювачів відносять також карбонатні порошки, які взаємодіють з цементом, з утворенням комплексних сполук типу гідрокарбоалюмінатів [83, 84]. У світі сучасних теоретичних уявлень про структуроутворення цементних систем другу групу мінеральних наповнювачів, які не вступають безпосередньо в хімічну взаємодію з продуктами гідратації цементу неточно називати інертними. Вони активно впливають на фізико-хімічні процеси структуроутворення та синтезу властивостей розчинів і бетонів.

Більш прийнятною є класифікація мінеральних наповнювачів, запропонована Ю. М. Баженовим, В. С. Дем'яновою і В. І. Калашниковим [85] в залежності від ступеня їх активності. Відповідно до цієї класифікації наповнювачі ділять на 4 групи:

I група – повільно твердіючі дисперсні матеріали (основні шлаки, золи та ін.);

II група – мінеральні порошки, які хімічно взаємодіють з продуктами гідратації цементу (кислі золи і шлаки, мікрокремнезем, метакаолін та ін.);

III група – дисперсні матеріали, які характеризуються низькою реакційною активністю при питомій поверхні 400...500 м²/кг (андезити, сиєніти, діабазити, граніти);

IV група – реакційно неактивні наповнювачі (піролюзит, деякі оксиди металів та ін.).

Ця класифікація також є умовною, як відзначають самі автори [85], і справедливою при дисперсності порід, що не перевищує 600 м²/кг. Дана класифікація також як і попередня враховує лише хімічну активність не беручи до уваги такий найважливіший показник активності наповнювача як величину його поверхневої енергії, яка визначає міцність адгезійних контактів у системі цемент-наповнювач. Відповідно до термодинамічної концепції адгезії [86] для створення міцних адгезійних контактів поверхнева енергія наповнювача повинна бути більшою ніж поверхнева енергія цементу.

Вплив наповнювачів у цементних системах проявляється на мікро-, мезо - і макрорівні [82].

На мікрорівні проявляється молекулярна взаємодія продуктів гідратації цементу з наповнювачем. Хімічно активні кремнеземисті наповнювачі в результаті реакції з Са (ОН)₂ – продуктом гідролізу клінкерних мінералів утворюють додаткові кількості низькоосновних гідросилікатів кальцію [87, 88]. Карбонатні наповнювачі утворюють комплексні сполуки з гідроалюмінатами і вступають в обмінні реакції з гідросилікатами кальцію [83, 84]. Сутність фізико-хімічної взаємодії наповнювачів з гідратованим цементом полягає у формуванні епітаксіольних контактів, а також центрів кристалізації. Останні згідно з вченням Гіббса-Фольмера значно зменшують необхідну енергію утворення зародків кристалів гідратних новоутворень у твердіючому цементному тісті [89 – 94]. Цей ефект зростає в умовах тепловологісної обробки, а також при зменшенні радіуса зерен наповнювачів, введенні добавок прискорювачів тверднення [82].

При оптимальній концентрації і дисперсності наповнювача утворюється дрібнозерниста структура цементного каменю, що позитивно позначається на його властивостях [95].

За певних умов можливий і деструктивний вплив наповнювача [82]. Він може мати місце, якщо параметри наповнення виходять за межі оптимуму і в усьому обсязі цементного каменю або в окремих його ділянках виникають розтягувальні напруження [82].

На мезорівні частинки наповнювача взаємодіють як з частинками гідратуючого цементу, так і між собою. В результаті збільшення об'ємної концентрації твердої фази частина води замішування переходить в плівковий стан і створюються т.зв. “стиснені умови”, що позитивно позначається на формуванні структури цементного каменю [96 – 98].

При досить тонкому прошарку дисперсійного середовища частинки наповнювача взаємодіють один з одним. Сили зчеплення частинок можна знайти [99] за формулою:

$$F_c = \frac{2}{3} \pi B r / H^3 \quad (1.4)$$

де r – радіус частинок, B – константа молекулярної взаємодії, H – відстань між частинками.

Середня відстань між частинками наповнювача визначається відношенням середнього об'єму матриці V_m до сумарної площі поверхні частинок:

$$H_{cp} = V_m / (V_n S_{n.n}), \quad (1.5)$$

де V_n – об'єм наповнювача; $S_{n.n}$ – питома поверхня наповнювача.

Поряд з поверхневими силами в цементно-водній системі, яка містить наповнювачі, при наявності на їх поверхні некомпенсованого електричного заряду діють кулонівські сили. При різній природі в'язучого і наповнювача виникає додаткова сила електростатичного притягання (F_e), значення якої може бути обчислено за формулою:

$$F_e = q^2 / (12rH), \quad (1.6)$$

де q – заряд; r – радіус частинок наповнювача; H – відстань між ними.

Максимальна міцність контакту між частинками наповнювача в цементній матриці досягається при інтенсивних методах ущільнення наповнених систем або застосуванні пластифікуючих поверхнево-активних речовин (ПАР).

Сили зчеплення між окремими частинками наповнювача збільшуються в міру зменшення на них товщини прошарку зв'язуючого.

Покращення організації структури наповненого зв'язуючого має місце в результаті утворення асоціатів наповнювачів або т.зв. кластерів [100, 101]. При цьому, однак, можливий прояв внутрішніх неоднорідностей поверхонь розділу в результаті концентрації напружень і при переході через деяку критичну ступінь наповнення істотно знижується міцність цементного каменю [102, 103].

На макрорівні наповнювач суттєво впливає на адгезійну міцність між цементним тістом і заповнювачем, когезійну міцність матричної складової цементних композитів і їх щільність. Зменшуючи міжзернові відстані в бетонах і розчинах наповнювачі можуть істотно збільшувати міцність контактної зони, що позитивно впливає на міцність матеріалів в цілому. В роботі [104] при зменшенні міжзернових відстаней в розчинах на кварцовому піску з 210 до 30 мкм твердість цементного каменю зросла в 1,5...2 рази. Мінімумально необхідна товщина прошарку цементного тіста на зернах заповнювача становить

приблизно $13,10^{-6}$ м [105]. Досягти такого тонкого прошарку цементного тіста можливо введенням до його складу достатньої кількості наповнювача.

Дослідженню впливу різних видів дисперсних мінеральних наповнювачів на властивості цементних розчинів і бетонів, присвячено значна кількість робіт. Отримані при цьому результати залежать від виду наповнювачів, їх гідралічної, пуцоланової та поверхневої активності, дисперсності і зернового складу, способу введення і вмісту.

Властивості розчинів і бетонів, що містять мінеральні наповнювачі, залежать значною мірою від їх впливу на водопотребу сумішей, що необхідна для досягнення заданих показників легкоукладальності.

Водопотреба наповнювачів залежить від багатьох факторів: водопоглинання, форми і особливостей поверхні зерен, дисперсності [82, 88] та ін. Більшість мінеральних наповнювачів тою чи іншою мірою збільшують водопотребу розчинових або бетонних сумішей. Разом з тим такий наповнювач як зола-виносу завдяки скловидній поверхні частинок, їх сферичній формі, може викликати при оптимальній концентрації пластифікуючий ефект [106, 88]. Цей ефект зменшується або зникає повністю при застосуванні більш грубодисперсних зол, що містять підвищену кількість незгорілих вуглецевих частинок із високим водопоглинанням, а також частинок неправильної форми [105, 107].

В системі цемент-вода наповнювач утримується за допомогою коагуляційних контактів, міцність яких (f_k) описується [82] формулою:

$$f_k = \nu f(F_p, \varphi, S_{num}^2), \quad (1.7)$$

де ν – постійна хімічної взаємодії, F_p – результуюча сила взаємодії між частинками, φ – ступінь наповнення, S_{num} – питома поверхня частинок.

Утворення міцних коагуляційних контактів сприяє зниженню водовідділення наповнених цементно-водних сумішей.

Вплив дисперсних наповнювачів на міцність цементних композитів до певної оптимальної концентрації є зазвичай позитивним [108, 109] за умови запобігання істотного збільшення водопотреби суміші.

Міцність наповнених цементних систем формується в результаті синтезу хімічних, фізико-хімічних і фізико-механічних процесів у системі цемент-вода-заповнювач. Наповнювач у цих процесах бере активну участь. Величина позитивного ефекту може коливатися в широкому діапазоні залежно від того, якою мірою змінюється склад і структура матеріалу. При цьому важливе значення мають такі чинники як ступінь гідратації і фазовий склад наповненого

цементного каменю, адгезійна міцність цементного каменю по відношенню до заповнювачів, особливості кристалічної та порової структури [110, 111].

Збільшення ступеня гідратації та обсягу гідратних новоутворень є основним результатом введення наповнювачів, що мають досить високу пуцоланову активність таких як золи і шлаки [106, 82, 88].

При введенні високодисперсних кремнеземистих наповнювачів з високою поверхневою енергією, таких як мікрокремнезем і метакаолін, істотно змінюються умови утворення конденсаційно-кристалізаційної структури цементного каменю, прискорюється утворення зародків кристалів гідратних новоутворень, структура стає значно щільнішою, різко зростає адгезійна міцність і міцність цементного каменю в контактній зоні з заповнювачами [112 – 116].

Введення малоактивних наповнювачів може бути ефективним як замість частини цементу, так і піску в результаті зменшення товщини клейового прошарку на зернах заповнювачів і зменшення їх пустотності [89].

Оптимальна кількість дисперсних наповнювачів у цементних системах коливається, як правило, в інтервалі від 10 до 70 %. Високоактивні наповнювачі (мікрокремнезем, метакаолін) забезпечують істотне збільшення міцності в межах 10...20 %. З позицій економії цементу при збереженні або невеликому зниженні міцності композитів може рекомендуватися від 30 до 70 % наповнювачів [85].

Є суперечливі рекомендації щодо оптимальної дисперсності наповнювачів. У роботах [117 – 119] рекомендується при введенні в цемент інертних або малоактивних наповнювачів більш тонко подрібнювати клінкерну складову, більш активних наповнювачів – навпаки. У роботах останніх років констатується, що підвищену міцність наповнені дисперсні системи (у присутності суперпластифікаторів) мають при використанні наповнювачів з дисперсністю до 900...1200 м²/кг, тобто такої, що в 2...4 рази перевищує дисперсність цементу [82, 120, 121]. Теоретичні обґрунтування Л.Й. Дворкіна, В.І. Соломатова і В.М. Вирового [82, 122] показали, що стосовно цементно-водних систем, наповненим меленим кварцовим піском, оптимальне співвідношення між розмірами наповнювача і в'язучого повинно знаходитися в межах 8...10. Разом з тим, якщо поверхнева енергія зерен наповнювача істотно вища, ніж у зерен цементу, бажане співвідношення діаметрів їх часток наближається до 1.

Прогнозуючи вплив наповнювачів на міцність цементних композитів, необхідно враховувати хіміко-мінералогічний склад клінкеру. Стосовно,

наприклад, таких активних наповнювачів як зола-виносу встановлено [123], що в ранньому віці зростанню міцності сприяє підвищений вміст в клінкері лугів, що прискорюють хімічну взаємодію наповнювача і цементу. При використанні всіх видів наповнювачів, які володіють пуцолановою активністю, надають перевагу цементам із підвищеним вмістом аліту, що утворюється при гідролізі $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Карбонатні наповнювачі хімічно активні також по відношенню до гідроалюмінатів і гідросульфоалюмінатів, що утворюються при гідратації цементу.

Поряд із впливом активних наповнювачів на міцність при стиску бетонів і розчинів відзначається [123] їх позитивний вплив на відношення міцності на розтяг до міцності на стиск і, відповідно, на тріщиностійкість цементних композитів. Відомо [88], що більш високе співвідношення міцності бетону на розтяг до міцності на стиск має місце при введенні в цемент золи, шлаку, а також використанні карбонатних заповнювачів.

Залежно від виду мінерального наповнювача, його хімічної та фізико-хімічної активності може змінюватися весь комплекс будівельно-технічних властивостей цементних композитів. При можливому збільшенні ступеня гідратації цементу активними наповнювачами та щільності бетонних сумішей можна очікувати зменшення повзучості бетону [124, 125]. Це підтверджено дослідними даними [126, 88].

Вплив наповнювачів на усадочні деформації є неоднозначним. Усадка цементного каменю, як відомо, визначається кількістю адсорбційно-зв'язаної води, що випаровується і залежить від відносного вмісту гідросилікатів кальцію та їх питомої поверхні. Тому при введенні тонкодисперсних високоактивних наповнювачів можна очікувати деякого збільшення усадочних деформацій. Разом з тим, при зниженій водопотреби відзначається [82, 88] можливе зниження усадочних деформацій наповнених цементних композитів. Це особливо характерно при використанні наповнювачів із низькою хімічною активністю, які так само як і заповнювачі зменшують відносний вміст в тверднучій системі гідросилікатів кальцію [85].

Крім міцнісних та деформаційних властивостей, введенням в цементні системи певних мінеральних наповнювачів можна управляти при необхідності їх корозійною стійкістю, екзотермією, жаростійкістю, водонепроникністю та ін. [82, 88, 127 - 131].

Разом з тим, поряд з позитивним ефектом введення мінеральних наповнювачів може викликати певні негативні наслідки. Наприклад, наповнювачі, що містять розчинні луги, можуть викликати підвищення

реакційної здатності в'язучого в бетонах і розчинах [107]. У цьому випадку при використанні реакційноздатних заповнювачів вміст лужних оксидів у наповненому в'язучому не повинен перевищувати 0,6 % за масою і бажано використання практично безлужних цементів. У той же час деякі дослідження [82] показали, що заміщення цементу таким наповнювачем як кам'яновугільна зола зменшує взаємодію між лугами та заповнювачами і допустима межа можливого вмісту лужних оксидів у цементно-зольному в'язучому може бути піднята до 15 %.

Поряд з традиційними наповнювачами з відходів промисловості (зола-виносу, мелені шлаки, мікрокремнезем) можливе використання у такій якості і відходів подрібнення та переробки гірських порід. Так покращення фізико-хімічних та будівельно-технічних властивостей композитів на основі цементу тонко дисперсними відходами обробки каменю (шлам, вологістю 50%, представлений переважно карбонатом кальцію) показано в роботі [132]. Дисперсні відходи являються підложкою для формування структури гідратних новоутворень, відмічено можливість епітаксiального зрощування кристалів кальциту та портландити та наявність хімічної взаємодії кальциту з білітом.

Таким чином, результати теоретичних досліджень дають підставу вважати можливим ефективне застосування наповнювачів у цементних бетонах, в тому числі і з пилюватих фракцій відсівів подрібнення гірських порід, особливо у дрібнозернистих.

1.4. Наукова гіпотеза і обґрунтування напрямків дослідження

Аналіз результатів досліджень, проведених раніше показав, що технологія виготовлення дрібнозернистого високоміцного бетону потребує подальшого розроблення.

Хоча багато робіт присвячені технології отримання високоміцних бетонів, переважна більшість з них передбачає використання високоякісних кондиційних матеріалів, тому розробка технології високоміцних бетонів, що дозволяє застосовувати техногенні відходи в якості основного заповнювача є дуже своєчасною та актуальною.

Досить важливою залишається проблема використання відходів подрібнення гірських порід (відсівів), які накопичуються на кар'єрах каменедобувної промисловості, погіршуючи екологічний стан навколишніх територій. Утилізація таких відходів здається перспективною у високоміцних дрібнозернистих бетонах класів С40...С80, де вони виступатимуть в ролі основного заповнювача. Причому у випадку нейтралізації негативного впливу пилюватих частинок на водопотребу бетонної суміші за рахунок використання

ефективних добавок-суперпластифікаторів нового покоління, такі частинки можуть виступати у ролі активного мікронаповнювача, який буде сприяти структуроутворенню цементного каменю.

Наукова гіпотеза дисертаційної роботи: При умові забезпечення низьких В/Ц у дрібнозернистому бетоні, що можливо за рахунок використання суперпластифікаторів з високим водоредукуючим ефектом, дисперсні частинки, що містяться у відсівах подрібнення граніту, будуть сприяти направленому структуроутворенню твердіючого цементного каменю. Оптимізація складу дрібнозернистого бетону, що містить наповнене дисперсними гранітними частинками цементне тісто та гранітні відсівви з оптимізованим гранулометричним складом дозволить отримати бетон з підвищеною міцністю при раціональних витратах кондиційних матеріалів.

Тому мета даної роботи – розробити оптимальні технологічні параметри виготовлення високоміцних дрібнозернистих бетонів з використанням в якості основного заповнювача відсівів подрібнення граніту, на основі встановлених закономірностей, що пов'язують властивості бетонної суміші та бетону з технологічними факторами.

Щоб досягти поставленої мети, слід вирішити наступні задачі:

1. Вивчити особливості гранулометричного, хімічного та петрографічного складу найбільш розповсюджених видів відсівів вивержених порід.
2. Дослідити вплив дисперсного гранітного наповнювача на реологічні властивості цементних паст та процеси гідратації та структуроутворення наповненого цементного каменю.
3. Дослідити вплив добавок-пластифікаторів різних видів та дисперсних частинок гранітних відсівів на властивості дрібнозернистих бетонних сумішей високої рухомості та бетонів на їх основі.
4. Встановити вплив гранулометричного складу відсівів подрібнення граніту на властивості дрібнозернистого бетону.
5. Дослідити технологічні параметри забезпечення високої міцності дрібнозернистих бетонів на гранітних відсівах.
6. Вивчити властивості, що визначають довговічність високоміцних дрібнозернистих бетонів на гранітних відсівах
7. Розробити методику проектування складів дрібнозернистих високоміцних бетонів на гранітних відсівах з комплексом заданих властивостей.
8. Виконати виробничу перевірку розроблених технологій.

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Характеристика компонентів, що були використані в дослідженнях

Відсів подрібнення – це супутній продукт подрібнення на щєбінь гірських порід різного походження, а також валуни й гравій, в складі якого переважають зерна менше 5 мм.

Згідно із рекомендаціями [133] відсів подрібнення можна поділити на дві групи (табл. 2.1):

- перша – відсів, що одержують при переробці на щєбінь вивержених гірських порід і валунів;
- друга – відсів, що одержують при переробці масивних осадових гірських порід (пісковиків, вапняків, доломіту), а також гравію.

Відсів подрібнення в своєму складі також містять забруднюючі домішки. Згідно табл. 2.1. у відсівах першої групи міститься менша кількість домішок ніж у відсівах другої групи.

Таблиця 2.1 – Вміст домішок у відсівах подрібнення двох груп

№	Показник	Перша група	Друга група
1.	Вміст зерен більших 0,16 мм, %	5...30	До 65
2.	Вміст частинок менших 0,16 мм, %	5...25	До 43
3.	Кількість пилюватих та глинистих частинок, %	2...15	3...33
4.	Вміст глини у шматках	Практично відсутня	0,15...12

В даній роботі увага приділялась відсівам першої групи, які в більшій мірі розповсюджені у Північно-Західному регіоні України. Відсів подрібнення в разі їх відповідності вимогам діючих стандартів можна розглядати як пісок з відсіву дроблення [64]. Пісок із відсівів подрібнення отримують, як правило, безпосередньо при виробництві щєбеню. За допомогою спеціального збагачувального обладнання та відповідних технологічних прийомів з метою покращення зернового складу отримують збагачений пісок.

В дослідженнях були використані відсів подрібнення підприємств (кар'єрів), що виготовляють щєбінь для будівельних робіт у Рівненській (ККНК «Технобуд», ТОВ «Вирівський кар'єр»), Хмельницькій (Полонський гранітний кар'єр, ПП ТД «Аргус») та Житомирській областях (ПАТ «Ушицький комбінат будівельних матеріалів»).

ККНК «Технобуд», ТОВ «Вирівський кар'єр» Рівненської області. Граніт з якого отримано відсівів подрібнення відносяться до так званих осницьких гранітів і характеризується хімічним та мінералогічним складом, котрі наведені у табл. 2.2. Під час проведення досліджень було використано відсівів близько 20 проб, взятих з того ж кар'єру, котрі незначно відрізнялись між собою. Зерновий склад найбільш характерних із них – у табл.2.3 та на рис.2.1.

Таблиця 2.2 – Хімічний склад граніту

№ проби	Вміст, % по масі													
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	H ₂ O	ВПП
1.	74,6	0,2	13,9	1,2	0,68	–	0,5	1,29	3,76	5,29	0,09	–	0,16	0,7
2.	73	0,4	10	0,75	0,58	–	0,43	1,25	4,12	5,12	0,07	–	0,13	0,7
3.	71	0,2	17	0,95	0,48	–	0,46	1,32	3,86	5,12	0,08	–	0,15	0,5
Сер.	72,9	0,3	13,6	0,97	0,58	–	0,46	1,29	3,91	5,18	0,08	–	0,15	0,6

Фізичні властивості відсівів, відмитих від пилюватих домішок:

- насипна густина $\rho_n=1,41$ г/см³;
- пустотність – 47,8 %;

Таблиця 2.3 – Зерновий склад гранітних відсівів ККНК «Технобуд».

Часткові залишки на ситах з розміром комірки, мм							M _{кр}
5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,16	
7,2	34,7	10,5	14,2	13,6	10,9	17,8	3,02

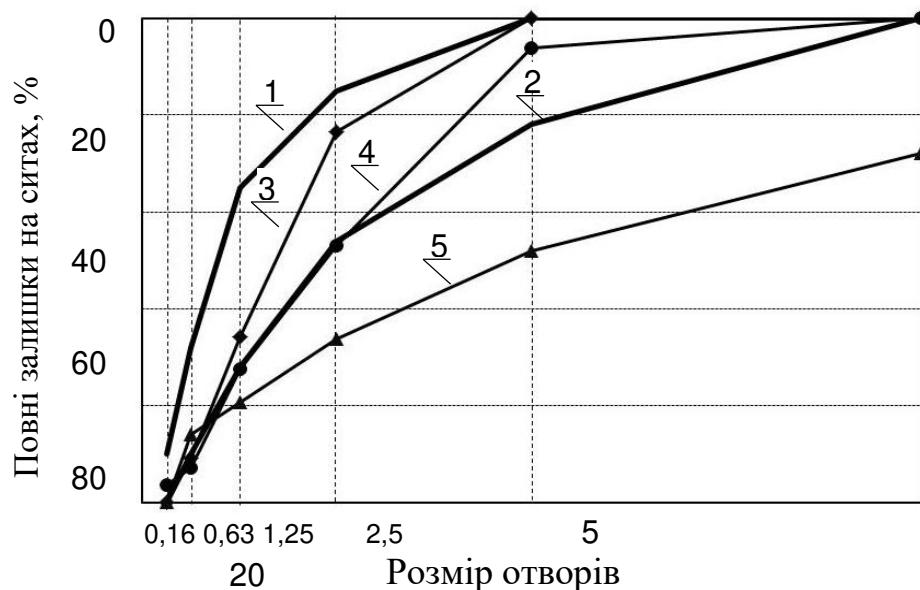


Рисунок. 2.1 – Зерновий склад піску із відсівів подрібнення граніту Полонського кар'єру:

- 1 – нижня межа допустимого зернового складу; 2 – верхня межа допустимого зернового складу; 3 – гранітний пісок ($M_{кр}=1,8$); 4 – гранітні відсівів ($M_{кр}=3,24$); 5 – гранітний пісок фракції 0,63..5 ($M_{кр}=3,14$).

Всі досліджувані відсівни характеризувались значним вмістом частинок <0,16 мм (15...20 %) (далі – пилюватих частинок). Згідно прийнятої робочої гіпотези саме такі частинки, виступаючи в ролі активного мікронаповнювача, повинні сприяти підвищенню щільності та міцності бетону (при умові, якщо в їх складі немає великої кількості глинистих частинок).

Судячи з кривих зернового складу досліджуваних відсівів, вони не є придатними для їх використання у цементних бетонах внаслідок недостатнього вмісту частинок розміром 0,63...0,315 мм та великої кількості – розміром 2,5...10 мм.

Вивчення **мінерально-петрографічного складу** відсівів виконувалося після визначення зернового складу відповідно до існуючої методики [134].

Для мінерально-петрографічного аналізу була відібрана проба масою 1 кг. Потім проводилося скорочення проби методом квартування, промивання й розсів на фракції 5-2,5 мм; 2,5-1,25 мм; 1,25-0,63 мм; 0,63-0,315 мм; 0,315-0,16мм; 0-0,16 мм. Для цього від кожної фракції відквартувували частину з таким розрахунком, щоб кількість піщаних зерен була не менше 500 шт. Процентний вміст порід і мінералів у кожній фракції визначався виходячи з підрахованої кількості зерен. За виходом досліджуваних фракцій (зерновим складом) визначався вміст кожного мінералу у фракції, а також сумарно у пробі.

Вивчення фракцій понад 5мм, 2,5-5 мм, 1,25-2,5 мм, 0,63-1,25 мм проводилося за допомогою бінокулярного мікроскопа МБС-10.

У складі відсівів подрібнення основними відсівоутворюючими мінералами є польові шпати, кварц й їх зростки. Мінерально-петрографічний склад для кожної фракції представлений у табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Мінералогічний аналіз складу відсівів граніту крупністю більше 5 до 0,16 мм

Розмір фракцій, мм	Вихід фракцій, %	Вміст зерен граніту, %	Вміст зерен окремих мінералів, %					Форма зерен		Характер поверх.	
			Кварц	Польовий шпат	Слюда (біотит)	Гранат	Циркон	Обкатана	Кубовидна	Гладка	Шорстко-вата
>5	20,2	15,8	2,02	2,36	0,06	-	-	-	20,2	-	20,2
2,5-5	6,0	4,10	0,90	0,98	0,02	-	-	-	6,0	-	6,0
1,25-2,5	10,0	5,84	2,03	2,0	0,13	-	-	-	10,0	-	10,0

Продовження таблиці 2.4

0,63- 1,25	16,9	7,99	5,24	3,09	0,46	0,12	-	-	16,9	0,44	16,5
0,315- 0,63	15,5	2,59	10,1	1,6	0,93	0,26	-	-	15,5	96,7	14,9
0,16- 0,315	11,0	0,47	8,63	0,25	1,1	0,55	Од.зн.	-	11	96,7	10,6
<0,16	20,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Всього	100	36,8	28,9	10,3	2,70	0,93		-	79,6	1,31	78,3

Співвідношення зерен кварцу й польового шпату у відношеннях становить 3:1.

Склад відсівів досить стабільний, коефіцієнт варіації основних відсівоутворюючих компонентів - кварцу, польового шпату та зростків цих мінералів - не перевищує 30 % й у більшості змінюється від 10 до 20 %. Зерна кварцу, які мають розмір переважно в межах 0,1 - 0,3 мм, накопичуються в рівновеликій фракції відсіву - 0,16-0,315 мм і становлять 78,4 % від цієї фракції. Фракції 1,25-2,5 мм і 0,63-1,25 мм збагачені зернами польових шпатів (у сумі - 38,3 %), оскільки границі коливань розміру зерен цих мінералів становлять 0,5-2,0 мм. Відмічена наявність зерен слюди - біотиту. У крупних фракціях (до 0,63 мм) вміст слюди не перевищує 2,7 %, для фракцій 0,315-0,63 мм становить 6 %, а для фракції 0,16-0,315 мм зростає до 10 %. В цілому за пробою вміст слюди - 2,7 %. Крупні фракції відсіву подрібнення (понад 5мм, 2,5-5 мм та 1,25-2,5 мм) більше ніж на 50 %) складаються з уламків породи. Значна частина відсіву подрібнення щебеню з вивержених гірських порід із розміром зерен 0,16-5,0 мм утворена переважно зернами кутастої форми із середнім вмістом 79,6%, а інша частина зерен голкоподібної форми. У фракціях від 5 до 1,25 мм переважає шорсткувата поверхня зерен, у фракціях 1,25-0,63 мм з'являються зерна із гладкою поверхнею, а серед більш дрібних фракцій різко збільшується кількість зерен із гладкою поверхнею (табл. 2.4).

Полонський гранітний кар'єр, (ПП ТД «Аргус») Хмельницької області.

Вивчення фізико-механічних властивостей гранітного піску, гранітних відсівів та гранітного піску фракції 0,63...2,5 мм наведені у табл. 2.5. – 2.7 відповідно, а на рис. 2.1. приведений їх зерновий склад.

Таблиця 2.5 – Характеристики гранітного піску Полонського кар'єру

№ з/п	Назва показника	Вимоги ДСТУ Б В.2.7-32-95	Фактичне значення
1.	Зерновий склад: Модуль крупності Вміст зерен розміром від 5 до 10 мм, % Вміст зерен більше 10 мм, % Вміст зерен менше 0,16 мм, %	1,5...3,5 не більше 15 не більше 0,5 не більше 15	1,8 – – 9,1
2.	Вміст пиловидних і глинистих частинок, % (в тому числі глини у грудках)	не більше 3 не більше 0,35	5,7 –
3.	Вміст органічних домішок (колориметрична проба)	світліша еталону	світліша еталону
4.	Насипна густина, кг/м ³	–	1,43

Таблиця 2.6 - Характеристики гранітних відсівів Полонського кар'єру

№ з/п	Назва показника	Вимоги ДСТУ Б В.2.7-32-95	Фактичне значення
1.	Зерновий склад: Модуль крупності Вміст зерен розміром від 5 до 10 мм, % Вміст зерен більше 10 мм, % Вміст зерен менше 0,16 мм, %	1,5...3,5 не більше 15 не більше 0,5 не більше 15	3,24 3,1 – 10,1
2.	Вміст пиловидних і глинистих частинок, % (в тому числі глини у грудках)	не більше 3 не більше 0,35	5,7 –
3.	Вміст органічних домішок (колориметрична проба)	світліша еталону	світліша еталону
4.	Насипна густина, т/м ³	–	1,38

Таблиця 2.7 – Характеристики гранітного піску фракції 0,63...2,5 мм
Полонського кар'єру

№ з/п	Назва показника	Вимоги ДСТУ Б В.2.7-32-95	Фактичне значення
1.	Зерновий склад:		
	Модуль крупності	1,5...3,5	3,14
	Вміст зерен розміром від 5 до 10 мм, %	не більше 15	–
	Вміст зерен більше 10 мм, %	не більше 0,5	–
	Вміст зерен менше 0,16 мм, %	не більше 15	3,5
2.	Вміст пиловидних і глинистих частинок, % (в тому числі глини у грудках)	не більше 3 не більше 0,35	0,5 –
3.	Вміст органічних домішок (колориметрична проба)	світліша еталону	світліша еталону
4.	Насипна густина, т/м ³	–	1,41

За зерновим складом даний гранітний пісок відповідає вимогам стандарту, відноситься до пісків середньої крупності, що забезпечує можливість його використання при виготовленні бетону та бетонних виробів.

Вміст у піску органічних домішок у межах норми, завищеним є вміст пиловатих і глинистих частинок, що може призвести до підвищення водопотреби бетонної суміші та, відповідно, зниження міцнісних характеристик бетону. Відсів подрібнення граніту представлений частинками від 0 до 10 мм. За зерновим складом та крупністю його умовно можна віднести до класу дуже крупних пісків для бетону. Зерновий склад відсіву свідчить про явний недолік частинок розміром 0,315...0,63 мм та, відповідно, можливість позитивного коректування характеристик за рахунок використання суміші з піском. Підвищена кількість частинок менше 0,16 мм (10,1%) може призвести до суттєвого збільшення водопотреби та зниження міцності бетону.

“Ушицький комбінат будівельних матеріалів” (Житомирська обл.). Вивчення фізико-механічних властивостей пісків із відсівів подрібнення щебеню граніту ПАТ “Ушицького комбінату будівельних матеріалів” включало в себе оцінку його зернового складу (табл. 2.8).

За зерновим складом пісок із відсівів подрібнення щебенів граніту із $M_{кр}=3,75$ відноситься до крупних пісків. Графік зернового складу наведений на рис. 2.2.

Таблиця 2.8 – Гранулометричний склад піску із відсівів подрібнення щебеню граніту

Крупність, мм	Залишки на ситі, %	
	часткові	повні
>5	23,7	23,7
2,5-5	27,2	50,9
1,25-2,5	18,1	69,0
0,63-1,25	6,7	75,7
0,315-0,63	8,8	84,5
0,16-0,315	10,4	94,9
0-0,16	5,1	100

Вміст зерен понад 5 мм у відсівах граніту становить 23,7 %, що перевищує вимоги ДСТУБ В.2.7-210:2010 “Пісок із відсівів дроблення вивержених гірських порід для будівельних робіт. Технічні умови”, згідно з яким для крупних пісків І класу вміст таких зерен не повинен перевищувати 5 % за масою.

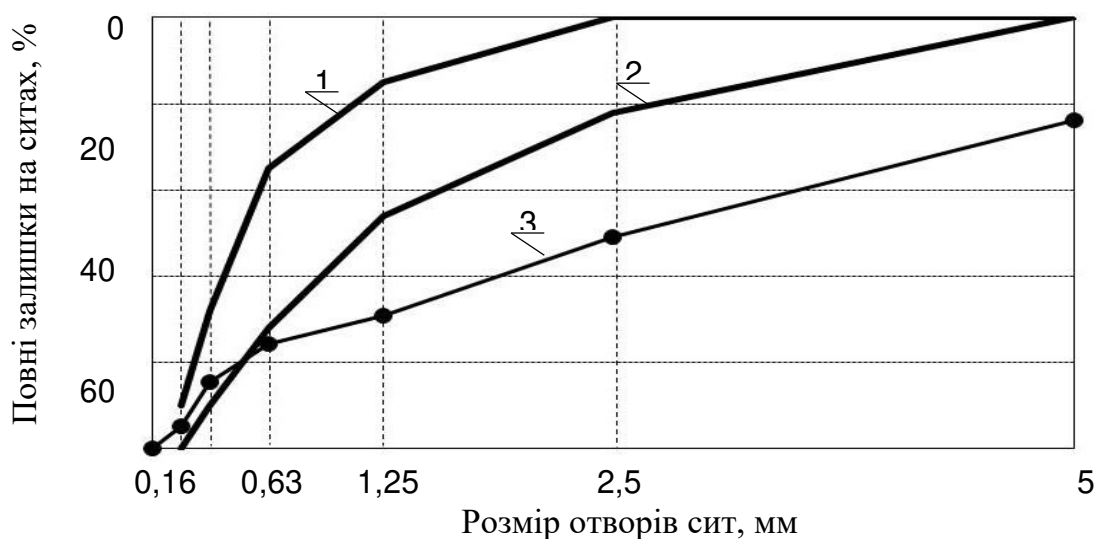


Рисунок. 2.2 – Зерновий склад піску із відсіву подрібнення граніту Ушицького комбінату: 1 – нижня межа допустимого зернового складу; 2 – верхня межа допустимого зернового складу; 3 – гранітний відсів ($M_{кр}=3,75$).

Таким чином, досліджуваний пісок із відсівів подрібнення граніту не задовольняє вимоги, які запропоновані до заповнювачів для важкого бетону згідно ДСТУ Б В.2.7-43-96. “Бетони важкі. Технічні умови”.

Для використання пісків із відсівів у бетонах їх зерновий склад повинен бути оптимізований, тобто забезпечувати найбільшу рухомість із мінімальною витратою цементу, при цьому бетонна суміш не повинна розшаровуватися.

Таким чином, основною перешкодою для використання відсівів у більшій мірі є не підвищений вміст часток менше 0,16 мм, а значна кількість крупних частинок (більше 5 мм і більше 2,5мм). Для створення оптимальних зернових складів пісків із відсівів подрібнення, необхідно їх фракціонування.

Частинки розміром менше 0,16 мм відсівів подрібнення являють собою готовий наповнювач, що не вимагає додаткової енергії на помел. Але для використання цих часток необхідно детальне вивчення їх властивостей, що включає: визначення питомої поверхні й розподіл часток за розмірами, аналіз мінерально-петрографічного й хімічного складу.

Характеристика частинок <0,16 мм гранітних відсівів та пилу аспіраційних систем. Як показують результати літературного огляду, частинки відсівів менші 0,16 мм, є найбільш активною частиною, здатною виступати в ролі активного наповнювача цементного каменю. Тому був проведений окремий аналіз даної складової гранітних відсівів. Додатково, для оцінки впливу дисперсності гранітних частинок на властивості бетону, у дослідженнях використовувався пил аспіраційних установок ТОВ ККНК «Технобуд». Аспіраційний пил (АП) є продуктом, що вловлюється аспіраційними системами при подрібненні гірських порід на щебінь. АП залежно від системи пиловловлювання може бути умовно розділений на два види:

- аспіраційний пил високої дисперсності (АПВД), що вловлюється рукавними фільтрами;
- аспіраційний пил середньої дисперсності (АПСД), який вловлюється циклонами.

Властивості аспіраційного пилу наведені у табл.

Таблиця 2.9 – Фізичні характеристики аспіраційного пилу

№ з/п	Характеристики	Величина
1	Питома поверхня, м ² /кг	
	- АПВД	680...720
	- АПСД	240...260
2	Насипна густина, кг/м ³	
	- АПВД	590...650
	- АПСД	820...870
3	Зерновий склад, %	
	до 20 мкм	15,5...25,5
	20...40 мкм	36,5...45,5
	40...80 мкм	24,9...33,5
	80...160 мкм	3,1...14,5
4	Вміст глинистих частинок, %	0,2...0,5
5	Вологість, %	0,3...0,5
6	Наявність водорозчинних дом., %	відсутні

Для визначення мінерально-петрографічного складу частинок менше 0,16 мм відсівів подрібнення граніту був проведений напівкількісний рентгенофазовий аналіз на дифрактометрі «Дрон-4-07». Зйомка порошкоподібних проб здійснювалася в безперервному режимі із застосуванням $\text{Cu K}\alpha$ випромінювання, з використанням Ni -фільтра, зі швидкістю $2^\circ/\text{хв}$. Прискорювальна напруга на рентгенівській трубці складала 30 кВ, струм 20 мА. Крок сканування $\Delta 2\theta = 0,04^\circ$. Набір щілин від анода рентгенівської трубки до лічильника: 1-2 мм; 2-0,5 мм; 3-0,25 мм. При визначенні міжплощинних відстаней та для фазової діагностики була використана спеціальна література [135-137].

На основі наведених вище даних ряду дослідників, можна припустити, що польові шпати (ортоклаз, мікроклін та альбіт), що переважають у складі частинок менше 0,16 мм відсівів подрібнення граніту будуть вступати в хімічну взаємодію із продуктами гідратації мінералів портландцементу, у тому числі із $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Частинки менше 0,16 мм відсівів подрібнення мають у своєму складі також глинисті мінерали. Глинисті мінерали зустрічаються й у природних пісках - це каолініт, монтморилоніт і гідрослюда. Основним показником глинистих мінералів, що впливає на водопотребу бетонної суміші, є їх здатність до розбухання [138]. Мінерал Na -монтморилоніт (бентоніт) розбухає у воді, Ca -монтморилоніт - мало розбухає, а каолініт і гідрослюда є мінералами, що не розбухають. Отже, найбільшу небезпеку можуть представляти мінерали монтморилоніту.

Вплив глинистих домішок на властивості бетону залежить від характеру їх розподілу. Розподіл глини на поверхні зерен піску різко негативно відображається на міцнісних характеристиках бетону й морозостійкості. Однак у тонкодисперсному стані деякі глинисті мінерали не представляють потенційної небезпеки. Встановлено, що поряд із каолінітом гідрослюда практично не вступає у взаємодію із цементом у процесі гідратації. Відомо також про позитивний вплив добавки бентонітової глини (до 15 %) на підвищення щільності й тріщиностійкості гідротехнічного бетону [139, 140].

Частинки менше 0,16 мм відсівів подрібнення граніту складаються з мінералів: кварцу SiO_2 (35 %); мінералів групи польових шпатів (65 %): ортоклазу $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ (~30 %), мікрокліну $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ (~20 %), альбіту $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ (~15 %); у незначній кількості присутні домішка каолініту $\{\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8\}$ (~1%).

Міжплощинні відстані (d , Å) на дифрактограмі (рис. 2.3) властивим мінералам частинок менше 0,16 мм відсівів граніту наступні: кварцу ($d = 4,28$;

3,36; 2,28; 1,546 А та ін.), ортоклазу ($d= 4,06; 2,53; 2,46; 2,16$ А та ін.), мікрокліну ($d= 3,808; 3,36; 3,26; 2,91; 2,79$ А та ін.), альбіту ($d= 3,214; 2,948; 2,86$ А та ін.), каолініту (Рефлекс із - $d=7,27$ А слабкий).

Відомо, що при збільшенні дисперсності частинок зростає їх активність.

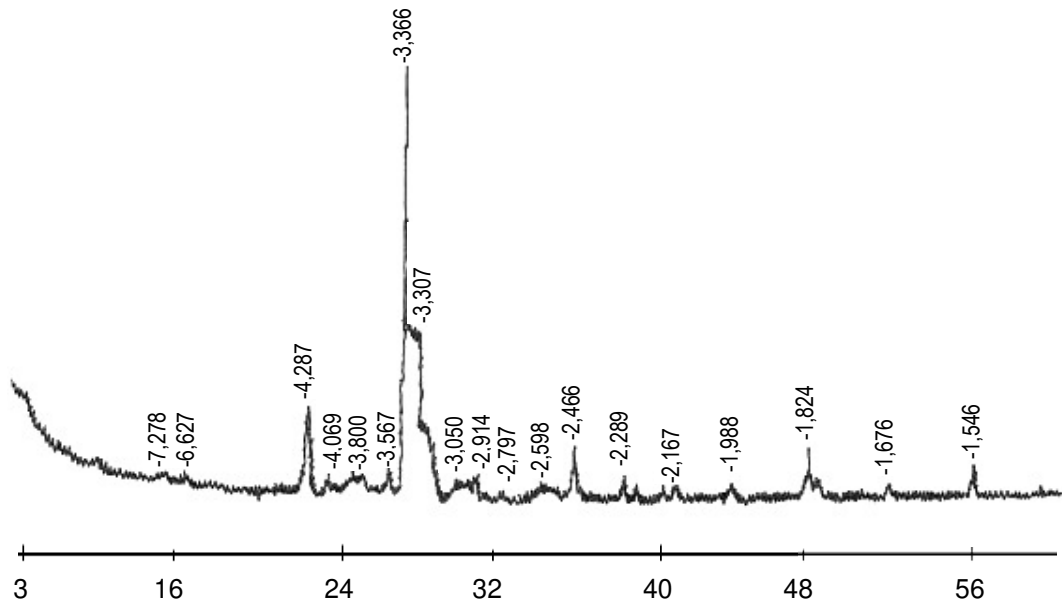


Рисунок 2.3 – Рентгенограма частинок менше 0,16 мм відсівів подрібнення. На відміну від крупних часток відсівів тонкодисперсні частинки (менше 0,16 мм) будуть більш активно брати участь у процесі структуроутворення цементу[141].

У частинках менше 0,16 мм відсівів подрібнення граніту присутня велика кількість польових шпатів. Тонкодисперсні частинки польових шпатів є активною підкладкою для утворення низькоосновних гідросилікатів кальцію. Залежно від умов гідратації при взаємодії польових шпатів із $\text{Ca}(\text{OH})_2$ можуть утворюватися не лише низькоосновні гідросилікати кальцію. Так при температурі 95°C така взаємодія супроводжується поряд з утворенням гідросилікатів кальцію утворенням гідрогранатів, а також лугів [142].

Хімічний склад частинок менше 0,16 мм відсівів подрібнення визначали за наступною методикою:

- наявність кремнієвої кислоти визначали методом оплавлення в сумішах вуглекислих солей із подальшим промиванням 1 %-м розчином соляної кислоти;
- кількість заліза й алюмінію визначали з розчину після визначення кремнієвої кислоти фотоколориметричним методом за допомогою альфа-дипіриділу (визначення заліза) і алюмініолу (визначення алюмінія);
- вміст кальцію й магнію визначали способом титрування Б-0,05 нормальним і

флуорексоном;

- кількість SO_3 визначали хлористим барієм з витяжки;
- вміст калію й натрію визначали методом фотометрії полум'я.

У результаті хімічного аналізу частинок менше 0,16 мм відсівів подрібнення граніту був визначений вміст наступних оксидів: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5 , Ca, Mg, SO_3 , K_2O , Na_2O (табл. 2.10). Практично всі хімічні елементи в гірських породах перебувають у зв'язаному стані з киснем, в оксидній формі. Визначальний хімічний склад (до 98 %) є перераховані вище оксиди.

Таблиця 2.10 – Результати хімічного аналізу частинок менше 0,16 мм відсівів подрібнення граніту ТОВ ККНК «Технобуд»

Назва породи	Вміст, %												
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	P_2O_5	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	ін.л.п	H_2O Гігрос.	SO_3 заг.
Граніт	74,2	13,5	3,12	0,26	0,12	1,4	2,52	<0,1	1,7	1,3	1,11	0,04	0,13

Основним із них є оксид кремнію. Однак у незв'язаному виді він присутній у невеликій кількості, переважно в частинках менше 0,16 мм відсівів граніту (кислій породі). На відміну від звичайних будівельних пісків частинки менше 0,16 мм відсівів містять підвищену кількість оксидів металів Al_2O_3 , Fe_2O_3 .

Питома поверхня частинок <0,16 досліджуваних відсівів, що визначалась приладом ПСХ-2, коливалась в межах від 2200...2400 $\text{cm}^2/\text{г}$.

Для встановлення вмісту у частинках <0,16 гранітних відсівів глинистих домішок було проведено їх аналіз за методом Рудківського, котрий використовується при визначенні речовинного складу глинистої сировини для будівельної кераміки [143]. Під час аналізу проби гранітного пилу масою 20...30 г заливались 5% розчином CaCl_2 і через 1 добу визначалось збільшення об'єму пилу, що осів. Збільшення об'єму повинно відбуватись у випадку присутності глинистих мінералів, здатних до набрякання у воді. Результати аналізу представлені на діаграмі Охотіна (рис. 2.4).

Судячи з діаграми частинки гранітних відсівів <0,16 мм містять близько 5...6% глинистих, 9 % пилюватих (0,005...0,05 мм) та 85 % піщаних (0,05...0,16 мм). Вміст глинистих частинок по відношенню до всієї маси досліджуваних відсівів становить 1...2 %, що знаходиться в межах встановлених норм [64].

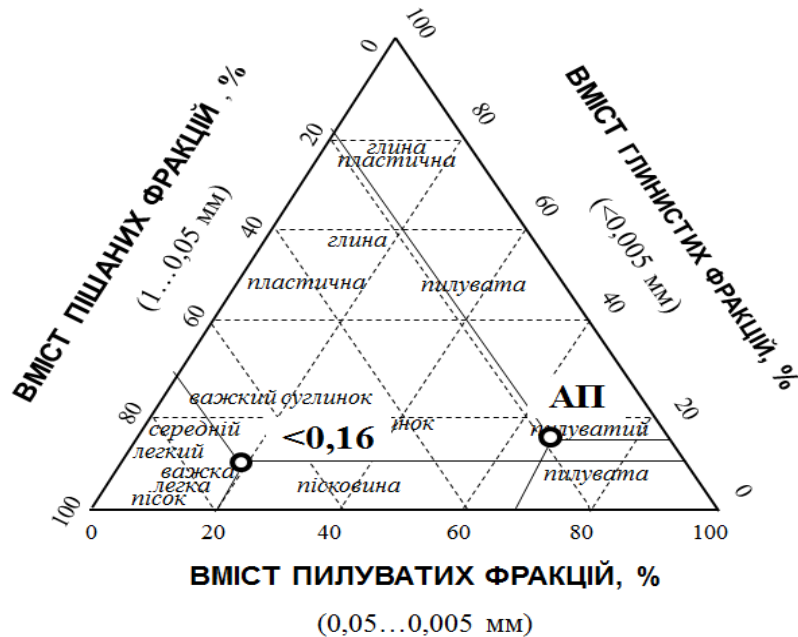


Рисунок 2.4 – Результати аналізу частинок $<0,16$ мм гранітних відсівів ($<0,16$) та аспіраційного пилу (АП) по методу Рудківського

Для більш чіткої уяви про зерновий склад пилуватих частинок гранітних відсівів був проведений їх седиментаційний аналіз. Дослід проводився із застосуванням торзійних терезів типу WT із седиментаційною шалькою (седиментометр Фігуровського [144, 145]).

Аналіз інтегральної і диференціальної кривих розподілу частинок відсівів менших $0,16$ мм за радіусом (рис. 2.5) дає змогу вважати, що гранулометричний їх склад є нерівномірним і перервним: близько 55% гранітного пилу представлено частинками розміром від $0,15$ до $0,07$ мм, причому розмір зростає пропорційно до процентного вмісту; 20% припадає на частинки $0,07\dots0,05$ мм, інших 25% становлять частинки, менші $0,05$ мм, причому вміст частинок, розміри яких відрізняються між собою на $0,01$ мм становлять $2,2\dots3\%$. Аспіраційний пил високої дисперсності, седиментаційний аналіз якого був проведений (рис. 2.6), як і очікувалось, містить значно більше дисперсних частинок. Близько 50% за масою становлять частинки до $0,03$ мм і ще 30% - частинки від $0,03$ до $0,05$ мм. Від таких частинок слід очікувати найбільшого структуроутворюючого ефекту, однак вони ж і будуть причиною підвищеної водопотреби бетонних сумішей.

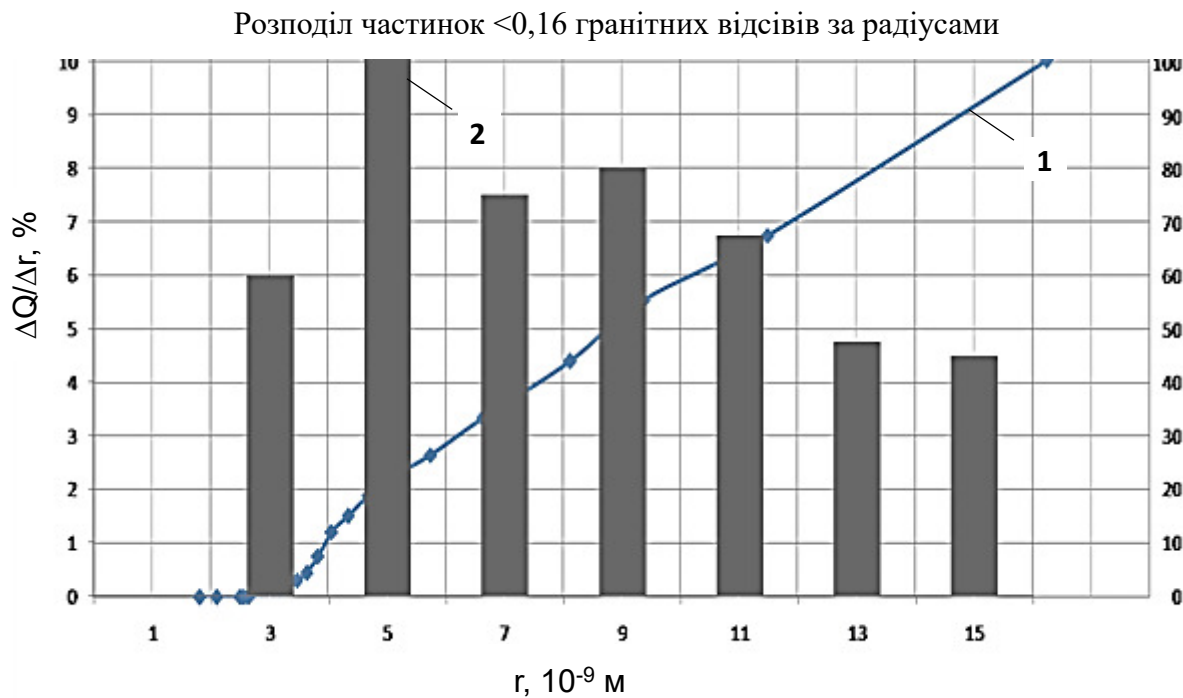


Рисунок 2.5 – Інтегральна крива (1) та гістограма (2) розподілу мм гранітних відсівів

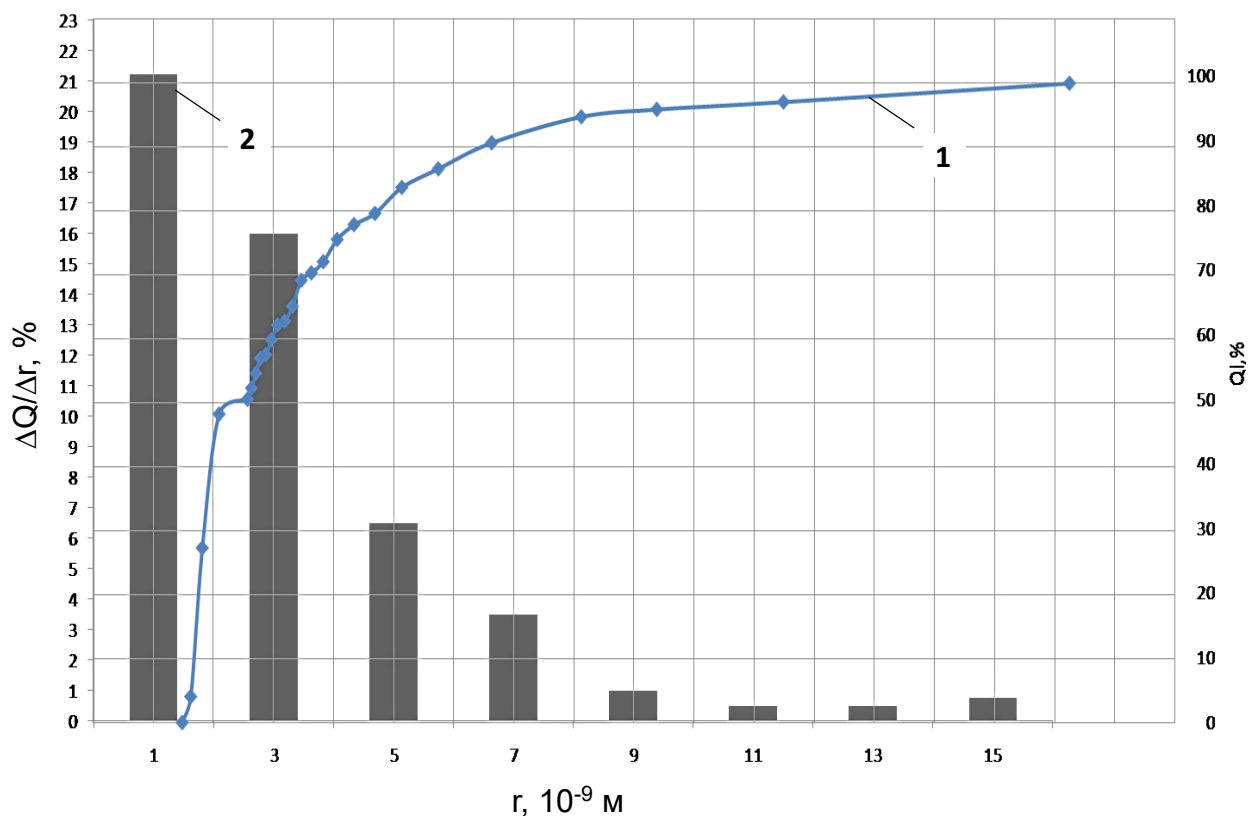


Рисунок 2.6 – Інтегральна крива (1) та гістограма (2) Складу аспіраційного пилю

Із результатів гранулометричного аналізу відомо, що досліджувані частинки відсівів повинні брати активну участь у формуванні структури цементного каменю.

Радіаційно-гігієнічна оцінка. Відомо, що природні джерела іонізуючого випромінювання створюють близько 60-70 % сумарної дози опромінення населення [76]. Максимальний внесок у дозу опромінення населення вносять природні радіонукліди, які містяться в мінеральній сировині. У зв'язку з цим комплексна оцінка відсівів подрібнення повинна включати не лише визначення фізико-механічних властивостей мінерально-петрографічного й хімічного складів (з оцінкою шкідливих домішок), але й радіаційну характеристику, забезпечуючи екологічну безпеку.

Найбільш шкідливими з точки зору охорони навколишнього середовища й здоров'я людей вважаються наступні властивості:

- радіоактивність продуктів, що переробляють, обумовлена за показником ефективної питомої активності природних радіонуклідів;
- радоновиділення матеріалів.

Радіаційна безпека населення при впливі природних радіонуклідів забезпечується згідно діючих нормативів [146].

Основними радіонуклідами природного походження, які містяться в будівельних матеріалах, є: радій-226 (Ra-226), торій-232 (Th-232), калій-40 (K-40).

Біологічний вплив на організм людини вище перерахованих радіонуклідів оцінюється за значенням показника сумарної питомої ефективної активності природних радіонуклідів (A_{ef}), який визначається за формулою:

$$A_{ef} = A_{Ra} + 1,31 A_{Th} + 0,085 A_K, \quad (2.1)$$

де A_{Ra} , A_{Th} ; A_K – питома ефективна активність радію, торія й калію відповідно, Бк/кг.

За ДБН В.1.4-2.01-97 [146] сумарна питома ефективна активність природних радіонуклідів (A_{ef}) не повинна перевищувати для матеріалів, які використовуються у споруджуваних і реконструйованих житлових і цивільних будинках 370 Бк/кг (I клас).

Радіонуклідний аналіз проводився підприємствами-виробниками на гамма-спектрометрі в лабораторіях акредитованих для проведення радіаційного контролю (табл. 2.11). Відповідно до критеріїв для ухвалення рішення про використання будівельних матеріалів досліджувані відсіви подрібнення відносяться до I класу.

Таблиця 2.11 – Результати радіаційного контролю відсівів подрібнення граніту

Найменування радіоактивного елемента	Значення питомої активності, Бк/кг
Ra-226	35
Th-232	35
K-40	971
A_{ef}	168

За даними досліджень середньоарифметичне значення A_{ef} для відсівів подрібнення граніту перебуває в межах 168 Бк/кг).

За даними гамма-спектрометричного аналізу порушення радіоактивної рівноваги в рядах урану і торія не перевищує 3-7%.

Значний внесок у цю частину вносять радон і його похідні продукти розпаду (ППР), що виділяються з будівельних матеріалів, у тому числі нерудних, у повітря житлових і виробничих приміщень, а також у навколишнє середовище. Радій-226 (Ra-226) є джерелом радіоактивного газу радону (Rn-222) і ППР. Маложивучі продукти розпаду потрапляючи до організму людини приводять до опромінення легеневої тканини [146].

Результати радіонуклідного аналізу свідчать про те, що досліджувані відсівні подрібнення є безпечними для навколишнього середовища й здоров'я людей.

Характеристика портландцементу. Портландцемент «Волинь-Цемент» філія ПРАТ «Дікергофф Цемент Україна» є типовим середньоалюмінатним цементом, найбільш характерним для сучасної вітчизняної цементної промисловості, для досліджень був обраний цемент типів ПЦ-I та ПЦ-II-A-III за ДСТУ Б В.2.7-46-2010 марки М500. Вибір середньоалюмінатного цементу пояснюється не тільки його розповсюдженістю. Як показали роботи НДІЗБ, перехід на високоалюмінатні цементы ($C_3A > 7\%$) потребує збільшення дозування СП майже в 2 рази для отримання рівнорухомих бетонних і розчинних сумішей [147].

Хімічний та мінералогічний склад клінкеру, що був використаний в дослідженнях наведений в табл. 2.12, а фізико-механічні властивості цементів – у табл. 2.13.

Таблиця 2.12 – Хімічний та мінералогічний склад клінкеру «Волинь-Цемент» філія ПРАТ «Дікергофф Цемент Україна»

Назва показника	Позначення показника	Кількісне значення, %
Оксид кальцію	CaO	64,49
Оксид кремнію	SiO ₂	20,32
Оксид алюмінію	Al ₂ O ₃	5,28
Оксид заліза (III)	Fe ₂ O ₃	4,05
Оксид заліза (II)	FeO	-
Оксид магнію	MgO	0,74
Вміст іону хлору	Cl	-
Нерозчинний залишок	HЗ	0,28
Втрати при прожарюванні	ВПП	0,33
Коефіцієнт насичення	КН	0,94
Силікатний модуль	n	2,26
Глиноземистий модуль	p	1,31
Трикальцієвий силікат	C ₃ S	66,95
Двохкальцієвий силікат	C ₂ S	13,15
Трикальцієвий алюмінат	C ₃ A	7,42
Чотирьохкальцієвий алюмоферит	C ₄ AF	12,48

Таблиця 2.13 – Фізико-механічні характеристики цементів ПЦ-I -500 та ПЦ-II/A-III-500

Назва показника	Згідно ДСТУ Б В.2.7-46:2010	Середні показники	
		ПЦ-I -500	ПЦ-II/A-III-500
Тонкість помелу, залишок на ситі №008, %	<15,0	6,0-10,0	6,0-9,0
Питома поверхня за Блейном, м ² /кг,	-	250-360	240-280
Нормальна густина цементного тіста, %	-	26,5	27,5
Строки тужавлення:			
початок, хв -	> 60	90-150	90-120
кінець год -	< 10	4,5-5	5-6

Продовження таблиці 2.13

Міцність у віці 2 доби, МПа: згин - стиск -	- > 15	3,2-4,2 18,0-25,0	3,0-4,2 15,0-25,0
Міцність у віці 28 діб, МПа: згин - стиск -	- > 50	6,0-6,8 50,0-55,0	5,5-6,6 50,0-52,5
Рівномірність зміни об'єму, мм	< 10	5	5
Вміст добавки гіпсу в перерахунку на SO ₃ ·, %	3,5	3,1	3,3

Характеристика хімічних добавок. В якості пластифікуючої добавки для виготовлення рухомих бетонних сумішей було використано **суперпластифікатор СП-1 (С-3) (ТУ5870-005-58042865-2005)** Новомосковського підприємства "Полипласт" – продукт конденсації нафталіносульфоокислот і формальдегіду, що вміщує суміш олігомерів ("активна речовина") і полімерів та сіль, що не прореагувала – β-нафталінсульфоокислоти і сульфату натрію. Вміст "активної речовини" в суперпластифікаторі складав не менше 69 %, зольність – не більше 38 %, рН водного розчину, концентрації 2,5 % – 7...9 (табл.2.14).

Таблиця 2.14 – Характеристика пластифікатора

Тип, марка	Хімічна основа	Клас, група по ДСТУ Б В.2.7-65-97	Фірма-виробник, країна
Розріджувач (суперпластифікатор) СП-1 (С-3)	Натрієва сіль продуктів конденсації нафталіносульфоокислоти і формальдегіду	I клас, I група	Новомосковський ООО «Полипласт», Росія

Суперпластифікатор СП-1 складається з комплексних добавок, об'єднаних для простоти і зручності вибору в товарні групи в залежності від особливостей і сфери застосування бетонних сумішей.

Застосування високоефективного суперпластифікатора СП-1 в технології виготовлення бетонних сумішей забезпечує по реологічним властивостями:

- отримання високорухливих і литих бетонних сумішей (П4, П5), що укладаються без вібрації;

- поліпшення легкоукладальності, зв'язності і однорідності бетонних сумішей;
- отримання водоредукуюча ефекту в бетонних сумішах (до 25% зниження витрати води); збільшення зберігання (життєздатності) бетонних сумішей на 1 - 1,5 години.

За техніко-економічними показниками:

- економію в'язучого (цемент) в бетонних сумішах на 15 - 20% без зниження міцності бетону;
- заміну ПЦ - 500 на ПЦ -400;
- скорочення енергетичних витрат при тепло-вологості обробці бетону;
- зниження трудовитрат в 2 - 3 рази (при В/Ц = const) при укладанні бетонних сумішей;
- зниження температури ізотермічного прогріву на 10 - 15 ° С (при В/Ц=const);
- поліпшення якості поверхні виробів, а також запобігання висолообразованія.

В якості пластифікатора також застосовували добавку німецького виробництва **Melflux 2651 F**. Загальна характеристика даної добавки наведена в табл.2.15.

Таблиця 2.15 – Загальна характеристика добавки Melflux 2651 F

Назва показника	Характеристика
Тип, марка	Розріджувач (суперпластифікатор) Melflux 2651 F
Склад і властивості	Порошковий продукт жовтого кольору, отриманий методом розпиленого сушіння на основі модифікованого поліефіркарбоксилату.
Насипна густина	350-600 г/л
Особливості	Високоєфективний диспергатор, знижує усадку, забезпечує високу ранню міцність
Дозування	0,05-0,5 мас. % від маси в'язучого (для ПЦ); 0,05-1,5 мас. % від маси в'язучого (для ПЦ/ГЦ).

В якості пластифікатора також застосовували **лігносуфонат технічний модифікований ЛСТМ** (ТУ 13 – 02811036 – 16).

2.1. Характеристика методів випробувань

2.1.1 Визначення властивостей бетонних сумішей бетону

Основні дослідження полягали у визначенні міцнісних властивостей, легкоукладальності, параметрів порової структури, в'язкості, електропровідності, часу проходження ультразвукових хвиль.

Визначення **міцності** матеріалу на стиск виконувалось згідно ДСТУ Б В.2.7-214:2009, а на згин згідно ДСТУ Б.В.2.7-187:2009 і полягало у вимірюванні мінімальних зусиль, що призводять до руйнування спеціально виготовлених контрольних зразків матеріалу при їх навантаженні з постійною швидкістю його зростання і наступному розрахунку напружень при цих зусиллях [148, 149].

Міцність матеріалу розраховується з точністю до 0,1 МПа (1 кгс/см²) при випробуваннях на стиск і до 0,01 МПа (0,1 кгс/см²) при випробуваннях на розтяг для кожного зразка за формулами:

$$\text{- на стиск:} \quad f_c = (\alpha \cdot F \cdot k_f) / A; \quad (2.2)$$

$$\text{- на розтяг при згині:} \quad f_{c,tf} = (3F \cdot l \cdot k_f) / (2a \cdot b^2), \quad (2.3)$$

де F - руйнівне навантаження, Н (кгс); A - площа робочого перерізу зразка, мм² (см²); l - відстань між опорами при випробуваннях зразків призм на розтяг при згині, мм (см); a - ширина поперечного перерізу призми зразка, мм (см); b - висота поперечного перерізу призми зразка, мм (см); α , - масштабний коефіцієнти для приведення міцності матеріалу до міцності в зразках базового розміру та форми; k_f - коефіцієнт, який враховує стан матеріалу та умови випробування.

Пористість матеріалу, тобто ступінь заповнення об'єму матеріалу порами розміром не більше 1...3 мм, визначалась згідно ДСТУ Б В.2.7-170:2008 за формулою [150]:

$$P = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_o} \right) 100, \quad (2.4)$$

де ρ_o - істинна густина матеріалу, г/см³.

Легкоукладальність (ДСТУ Б В.2.7-114-2002 (ГОСТ 10181-2000) - реолого-технологічний показник бетонної суміші, який характеризує здатність бетонної суміші заповнювати форму бетонованого виробу і ущільнюватися в ній під дією власної маси або механічних дій. Рухомість відображає здатність бетонної суміші, якою заповнена попередньо дана деяка умовна форма, наприклад правильного усіченого конуса, деформуватися під впливом власної

ваги, розпливаючись або осаджуючи і набуваючи іншої форми або зберігаючи її при інших розмірах.

Рухомість бетонної суміші вимірюють за допомогою стандартного металевого конуса, який заповнюють випробуваної сумішшю з пошаровим ущільненням. При обережному підйомі металеві форми бетонний конус осаджується під власною вагою. Якщо величина осадки конуса знаходиться в межах 1-4 см, то суміші відносять до малорухливим, 5-12 см - до рухомих і більше 12 см - до текучим (литим). При осадці конуса, що дорівнює нулю, суміш - жорстка, і тоді її легкоукладальність оцінюється за допомогою спеціального приладу для визначення умовного показника жорсткості.

Вимірювання вібровязкості η виконували на віскозиметрі Десова. Мета вимірювання полягала у фіксації часу спливання кульки сталої густини (10^3 кг/м^3) і діаметру (15 мм). У цьому випадку вібровязкість визначається за формулою:

$$\eta_v = k_k(\rho - \rho_k)t, \quad (2.5)$$

де k_k – константа приладу; ρ , ρ_k – значення густини досліджуваної системи і кульки, кг/м^3 , t – час спливання кульки, с.

Константу приладу визначали, використовуючи формулу Стокса для визначення в'язкості:

$$\eta = F/6\pi r v, \quad (2.6)$$

де F – виштовхувальна сила; r – радіус кульки; v – швидкість спливання у в'язкому середовищі.

Прирівнявши (2.7) та (2.8), замінивши при цьому радіус на діаметр, а v - на l/t , отримаємо рівняння для визначення константи приладу:

$$k = \frac{gd^2}{18l}. \quad (2.7)$$

Знаючи діаметр кульки й висоту l вибраної ємності, яку прийняли в дослідженнях 10 см, визначаємо $k = 1,226 \cdot 10^{-3}$.

Вимірювання в'язкості η і граничної напруги зсуву τ здійснювали ротаційним напівсферо-циліндричним віскозиметром РВ-8 м, основною особливістю якого є можливість урахування донних і кінцевих ефектів.

В'язкість матеріалу та напругу зсуву визначали за формулами:

$$\eta = k \frac{P - P_0}{N} t; \quad (2.8)$$

$$\tau = k' P, \quad (2.9)$$

де k , k' – константи приладу (за технічним описом приладу); N – число обертів; t – час за який відбувся N обертів; P – маса наважок; P_0 – холостий хід приладу.

Кінетика водопоглинання бетону, а також коефіцієнти, що характеризують середній розмір і однорідність відкритих капілярних пір, визначали відповідно до ДСТУ Б В.2.7-170:2008.

Водонепроникність бетону визначали відповідно ДСТУ Б В.2.7-170:2008 за методом "мокрої плями". Дослідження проводились на циліндричних зразках діаметром 150 мм і висотою 50 мм. Тиск води підвищують ступенями по 0,2 МПа протягом від 1 хв до 5 хв і витримують на кожному ступені протягом 6 год. Випробування проводять доти, поки на верхній торцевій поверхні зразка з'являться ознаки фільтрації води у вигляді крапель або мокрої плями. Водонепроникність кожного зразка оцінюють максимальним тиском води, за якого ще не спостерігалось її просочування крізь зразок. Водонепроникність серії зразків оцінюють максимальним тиском води, за якого на чотирьох із шести зразків не спостерігалось просочування води.

Визначення **морозостійкості** проводили на зразках кубах 10×10×10 см за другим методом згідно ДСТУ Б.В.2.7-49-96. Як критерій морозостійкості використовували коефіцієнт морозостійкості K_F , який представляє собою відношення міцності при стиску основних зразків через певну кількість циклів перемінного заморожування і відтавання (R_0) та міцності контрольних зразків (R_k).

Вимірювання часу проходження ультразвукових хвиль виконували за допомогою приладу УК-10П на частотах 60 кГц імпульсним методом з точністю $\pm(0,8...1)$ %, тобто 0,25...0,5 мкс. Вимірювання проводилося на свіжовідформованих складах із цементного тіста для зразків кубів 7,07×7,07×7,07 см у спеціально пристосованих формах. Виміри виконувались при твердінні зразків у нормальних умовах при постійній температурі $22 \pm 2^\circ\text{C}$ протягом 24 год. кожні 30 хв.

Час $t_{зв}$ і швидкість ультразвуку v визначали за формулами:

$$t_{зв} = f_2 - f_1; \quad (2.10)$$

$$v_y = l_6 t_{зв} = l_6 (f_2 - f_1), \quad (2.11)$$

де l_6 – базова довжина 7,07 см; $f_2 - f_1$ – різниця частот (або здвиг фаз), що рівна часу проходження ультразвуку через зразок.

2.1.2 Методологія досліджень із застосуванням методики планування експерименту

Дослідження високоміцного дрібнозернистого бетону на гранітному відсіві проводилось за такою схемою: на першому етапі розглядали вплив дисперсних

гранітних наповнювачів (частинок менших 0,16 мм та аспіраційного пилю) на реологічні властивості цементної пасти та на гідратацію та структуроутворення цементного каменю; далі вивчали властивості бетонних сумішей з гранітними відсівами, що містять дисперсні частинки (вплив складу бетону, кількості та дисперсності гранітних частинок, хімічних добавок); на третьому етапі вивчали вплив властивостей відсівів, гранітного наповнювача та добавок на міцність дрібнозернистого бетону та характеристики його довговічності; на завершальній стадії на основі отриманих кількісних залежностей було розроблено метод проектування складів високоміцного дрібнозернистого бетону, на відсівах подрібнення граніту.

При виконанні експериментальних досліджень використовувалось математичне планування експерименту (МПЕ), згідно якого проведення дослідів виконувалось за схемою, яка є оптимальною з точки зору об'єму експериментальних робіт і статистичних вимог.

Великий внесок в розвиток МПЕ, стосовно до технології бетону та залізобетону, здійснили Ю.М. Баженов, В.А. Вознесенський, В.А. Дорф, В.П. Сизов, В.М. Медведєв, Л.Й. Дворкін [151-154]. Планування експерименту передбачає вибір найбільш суттєвих факторів і межі їх варіювання для визначення вихідних параметрів, а також проведення дослідів за певним статистично оптимальним планом (матрицею планування), вид якого визначається передбачуваною залежністю. Фактори відображаються в кодових і натуральних значеннях. Для вивчення отриманих залежностей у широкому діапазоні зміни факторів застосовувались трирівневі та чотирирівневі плани для $k=1-3$.

Оскільки, проведення експерименту неодмінно пов'язане з помилками, внаслідок того, що отримані результати мають імовірний характер, а прийняті рівняння регресії не є їхньою копією, а лише відображають їх з певним ступенем імовірності, тому обов'язковим етапом під час проведення досліджень є статистичний аналіз математичних моделей. Основною метою якого є оцінка значимості коефіцієнтів рівнянь і перевірка їх адекватності.

Статистичний аналіз математичних моделей здійснювався на основі повторних дослідних даних на нульовому рівні.

Середньоарифметичне значення вихідного параметру визначалось за формулою:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_{oi}}{n} = \frac{y_{o1} + y_{o2} + \dots + y_{on}}{n}, \quad (2.12)$$

де y_{oi} - значення i -го нульового вихідного параметру; n - кількість повторних нульових точок.

Дисперсія відтворюваності вихідного параметру S_{ϵ}^2 визначалась за формулою:

$$S_{\epsilon}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{oi} - \bar{y}_o)^2}{n-1}. \quad (2.13)$$

Число степенів вільності дисперсії відтворюваності становить $f_{\epsilon} = n - 1$.

Похибка значень вихідного параметру визначалась за формулою:

$$\Delta y_u = \pm \frac{S_{\epsilon}}{\sqrt{n}} t_{1-p/2}, \quad (2.14)$$

де t - квантиль розподілу Стьюдента; p - довірча імовірність.

Дисперсія адекватності дослідних точок відносно математичної моделі S_a^2 визначалась за формулою:

$$S_a^2 = \frac{\sum_{u=1}^N (y_u - \bar{y}_u)^2}{N - m - (n - 1)}, \quad (2.15)$$

де y_u - дослідне значення параметра в u -ому рядку матриці; \bar{y}_u - розрахункове значення параметра в u -ому рядку матриці за математичною моделлю; N - кількість рядків матриці; m - кількість значимих коефіцієнтів в математичній моделі.

Число степенів вільності дисперсії відтворюваності становить $f_a = N - m - (n - 1)$.

Розрахункове значення критерію Фішера:

$$F_p = \frac{S_a^2}{S_{\epsilon}^2}. \quad (2.16)$$

Табличне значення критерію Фішера F_m визначалось в залежності від прийнятої довірчої імовірності та степенів вільності f_{ϵ} та f_a . В технології бетону довірча імовірність приймається рівною 95 % (90 %). Рівняння вважається адекватним, якщо $F_p < F_m$.

Похибка значень вихідного параметру отриманих за математичною моделлю визначалась за формулою:

$$\Delta \bar{y}_u = \pm \frac{S_a}{\sqrt{N}} t_{1-p/2}. \quad (2.17)$$

Статистичний аналіз результатів експериментів, розрахунок коефіцієнтів рівнянь регресії, побудова графічних залежностей, ізопараметричних аналіз моделей а також побудова номограм здійснювалась за допомогою спеціальних комп'ютерних програм, розроблених на кафедрі технології будівельних виробів і матеріалознавства НУВГП.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

1. Відсівні подрібнення гірських порід є найбільш розповсюдженим і крупнотонажним відходом каменеподрібнення, вихід яких становить близько 25% від маси вихідної сировини. На території Рівненської та сусідніх областей (Хмельницької та Житомирської) утворюються каменеоброблювальними підприємствами і накопичуються у відвалах відсівні граніту, грано-діориту та базальту. За зерновим складом основна маса відсівів являє собою подрібнений пісок з розмірами частинок від 0 до 5 мм з модулем крупності 2,8...3,6. У зв'язку з тим, що деякі підприємства виготовляють збагачені (фракціоновані) відсівні з розмірами зерен 0,63...2,5, 2,5...5 мм чи інших, відсівні можуть мати розмір частинок 0...0,63, 0...2,5 мм. В якості базових при виконанні досліджень прийняті гранітні відсівні ТОВ ККНК «Технобуд» Рівненській області;

2. Відсівні не відповідають вимогам ДСТУ БВ.2.7-32-95 як пісок для виготовлення бетону за вмістом пилюватих та глинистих частинок, а також зерен крупних фракцій.

3. В дослідженнях було використано аспіраційний пил систем пиловловлювання каменеподрібнювальних підприємств. Частинки відсівів розміром менше 0,16 мм та пил аспіраційних систем являють собою дисперсну фракцію вихідної породи. Питома поверхня частинок менше 0,16 мм 2200...2400 см²/г, аспіраційний пил - від 2400 до 7200 см²/г, залежно від типу системи пиловловлювання. Вміст глинистих речовин у пилюватих частинках відсівів та аспіраційного пилу у межах норми, встановленої до заповнювачів бетонів.

4. Результати седиментаційного аналізу свідчать, що частинки відсівів менше 0,16 мм складається переважно з крупних частинок, котрі можуть виступати в якості інертного наповнювача цементних бетонів. Вміст дисперсних частинок, які можуть мати значну кількість активних центрів, та сприяти прискоренню зародження кристалів новоутворень (більше 40...45%). Аспіраційний пил представлений переважно частинками розміром менше 0,08...0,03 мм.

5. В дослідженнях використовувався портландцемент типів ПЦ-І та ПЦ-ІІ-А-Ш Здолбунівського цементного заводу («Волинь-цемент»), який можна віднести до нормальних середньоалюмінатних цементів 2-ї мінералогічної групи. Такі цементи характеризуються досить інтенсивним твердінням як при нормальних умовах, так і при тепловій обробці.

6. В роботі використані хімічні добавки до бетону лігносульфонатного, нафталін-формальдегідного та полікарбоксилатного типів, які є сертифікованими в Україні.

7. Дослідження проводили у 4 етапи: спочатку вивчали процеси структуроутворення цементного каменю з гранітним наповнювачем, далі досліджували властивості бетонних сумішей з гранітними відсівали та хімічними добавками, потім вивчали вплив будівельно-технічні властивості, а також проводилась розробка методик проектування складів бетону і впровадження результатів досліджень у виробництво.

8. При визначенні основних властивостей бетону використовували переважно стандартні методики, крім того були застосовані хімічні та фізичні методи та метод експериментально-статистичного планування.

РОЗДІЛ 3

ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМЕНЮ, НАПОВНЕНОГО ДИСПЕРСНИМИ КАМ'ЯНИМИ ЧАСТИНКАМИ

3.1. Вивчення кінетики зміни реологічних властивостей цементних паст з дисперсним гранітним наповнювачем

В процесі структуроутворення наповненого цементного каменю важливе значення має стадія формування коагуляційної структури. Відзначається залежність між початковою (коагуляційною) і кінцевою (кристалізаційною) міцністю структури [99]. За кінетикою зміни реологічних і структурно-механічних параметрів цементних паст можна кількісно й якісно оцінити вплив мінеральних наповнювачів на протікання процесу.

Виконано дослідження кінетики зміни структурно-механічних і реологічних властивостей цементних паст із застосуванням частинок $<0,16$ гранітного відсіву з $S_{\text{пит}}=2300$ см²/г. Для оцінки впливу дисперсності гранітних частинок на властивості цементних паст та їх структуроутворення в досліджах використовували також гранітний аспіраційний пил з рукавних фільтрів з $S_{\text{пит}}=7000$ см²/г. У якості пластифікуючої добавки використовували суперпластифікатор СП-1.

Вихідними параметрами були: в'язкість гранично зруйнованої структури η , Па·с; гранична напруга зсуву τ , Па; динамічна вібровязкість η_v , Па·с. Результати досліджень зображені на рис. 3.1-3.6 Крім того, визначали швидкість проходження ультразвуку й питому електропровідність цементного тіста. Аналізуючи отримані дані кінетики зміни реологічних властивостей цементних паст із гранітним наповнювачем і суперпластифікаторами в цілому, можна зробити висновок, що процес гідратації відбувається за відомою схемою: виникнення колоїдної структури й розвиток на її основі конденсаційно-кристалізаційної структури [155]. Тривалість стадій і характер зміни властивостей цементних паст залежить від виду наповнювача, параметрів складу, наявності поверхнево-активних речовин, часу від моменту замішування й моменту коли піддається зовнішній дії.

Таблиця 3.1 – Склади композицій при дослідженні кінетики зміни реологічних властивостей

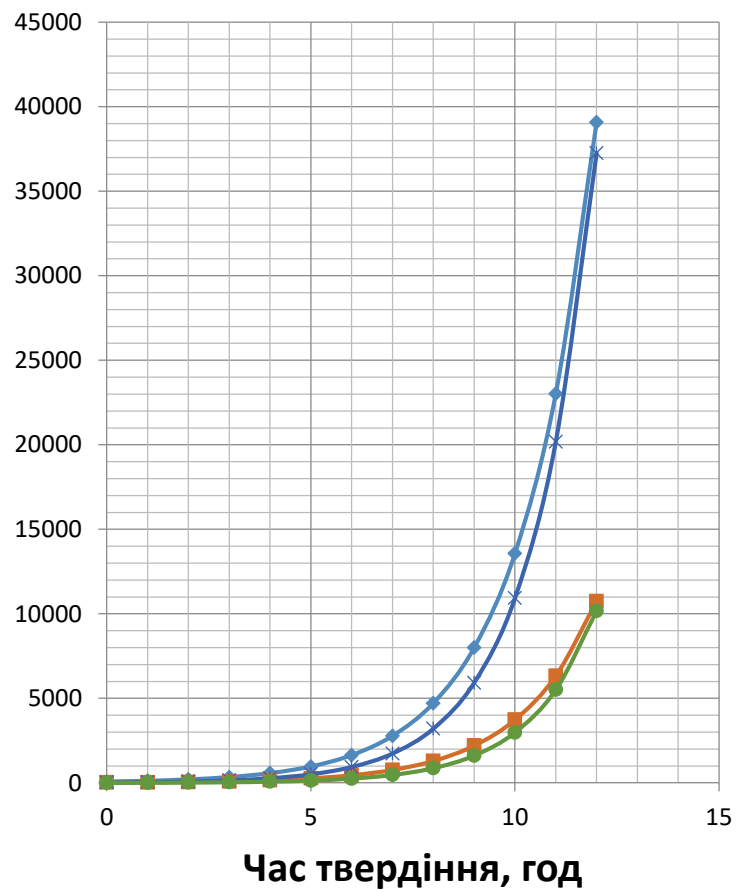
№ т. п.	Склад в'язучого, %		Водов'язуче відношення	Вміст суперпластифікатора, %
	Цемент	Наповнювач		
1.	100	0	0,23	1
2.	100	0	0,23	0
3.	100	0	0,44	1
4.	100	0	0,44	0
5.	50	50	0,23	1
6.	50	50	0,23	0
7.	50	50	0,44	1
8.	50	50	0,44	0

Вплив суперпластифікатора на цементні пасти описано в [14, 156], мінеральних добавок - в [80], однак їх сумісний вплив на реологічні властивості вивчено недостатньо.

Суперпластифікатори дещо сповільнюють період формування структури цементного каменю в порівнянні з вихідними пастами в умовах однакового водовмісту. У випадку забезпечення однакової консистенції в зв'язку з тим, що суперпластифікатори значно знижують водовміст, процес формування структури може прискорюватися в порівнянні з контрольним. Є дані, коли й у цьому випадку спостерігається деяке уповільнення початку тужавлення із подальшим наростанням темпів структуроутворення. Більшість дослідників строки тужавлення пластифікуючого цементного тіста пов'язують із тонкістю помелу вихідного цементу, його хіміко-мінералогічним складом.

Зі збільшенням вмісту C_3A процес тужавлення прискорюється, а збільшення вмісту C_2S призводить до уповільнення процесу. При постійному початковому водовмісті введення наповнювачів сприяє росту структурної міцності, особливо в початковий момент тужавлення, потім процес сповільнюється й до добового віку починає відставати в порівнянні з контрольними пастами [80, 157].

Вібров'язкість, Па·с



Вібров'язкість, Па·с

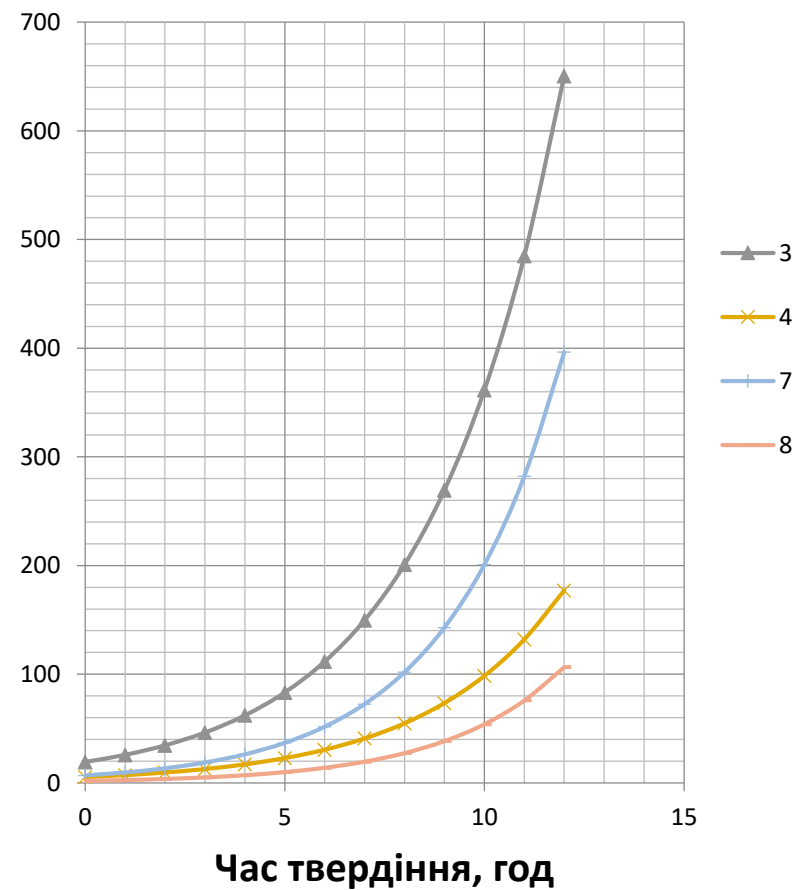
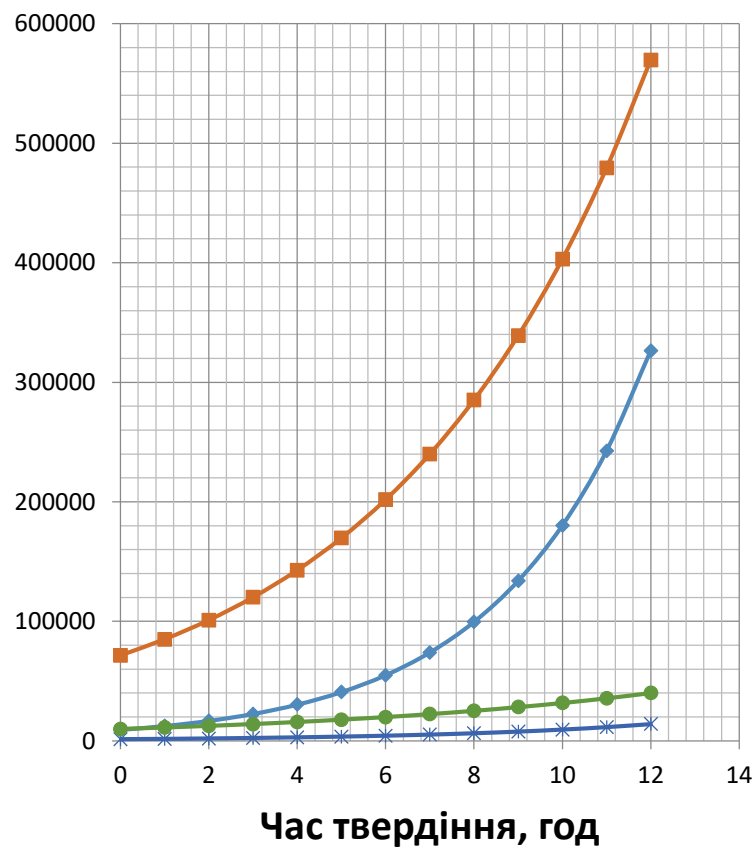


Рисунок 3.1 – Кінетика зміни вібров'язкості цементного тіста, наповненого частинками відсівів розміром менше 0,16 мм

Напруження зсуву, Па



Напруження зсуву, Па

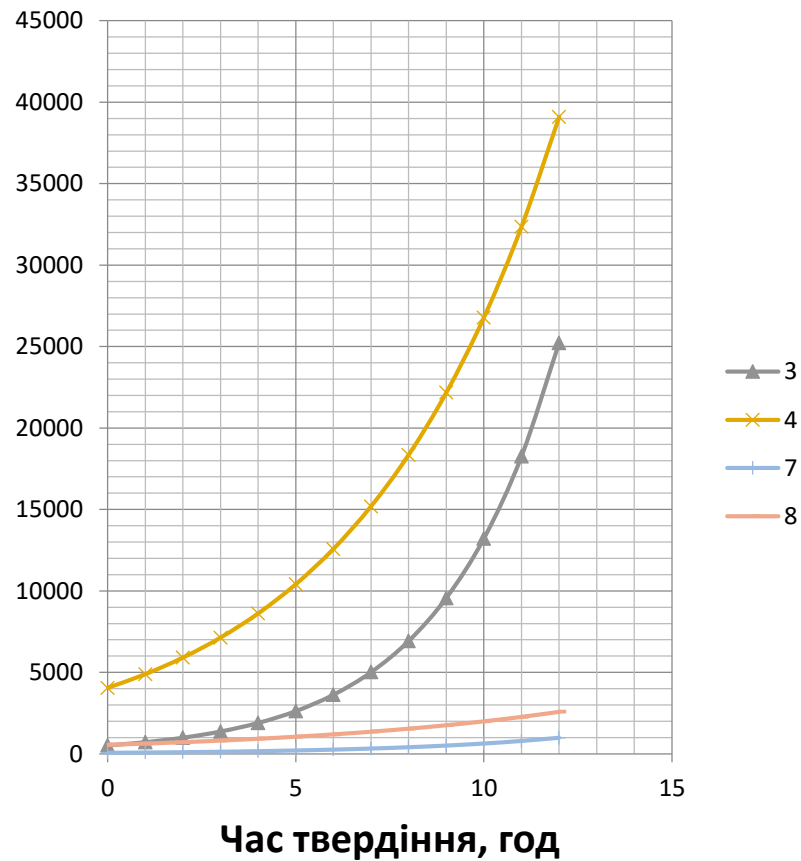


Рисунок 3.2 – Кінетика зміни напруження зсуву цементного тіста, наповненого частинками відсівів розміром менше 0,16 мм

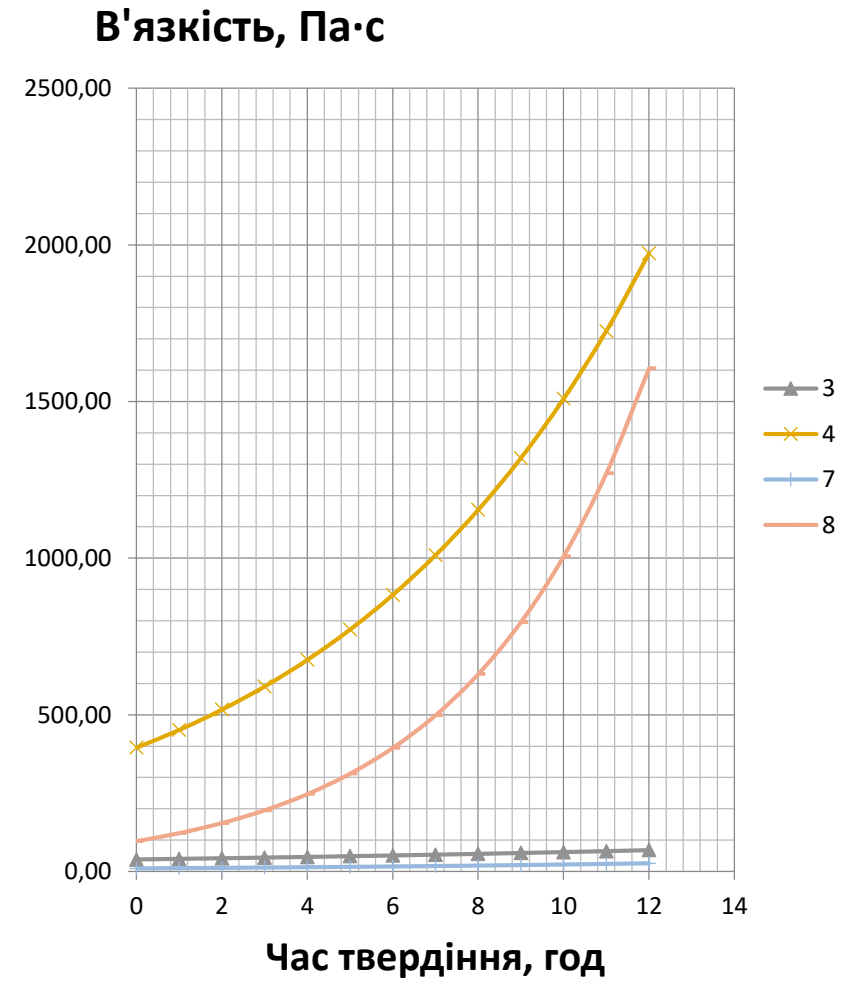
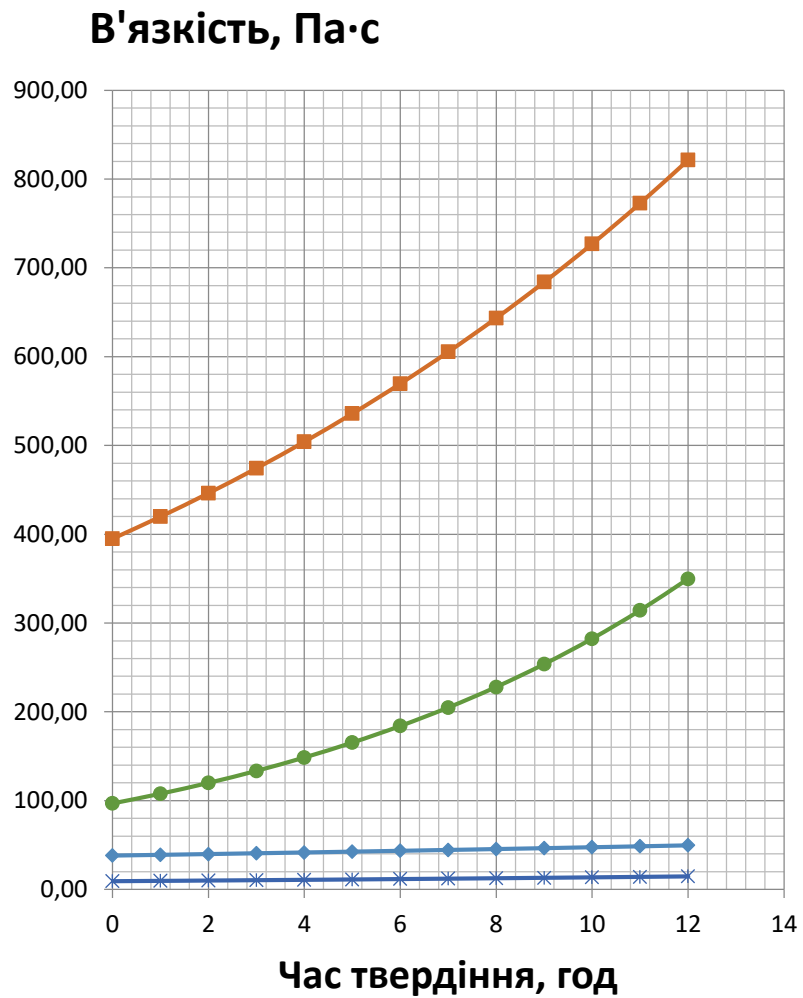


Рисунок 3.3 – Кінетика зміни в'язкості цементного тіста, наповненого частинками відсівів розміром менше 0,16 мм

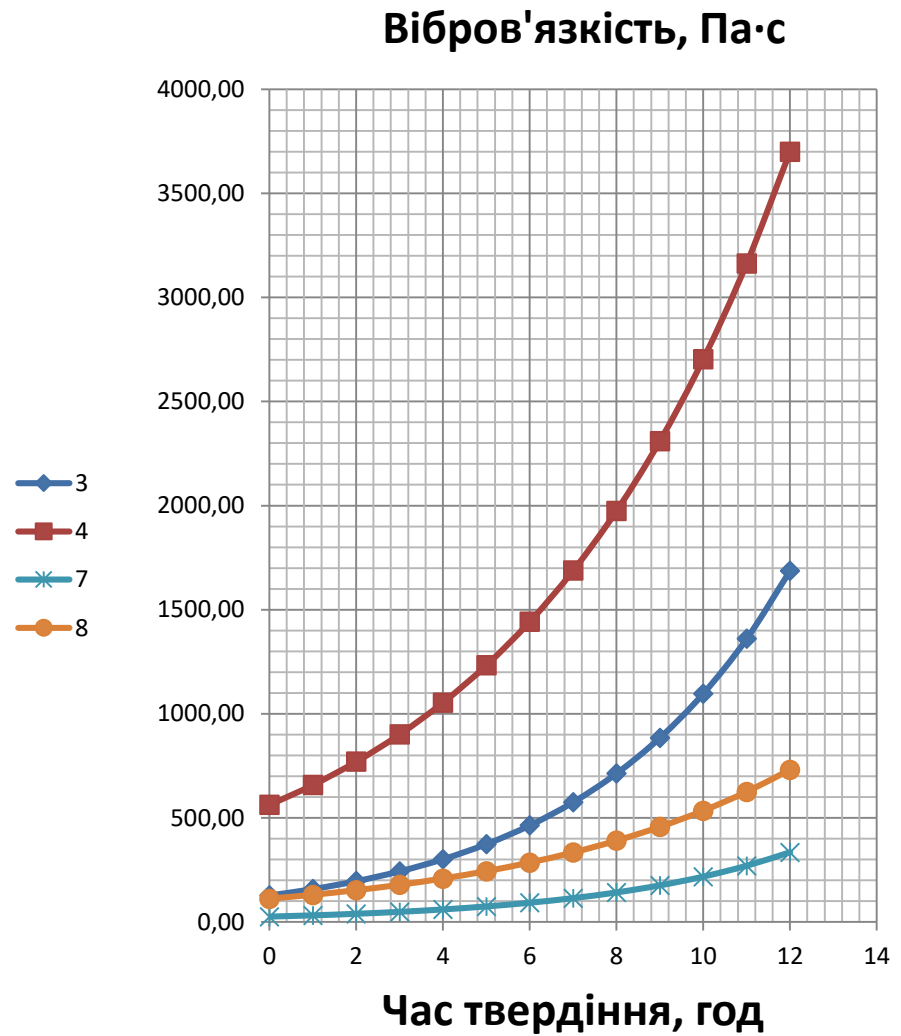
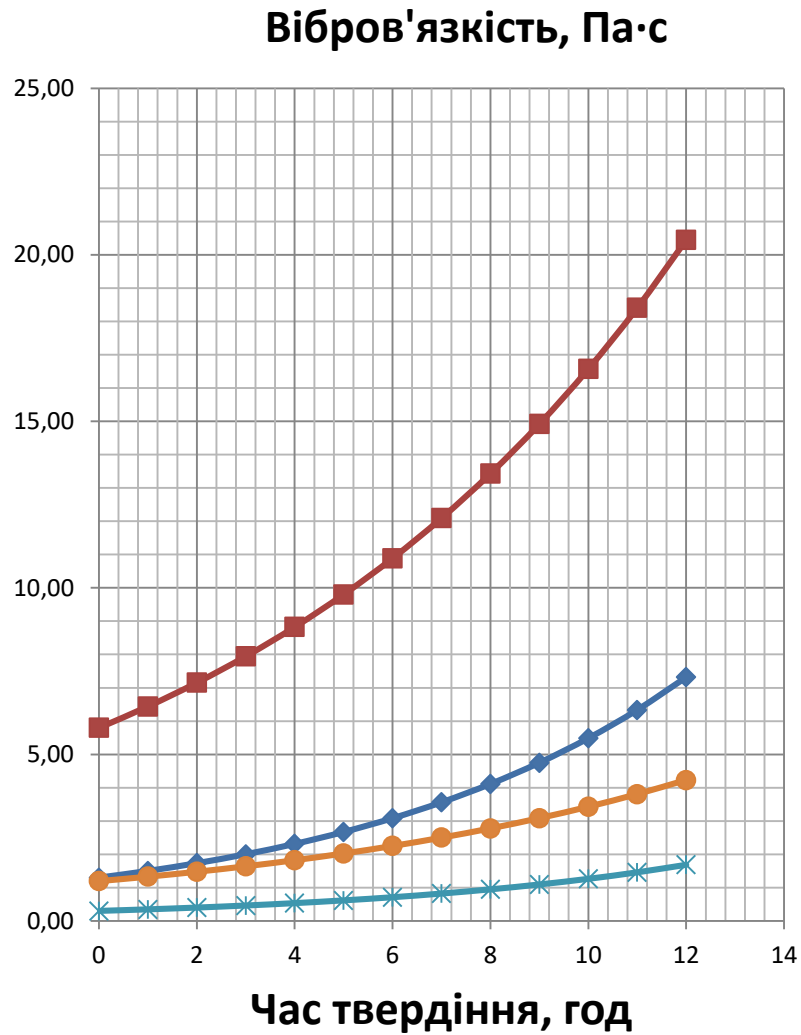


Рисунок 3.4 – Кінетика зміни вібров'язкості цементного тіста, наповненого частинками аспіраційного пилу

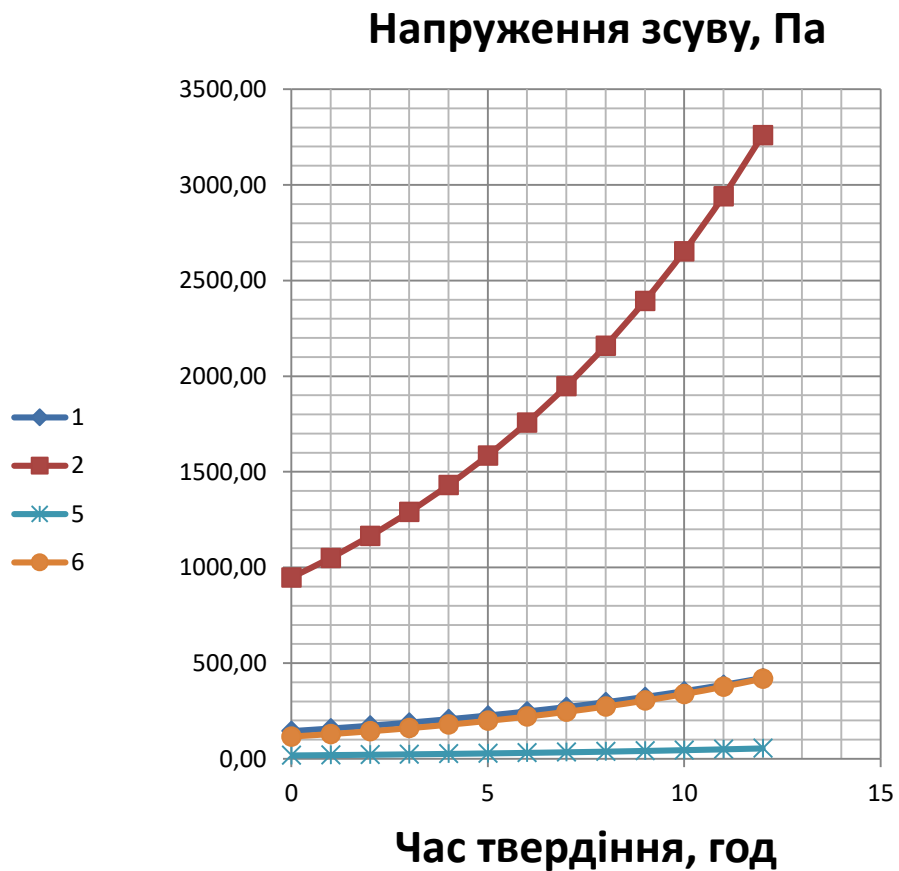
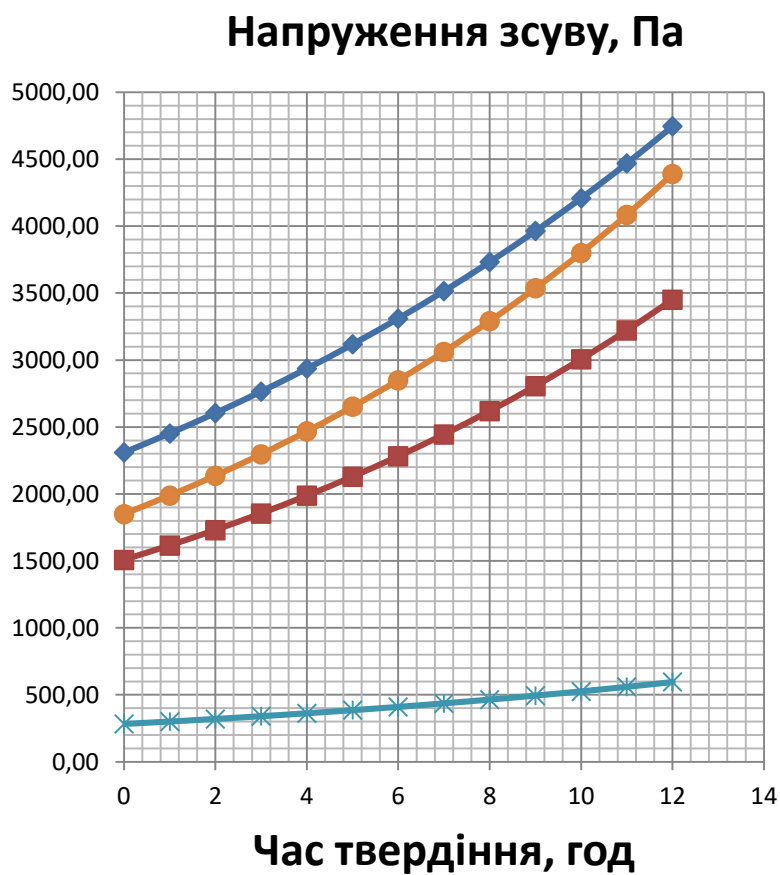


Рисунок 3.5 – Кінетика зміни напруження зсуву цементного тіста, наповненого частинками відсівів розміром менше 0,16 мм

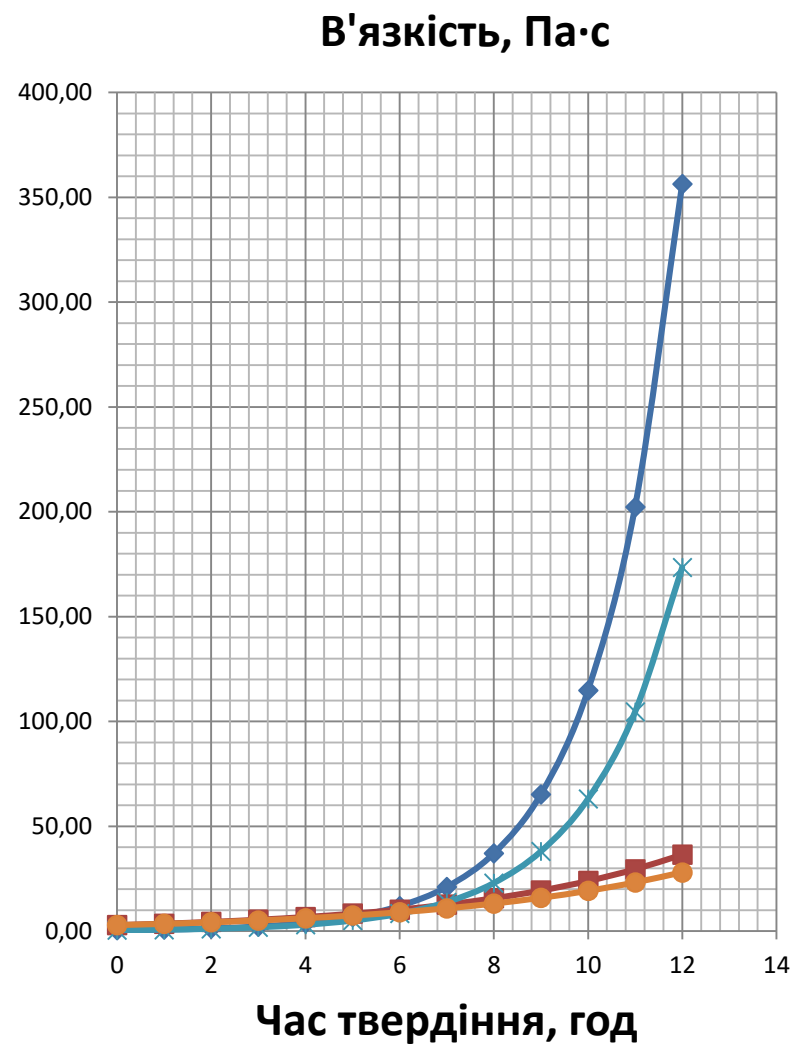
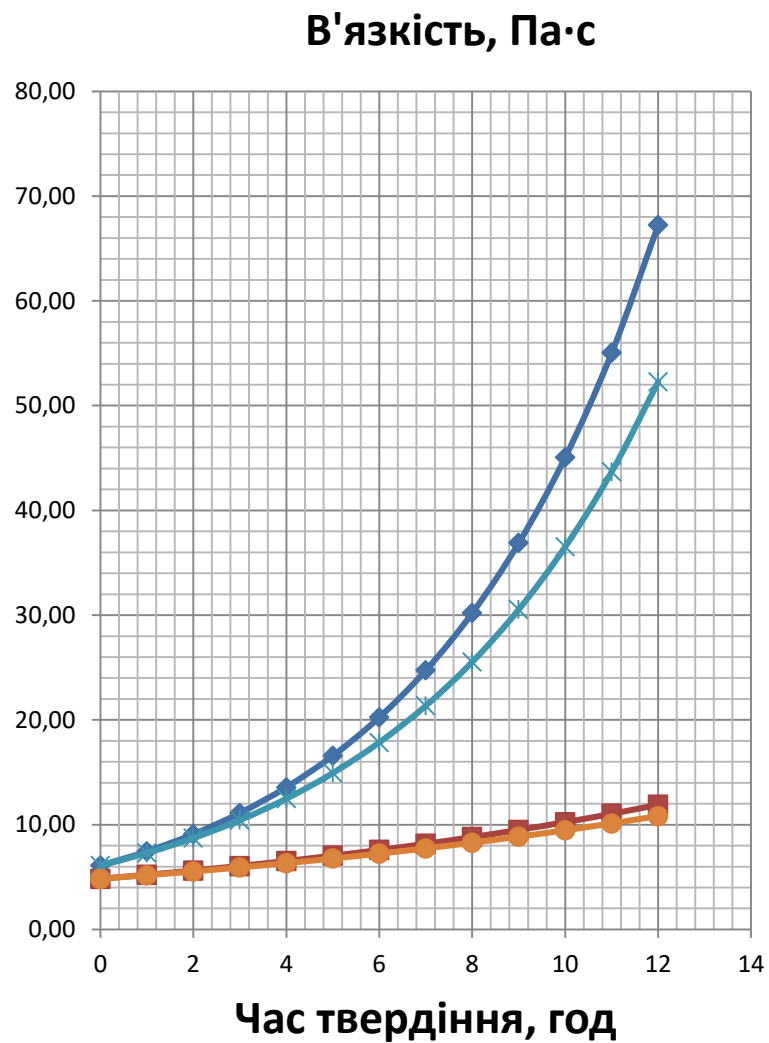


Рисунок 3.6 – Кінетика зміни в'язкості цементного тіста, наповненого частинками аспіраційного пилу

При забезпеченні однакової консистенції наповнені пасти характеризуються, у більшості випадків, значним водовмістом. При цьому процеси тужавлення суттєво уповільнюються [157]. Однак є дані, що вказують на уповільнення періоду тужавлення із подальшим наростанням темпів структуроутворення.

Аналіз даних дає змогу стверджувати, що характер зміни реологічних параметрів η_v , τ і η від вмісту твердої фази та суперпластифікатора для досліджених наповнювачів залишається практично таким же, як для ненаповнених цементних систем. Зі збільшенням об'ємної концентрації твердого компоненту - показники η_v , τ і η зростають, а з підвищенням об'ємної концентрації суперпластифікатора у розчиннику - різко зменшуються.

Для цементних паст із аспіраційним пилом спостерігаються наступні залежності. Зі збільшенням концентрації аспіраційного пилу має місце значний ріст граничного напруження зсуву τ і в'язкості η_v . При більшому наповненні значення τ і η_v залишаються постійними й такими ж, як для контрольного складу без аспіраційного пилу. При збільшенні ступеня наповнення гранітними частинками спостерігається деяке падіння в'язкості гранично зруйнованої структури η . Така поведінка наповнених цементних паст показує, що вони мають більш виражені тиксотропні властивості. При прикладанні меншого навантаження, що викликає граничне руйнування структури, цементні пасти з аспіраційним пилом володіють сіткою коагуляційних контактів більш високої міцності. Коли зовнішнє навантаження руйнує структуру паст, цементна система з аспіраційним пилом стає більш текучою в порівнянні з ненаповненими.

Поведінка цементних паст із більш крупними, порівняно з аспіраційним пилом, частинками гранітних відсівів $<0,16$ мм, за подібна, однак її вплив у меншій мірі помітний. За зміною η_v , пасти, що містять даний вид наповнювача, суттєво відрізняються від паст із аспіраційним пилом. При наповненні цементу частинками гранітних відсівів $<0,16$ мм, пасти на їх основі в умовах вібрації володіють меншою в'язкістю порівняно з контрольними ненаповненими.

Відповідно до отриманих даних кількість аспіраційного пилу не впливає на абсолютне значення η . У випадку наповнення цементу пилом в'язкість залежить від зміни початкового водовмісту та вмісту суперпластифікатора (рис. 3.6).

Вплив аспіраційного пилу проявляється в деякому підвищенні в'язкості. Щоб усунути цей небажаний процес, необхідно підвищувати витрату води або суперпластифікатора. Аналогічні тенденції спостерігаються й у випадку застосування частинок $<0,16$ гранітних відсівів (рис. 3.3).

Розглянемо питання про сумісний вплив гранітного наповнювача та його дисперсності, на реологічні властивості цементного тіста, особливо що містить суперпластифікатор.

З використанням методу статистичного планування експериментів [154] отримані рівняння, що характеризують відповідно діаметр розпливу тіста (ДР) й логарифм ефективності в'язкості ($\ln \eta$). Умови планування та результати експерименту наведені в табл. 3.2 та 3.3.

Таблиця 3.2 – Умови планування експерименту

Фактори		Рівні варіювання факторів			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
Вміст В/(Ц+ГН)	X_1	0,24	0,28	0,32	0,04
Вміст гранітного наповнювача в суміші з цементом (% за масою)	X_2	20	40	60	20
Вміст суперпластифікатора СП-1, %	X_3	0,6	0,8	1	0,2
Питома поверхня ГН, $S_{пит}$, см ² /г	X_4	2300	4700	7000	2300

Рівняння регресії:

$$\text{ДР} = 27,04 + 2,86X_1 - 1,02X_4 - 2,29X_1^2 + 0,93X_1X_4 + 0,45X_2^2 - 0,45X_2^2 - 1,25X_2X_4 + 0,2X_3^2 + 0,7X_4^2 \quad (3.1)$$

$$\ln \eta = 3,24 - 1,03X_2 + 0,53X_4 + 0,48X_1^2 - 0,18X_1X_4 - 0,05X_2^2 - 0,19X_2X_4 - 0,16X_3^2 + 0,3X_4^2. \quad (3.2)$$

В результаті аналізу математичних моделей (3.1, 3.2) побудовані діаграми для діаметру розпливу та ефективної в'язкості (рис. 3.7, 3.8). Як видно з діаграм, пластифікуючий ефект гранітного наповнювача і його вплив на значення ефективної в'язкості не можуть бути однозначно обумовлені введенням у цементне тісто кількості гранітного наповнювача з добавкою суперпластифікатора, а в значній мірі залежить від дисперсності аспіраційного пилу. Так, зміна вмісту гранітного наповнювача від 20 до 60% при $S_{пит}=2300$ см²/г призводить до збільшення рухомості на 2 см і зменшенню ефективної в'язкості; при $S_{пит}=4700$ см²/г збільшення вмісту гранітного наповнювача в невеликій кількості не призводить до зміни рухомості і ефективної в'язкості; при $S_{пит} = 7000$ см²/г

спостерігається падіння рухомості і збільшення ефективної в'язкості. Вплив дисперсності на досліджувані характеристики відзначається в значній мірі при збільшенні вмісту гранітного наповнювача в цементному тісті. Так, при вмісті гранітного наповнювача в кількості 20 % зміна його дисперсності від 2300 до 7000 $\text{см}^2/\text{Г}$ призводить до збільшення ефективної в'язкості, рухомість тіста при цьому практично не змінилася, при 60 % - ріст ефективної в'язкості проявляється ще в більшій мірі, рухомість при цьому падає.

Отже, можна зробити висновок, що рухомість і ефективна в'язкість цементного тіста з гранітним наповнювачем перебувають у безпосередній залежності як від кількісного вмісту, так і від його дисперсності. Такі залежності обумовлені зміною водопотреби пилу при збільшенні його питомої поверхні (при $S_{\text{пит}} = 2400 \text{ см}^2/\text{Г}$ НГ дорівнює 16,75 %, при $S_{\text{пит}} = 4700 \text{ см}^2/\text{Г}$ - 25,25 % і при $S_{\text{пит}} = 7000 \text{ см}^2/\text{Г}$ - 28,25 %) і, як наслідок, - неоднозначним ефектом при введенні його в цементне тісто в різних кількостях.

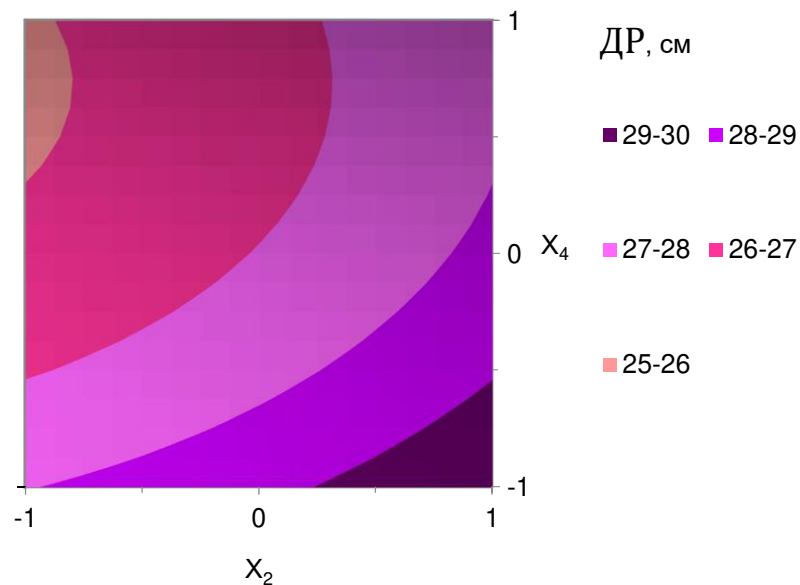
Таблиця 3.3 – Матриця планування та результати експерименту по визначенню реологічних властивостей цементного тіста з гранітним наповнювачем

№ д. т.	Кодовані значення факторів				Натуральні значення факторів				Вихідні параметри	
	X_1	X_2	X_3	X_4	В/(Ц+ГН)	ГН	СП-1, %	$S_{\text{пит}}$, $\text{см}^2/\text{Г}$	ДР, см	η , Па·с
1.	1	1	1	1	0,32	60	1	7000	27,6	2,9
2.	1	1	1	-1	0,32	60	1	2400	30,3	2,6
3.	1	1	-1	1	0,32	60	0,6	7000	27,6	2,9
4.	1	1	-1	-1	0,32	60	0,6	2400	30,3	2,6
5.	1	-1	1	1	0,32	20	1	7000	30,1	5,4
6.	1	-1	1	-1	0,32	20	1	2400	27,8	4,3
7.	1	-1	-1	1	0,32	20	0,6	7000	30,1	5,4
8.	1	-1	-1	-1	0,32	20	0,6	2400	27,8	4,3
9.	-1	1	1	1	0,24	60	1	7000	20,0	3,3
10.	-1	1	1	-1	0,24	60	1	2400	26,4	2,3
11.	-1	1	-1	1	0,24	60	0,6	7000	20,0	3,3
12.	-1	1	-1	-1	0,24	60	0,6	2400	26,4	2,3
13.	-1	-1	1	1	0,24	20	1	7000	22,5	5,7

Продовження таблиці 3.3

14.	-1	-1	1	-1	0,24	20	1	2400	23,9	3,9
15.	-1	-1	-1	1	0,24	20	0,6	7000	22,5	5,7
16.	-1	-1	-1	-1	0,24	20	0,6	2400	23,9	3,9
17.	1	0	0	0	0,32	40	0,8	4700	27,6	3,7
18.	-1	0	0	0	0,24	40	0,8	4700	21,9	3,7
19.	0	1	0	0	0,28	60	0,8	4700	27,5	2,2
20.	0	-1	0	0	0,28	20	0,8	4700	27,5	4,2
21.	0	0	1	0	0,28	40	1	4700	27,2	3,1
22.	0	0	-1	0	0,28	40	0,6	4700	27,2	3,1
23.	0	0	0	1	0,28	40	0,8	7000	26,7	4,1
24.	0	0	0	-1	0,28	40	0,8	2400	28,8	3,0

На збільшення рухомості цементного тіста з гранітним наповнювачем та підвищення значення його ефективної в'язкості впливає й добавка ПАР. Згідно [88], пластифікуючі добавки руйнують цементні флокули й виконують стабілізуючу дію, що перешкоджає розшаруванню цементних композицій в результаті седиментаційних явищ. Разом з тим є дані [88] про те, що суперпластифікатори практично не змінюють текучість тіста, тому що не забезпечують диспергування великих конгломератів гранітного наповнювача.



Риунок 3.7 – Залежність рухомості наповненого цементного тіста від питомої поверхні та дозування гранітного наповнювача

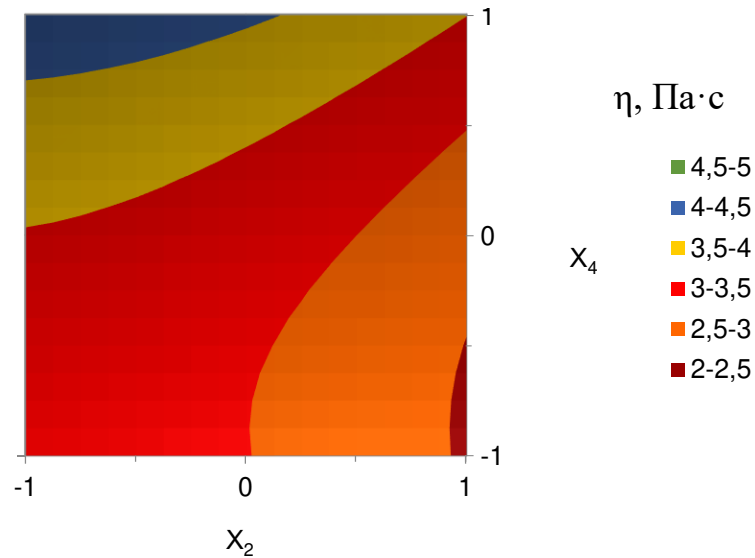


Рисунок 3.8 – Залежність в'язкості наповненого цементного тіста від питомої поверхні та дозування гранітного наповнювача

Результати виконаної роботи дають можливість встановити, що, підвищення дозування суперпластифікатора СП-1 у досліджуваних інтервалах призводить до практично невідчутної зміни рухомості і ефективної в'язкості, що підтверджує доцільність вибору оптимальної кількості добавки для цементного тіста з гранітним наповнювачем.

Важливий вплив на зміну рухомості й ефективної в'язкості цементного тіста з гранітним наповнювачем виконує відношення $V/(Ц+ГН)$, з ростом якого відбувається підвищення рухомості й зниження ефективної в'язкості.

3.2. Дослідження структуроутворення цементного каменю з дисперсним гранітним наповнювачем

Аналіз результатів попередніх експериментів дає можливість відмітити, що спільний вплив суперпластифікатора та мінеральних наповнювачів (в якості якого використаний аспіраційний пил та частинки $<0,16$ гранітних відсівів) на тривалість і характер процесів структуроутворення цементних паст визначається концентрацією цих компонентів.

При застосуванні аспіраційного пилу в умовах постійного водовмісту і витрати суперпластифікатора період формування структури цементного тіста при переході в коагуляційно-кристалізаційну фазу суттєво збільшується. Наприклад, при заміні 50% цементу аспіраційним пилом цей період перевищує 14 год. Скоротити час тужавлення можна, якщо об'ємна концентрація наповнювача в змішаному в'язучому не перевищує 23...24 %.

Строки тужавлення паст із частинками $<0,16$ гранітних відсівів трохи збільшуються в порівнянні з контрольними. Лише у випадку підвищеного вмісту

цього наповнювача процес прискорюється й становить 6...6,5 год. Як і слід було очікувати, найбільший період формування структури характерний для випадків високого водовмісту або витрати суперпластифікатора, а найменший - для мінімального водовмісту чи відсутності суперпластифікатора.

Кінетику формування коагуляційної структури і її перехід до кристалізаційної досліджували за зміною часу проходження ультразвуку, питомою електропровідністю та зміною реологічних параметрів.

Аналізуючи отримані результати (рис. 3.9-3.11), можна відмітити, що склади цементних паст, що містять досліджені наповнювачі за кінетикою набору структурної міцності свідчать про пружні властивості тіста на ранніх стадіях гідратації. Перегини кривих свідчать про втрату пластичності тіста.

Для складів, що не містять наповнювача, процеси формування коагуляційної сітки й кристалоутворення розпочинаються одночасно, тоді як у наповненому цементному тісті, кристалоутворення відбувається з певним уповільненням.

Вивчення кінетики електропровідності цементних паст із досліджуваними наповнювачами дало можливість встановити (рис. 3.9, рис. 3.10), що найбільшу електропровідність, чого і слід було очікувати, мають склади з максимальною концентрацією цементу при постійному водовмісті. Збільшення концентрації суперпластифікатора при інших рівних умовах суттєво не змінює електропровідності. Всі криві мають чітко виражений максимум електропровідності, що випереджає початок тужавлення в середньому на 30 хв.

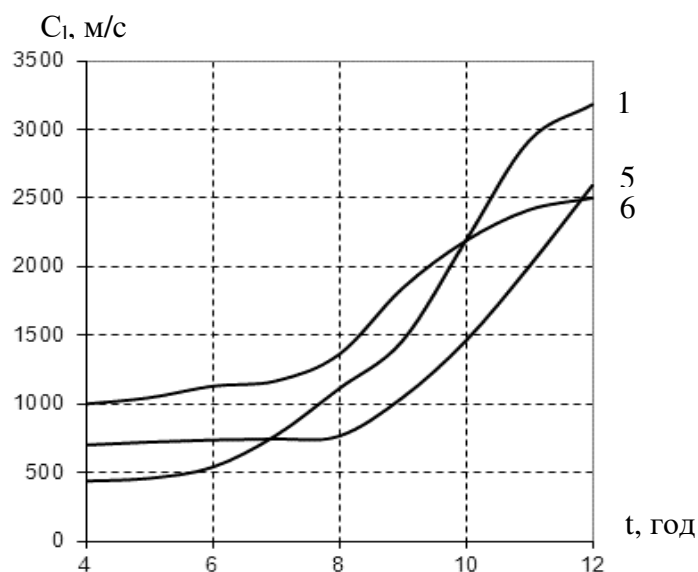


Рисунок 3.9 – Залежність швидкості проходження поздовжніх ультразвукових хвиль (C_l) від часу твердіння цементних паст із аспіраційним пилом: 1, 5, 6- позиції за табл. 3.1

Ріст електропровідності в початковий період пов'язаний зі підвищенням концентрації струмопровідних іонів у одиниці часу по мірі збільшення розчинності цементних мінералів. Цей процес проходить, імовірно, по експоненті від часу. Падіння електропровідності обумовлене, з одного боку, зв'язуванням іонів - носіїв струму, а з іншого боку - зв'язуванням молекул води при гідратації. Цей процес може бути також описаний експонентою. Враховуючи те, що портландцемент відноситься до полімінеральної системи з різною розчинністю мінералів, можливе підвищення електропровідності і поява додаткових максимумів.

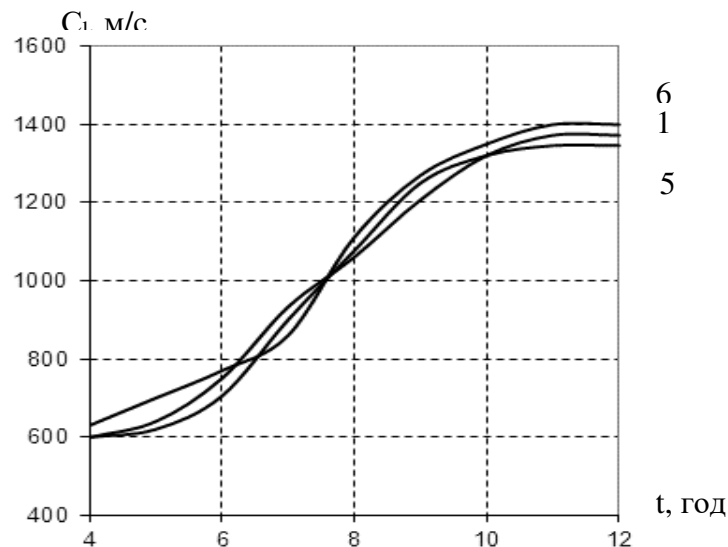


Рисунок 3.10 – Залежність швидкості проходження поздовжніх ультразвукових хвиль (C_t) від часу твердіння цементних паст із частинками $<0,16$ гранітних відсівів:
1, 5, 6- позиції за табл. 3.1

Слід відзначити, що із застосуванням аспіраційного пилу та частинок $<0,16$ гранітних відсівів, зафіксувати чіткий перехід кривих (рис. 3.11) у горизонтальну ділянку, не вдалося.

У теоретичному аспекті це явище до кінця ще не вивчено. Можна вважати, що воно пов'язане з переходом провідності від електроосмоса до електрофорезу [14]. Дійсно, в період, коли ще не сформувався твердий каркас, перенос зарядів в рідкій фазі, здійснюється переважно за рахунок руху іонів. В подальшому з формуванням кристалічного каркасу утворюється твердий камінь, у якому рух зарядів здійснюється переносом рідини.

Можна припустити, що в умовах наповнення даний процес носить більше плавний характер переходу електроосмосу в електрофорез. При введенні в цементне тісто аспіраційного пилу характерне зменшення електропровідності в перший період часу після досягнення максимуму, тобто зв'язування

струмопровідних іонів у таких системах (рис. 3.11), проходить менш інтенсивно, ніж у ненаповнених. В подальшому електропровідність досягає рівня цього показника контрольного складу.

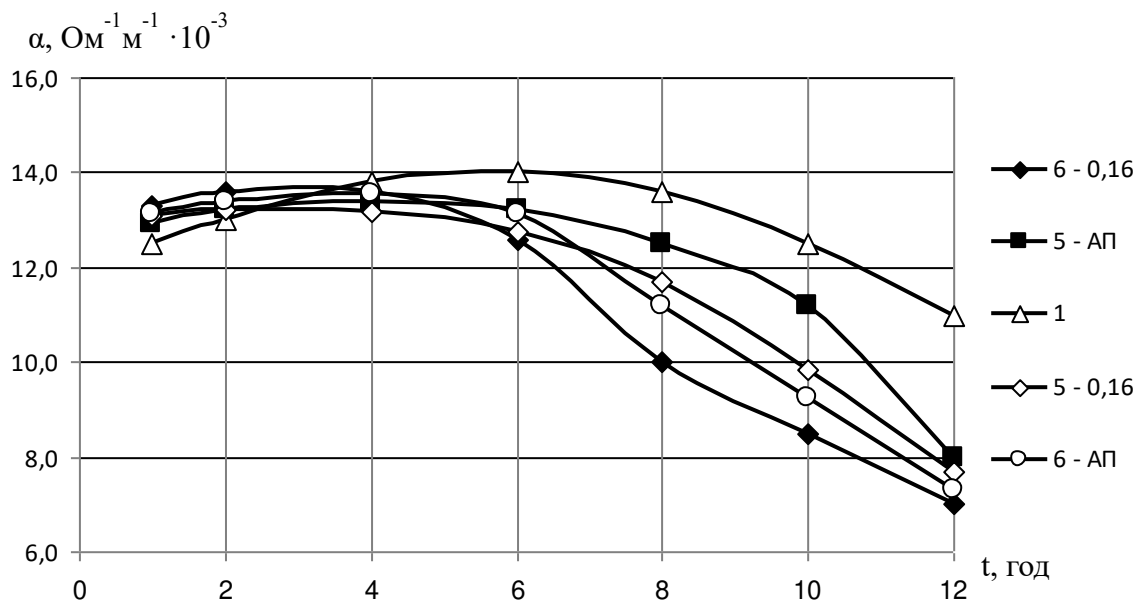


Рисунок 3.11 – Кінетика зміни електропровідності цементних паст наповнених гранітними частинками (позиції за табл. 3.1 з різними наповнювачами):

0,16 – частинки <0,16 мм гранітних відсівів;

Характер впливу частинок <0,16 гранітних відсівів показує, що ці частинки підвищують (хоча й несуттєво) пластичність сумішей, особливо в початковий період.

3.3. Особливості гідратації та формування порової структури цементного каменю з гранітним наповнювачем

У попередньому розділі було показано, що введення дисперсного гранітного наповнювача інтенсифікує процеси утворення коагуляційної структури цементного тіста та кристалічної структури цементного каменю. Важливим питанням, що показує ефективність використання активних наповнювачів у бетоні є їх вплив на процеси гідратації цементного каменю.

Вивчення особливостей гідратації цементного каменю з гранітним наповнювачем було виконано шляхом вивчення кінетики зміни ступеня гідратації цементного каменю та його міцності. Кінетика зміни ступеня гідратації характеризує кількість води, яка зв'язується цементом в процесі твердіння у гідросилікати та гідроалюмінати кальцію. Показник ступеня гідратації (α) був визначений за методикою [158] у різному віці твердіння зразків. Степінь гідратації

визначали за кількістю води, що не піддається випаровуванню. У цьому ж віці визначалась міцність цементного каменю. Результати визначення даних характеристик наведені у табл. 3.4 та на рис. 3.12.

Таблиця 3.4 – Кінетика гідратації цементного каменю з гранітним наповнювачем

№ дослідю	Склад композиції		В/Ц	Ступінь гідратації (α , %) цементного каменю у віці, діб			
	Ц:Н (за масою)	Вміст суперпластифікатора Melflux 2141f, % від цементу		1	3	7	28
1	1:0	-	0,28	0,48	0,56	0,60	0,64
2	1:1	-	0,36	0,50	0,57	0,58	0,60
3	1:1	0,5	0,24	0,54	0,61	0,67	0,76

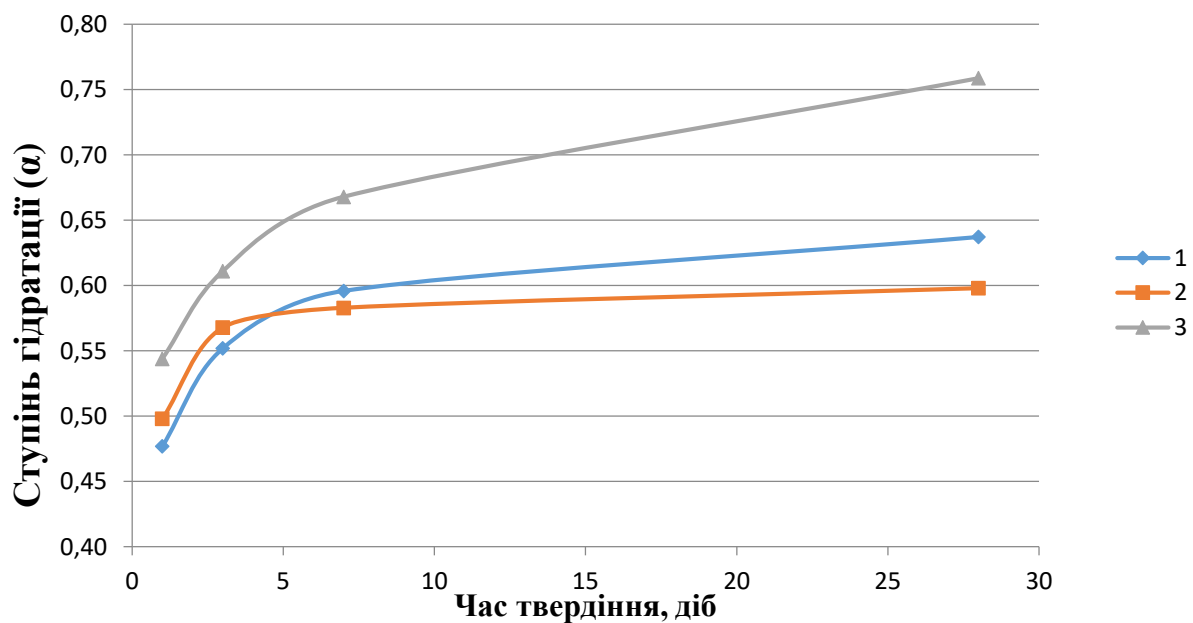


Рисунок 3.12 – Вплив гранітного наповнювача на кінетику гідратації цементного каменю

Примітка. Номери позицій згідно табл. 3.4

Як показали отримані результати ступінь гідратації цементу знаходилась у межах від 45 до 76%. Введення гранітного наповнювача однозначно сприяє підвищенню показника α . Це особливо помітно у початкові терміни твердіння цементного каменю. Це може бути викликано виконанням дисперсними гранітними частинками функцій підложки для кристалізації новоутворень. Композиція, що містить полікарбоксилатний суперпластифікатор гідратує у деякій мірі повільніше, що найбільш ймовірно викликано нижчим водовмістом

цементного тіста внаслідок високого водоредукуючого ефекту добавки. Адсорбційна плівка, утворена суперпластифікатором, ймовірно, є досить проникною для молекул води і не створює суттєвих перешкод для гідратації цементу та утворення міцної структури цементного каменю. Крім того, молекули суперпластифікатора викликають де агрегацію цементних флокул, що покращує доступ води до зерен цементу.

Зі ступенем гідратації цементного каменю однозначно пов'язана його міцність.

Вже перші залежності для міцності цементного каменю і бетону враховували вплив ступеня гідратації цементу, зокрема вперше Пауерс [11] запропонував параметр X , з яким однозначно пов'язана міцність цементного каменю.

За Т. Пауерсом [11] міцність при стисненні зразків цементного каменю $R_{ц.к.}$ різного віку, що тверділи в нормальних умовах, відповідає емпіричному рівнянню:

$$R_{ц.к.} = AX^n, \quad (3.3)$$

де A – константа, що характеризує міцність цементного гелю ($A \approx 240$ МПа), n – коефіцієнт, обумовлений особливостями цементу ($n = 2.6 \dots 3$); X – структурний критерій.

Структурний критерій X у формулі (1) характеризує концентрацію продуктів гідратації цементу в просторі доступному для цих речовин (відношення обсягу гелю до сумарного обсягу гелю і порот). Його пропонується [11] розраховувати за формулою:

$$X = \frac{\kappa_z V_{y.ц} \alpha}{V_{y.ц} \alpha + B/C} \approx \frac{0.647\alpha}{0.319\alpha + B/C}, \quad (3.4)$$

де $\kappa_r = 2,09 \dots 2,2$ коефіцієнт збільшення обсягу продуктів гідратації; $V_{y.ц}$ – питомий об'єм цементу ($V_{y.ц} = 1/\rho_{ц} = 0,319$ см³/г – величина зворотна щільності цементу); α - частина цементу, що пройшла гідратацію (ступінь гідратації).

Висновок Пауерса підтверджений багатьма вченими. Як показали дослідження [159], ступінь гідратації цементу можна знайти за емпіричною формулою [11]:

$$\alpha = \sqrt{f_u / 165} \quad (3.5)$$

Ступінь гідратації цементу рядового хіміко-мінералогічного складу пропонується [9] також розраховувати за допомогою емпіричного рівняння:

$$\alpha = k \lg t - B, \quad (3.6)$$

де k – константа швидкості реакції; B – константа, яка відображає тривалість індукційного періоду гідратації.

Таблиця 3.5 - Порівняння розрахункових і експериментальних значень ступеня гідратації портландцементу

Технічні характеристики	№ дослідів за табл.	Строки тверднення τ , доба			
		1	3	7	28
Границя міцності на стиск, f_c МПа	1	37,7	51,1	58,6	67
	2	34,2	43,1	51,7	58
	3	48,8	66,7	78,0	95,1
Експериментальні значення α_e	1	0,48	0,56	0,60	0,64
	2	0,50	0,57	0,58	0,60
	3	0,54	0,61	0,67	0,76
Розрахункове значення α_p	1	0,48	0,55	0,59	0,63
	2	0,45	0,51	0,56	0,59
	3	0,54	0,63	0,68	0,75

За даними табл. міцність цементного каменю знаходилась у межах від 34 до 95 МПа. Наповнення цементного каменю гранітним пилом не зважаючи на підвищення ступеня гідратації викликає зниження міцності, пов'язане з підвищенням водопотреби, зростанням В/Ц та пористості цементного каменю. Введення до цементного тіста полікарбосилатного суперпластифікатора забезпечує низькі значення В/Ц навіть при значній кількості наповнювача. Дані табл. 3.5 демонструють хорошу схожимість експериментальних та розрахункових (за формулою (3.5)) значень ступеня гідратації цементного каменю.

Зміна структури цементного каменю за рахунок введення гранітного наповнювача та суперпластифікатора значно визначається зміною параметрів його порової структури. Найбільш простим та універсальним методом дослідження порової структури будівельних матеріалів є метод водопоглинання. Цей метод дає змогу досить точно охарактеризувати як інтегральні (уявну пористість) так і диференціальні показники пористості (показник середнього розміру λ та показник однорідності пор за розміром α).

Згідно методики [125] прийнято, що криві водопоглинання бетону (так само і цементного каменю) описуються експоненційною функцією виду:

$$W_{\tau} = W_{\max} \left(1 - e^{-\lambda \cdot \tau^{\alpha}} \right), \quad (3.7)$$

де W_{τ} - водопоглинання зразка за τ годин, %; W_{\max} - умовна величина максимального водопоглинання, %.

Отримані параметри порової структури цементного каменю наведені у табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Параметри порової структури цементного каменю з гранітним наповнювачем

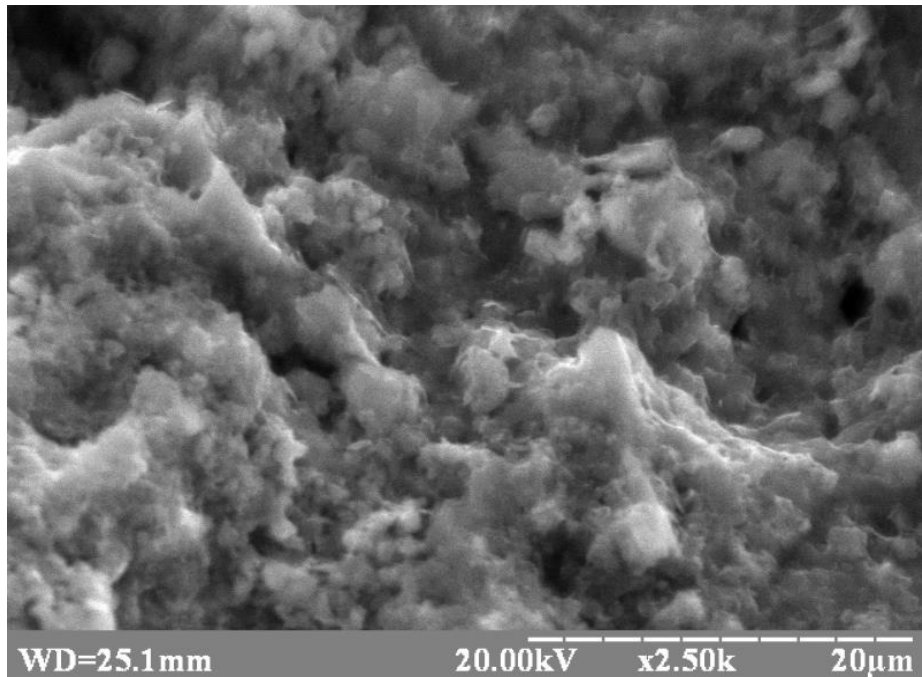
№ досліджу за табл.3.5	Пористість загальна, %	Водопоглинання за масою, %	Відкрита (уявна) пористість, %	Параметри порової структури за табл.3.5	
				α	λ
1	16,7	6,2	12,1	0,47	1,87
2	21,1	9,1	16,2	0,51	1,62
3	10,2	4,5	9,5	0,62	1,45

Як видно з отриманих даних (табл. 3.6) введення гранітного наповнювача в цементне тісто зменшує об'єм умовно-замкнених пор. Відомо, що підвищення водопотреби зазвичай призводить до збільшення об'єму відкритих пор. Дисперсні частинки відсівів володіють структуроутворюючою дією і тому, за рахунок власної водопотреби знижують водовідділення у цементному тісті. Це, у свою чергу, приводить до зменшення об'єму відкритих пор, що грає позитивну роль у формуванні довговічної структури бетону. Крім того, частинки дисперсного граніту частково перекривають капіляри цементного каменю, сприяючи утворенню додаткового об'єму пор, як і у звичайних умовах водою не заповнюються [125].

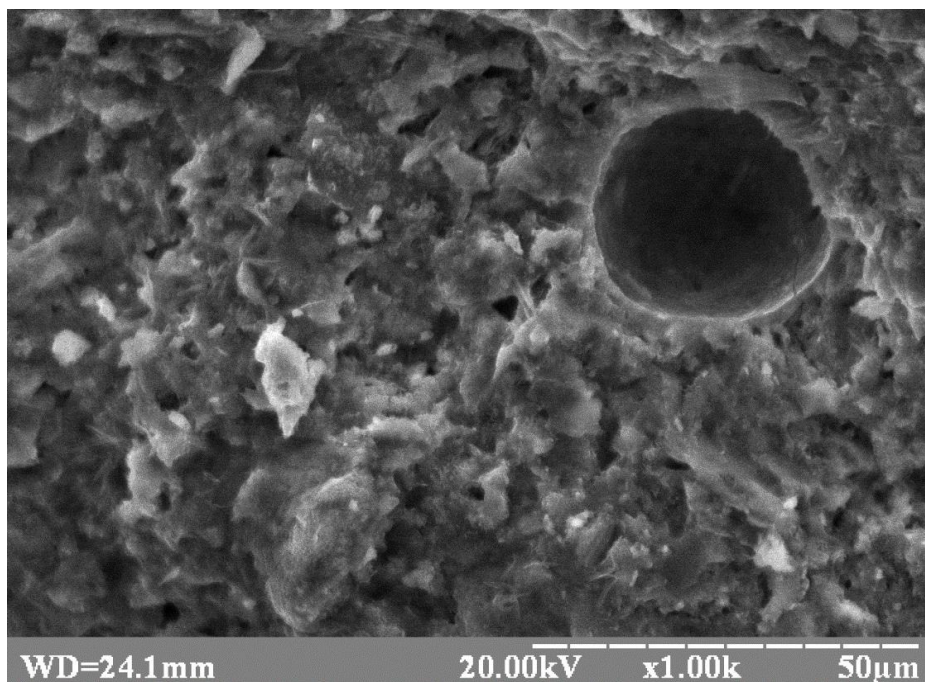
При наповненні цементного каменю гранітними частинками відбувається також ущільнення цементного каменю через заповнення значного об'єму капілярів між зернового простору гелевидними фазами. Це призводить до зменшення середнього розміру пор та підвищення їх однорідності. За рахунок введення суперпластифікатора покращується змочування поверхні дисперсних частинок, що може бути причиною більшої кількості гідратних новоутворень цементного каменю. Зменшення об'єму та розміру пор є також причиною зниженого водовмісту цементного каменю, що містить суперпластифікатор.

Для підтвердження висловлених припущень щодо впливу гранітного наповнювача на структуру цементного каменю було проведено дослідження з

використанням електронного мікроскопа. Результати даних досліджень наведені на рис. Як видно з мікрофотографій наповнений цементний камінь характеризується більш однорідною структурою. Це особливо помітно на фотографіях, зроблених через одну добу твердіння (рис. 3.13а, 3.14а).

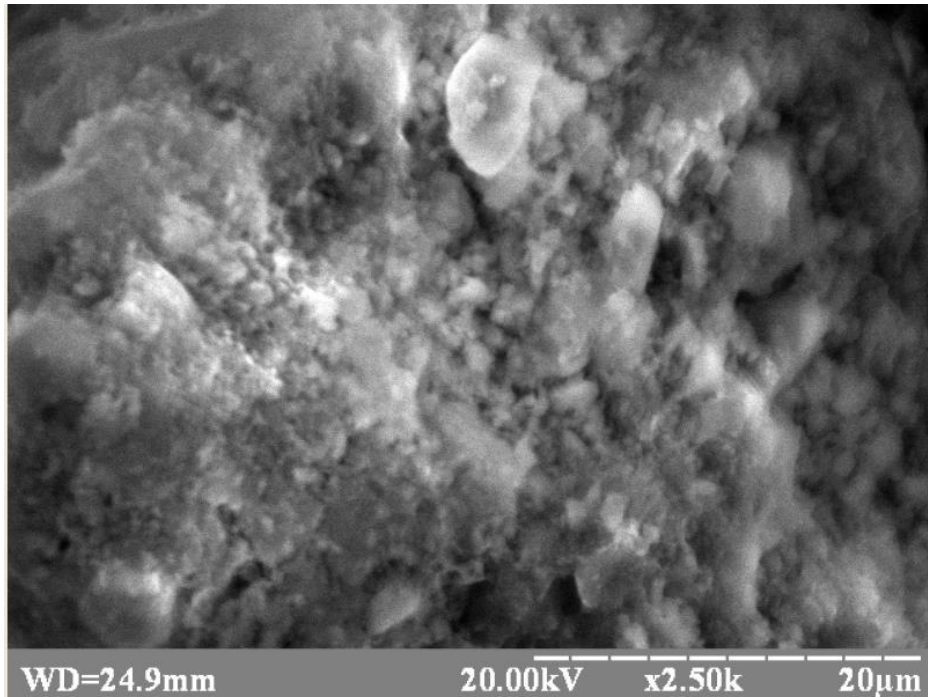


a)

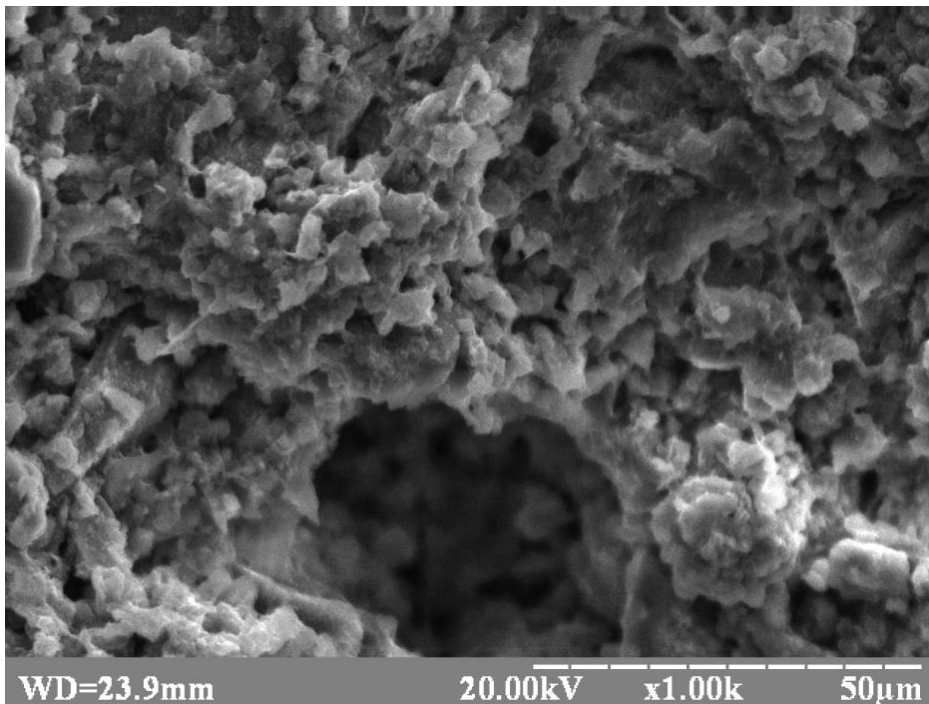


б)

Рисунок 3.13 – Мікрофотографії ненаповненого цементного каменю у віці 1 доба (а) і 28 діб (б)



a)

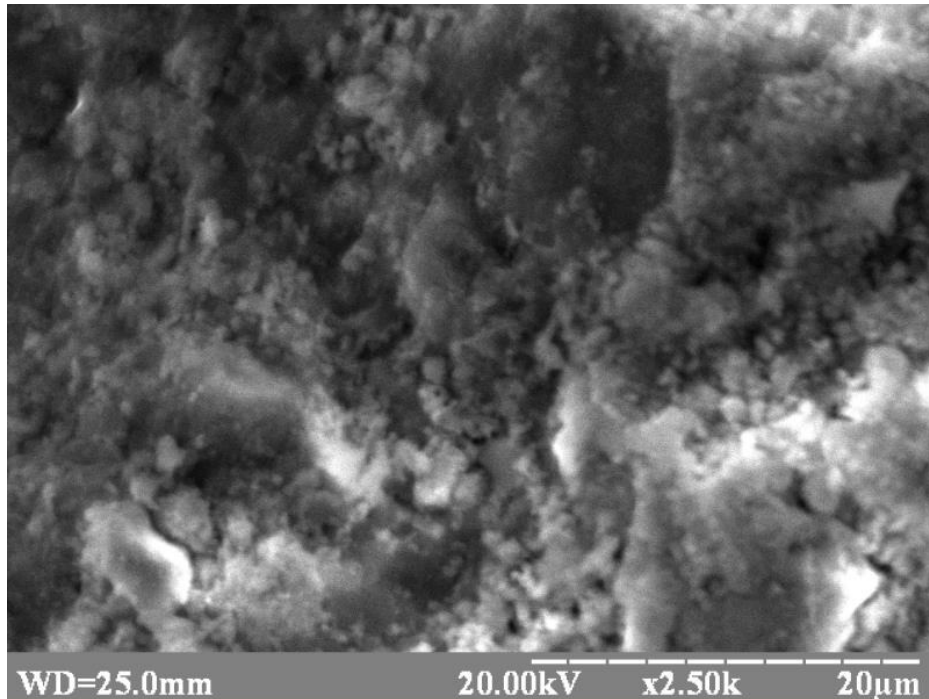


б)

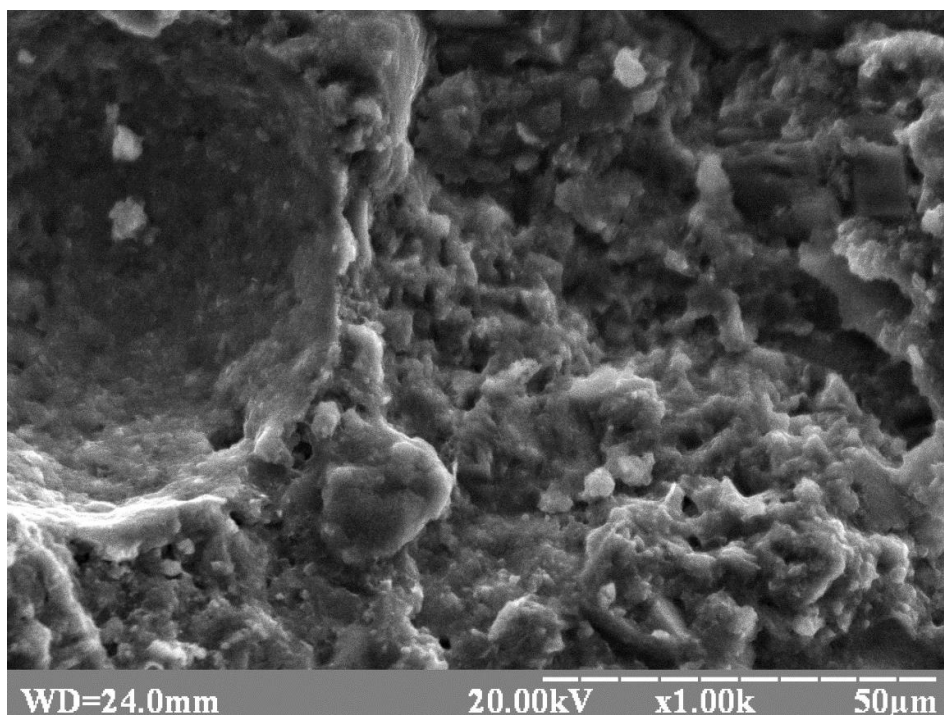
Рисунок 3.14 – Мікрофотографії цементного каменю з наповнювачем (частинки гранітного відсіву менше 0,16 мм, співвідношення цемент:наповнювач = 1:1 (за масою)) у віці 1 доба (а) і 28 діб (б)

Введення суперпластифікатора (рис. 3.15 а та б) спричиняє утворення більш щільної, зливої структури цементного каменю, що є причиною і зниженого водопоглинання і максимальної міцності при стиску. Така структура цементного каменю може бути основою для отримання високоміцного бетону при умові

забезпечення оптимального співвідношення між складовими, щільного каркасу заповнювача та максимального ущільнення.



a)



б)

Рисунок 3.15 – Мікрофотографії цементного каменю з наповнювачем (частинки гранітного відсіву менше 0,16 мм, співвідношення цемент:наповнювач = 1:1 (за масою)) та суперпластифікатором (Melflux 2641f 0,5% від маси цементу) у віці 1 доба (а) і 28 діб (б)

Матеріали розділу 3 опубліковано автором у працях [161,162].

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

1. Дисперсні гранітні частинки (аспіраційний пил та частинки відсівів менші 0,16 мм) суттєво впливають на реологічні показники цементних паст та їх зміну в часі на початкових стадіях твердіння.

2. Загальний характер зміни вібров'язкості, напруження зсуву та в'язкості гранично зруйнованої структури ненаповненого цементного тіста та з різними наповнювачами подібний і близький до експоненційної залежності. Різниця абсолютних значень спостерігається відповідно до виду наповнювача, водовмісту цементного тіста та вмісту добавки-суперпластифікатора.

3. Наповнення цементного тіста гранітними частинками. в основному, викликає підвищення реологічних показників. У випадку збільшення водовмісту цементного тіста чи вмісту суперпластифікатора степінь впливу наповнювачів на реологічні характеристики значно знижується. Збільшення дисперсності наповнювача вимагає значно більшого пластифікуючого ефекту суперпластифікатора.

4. Отримані математичні моделі реологічних параметрів наповненого цементного тіста, що дозволяють враховувати вплив кількості та дисперсності гранітного наповнювача, а також вміст суперпластифікатора.

5. Підвищення дозування суперпластифікатора СП-1 до значень 0,8...1% призводить до практично невідчутної зміни рухомості і ефективної в'язкості, що підтверджує доцільність вибору оптимальної кількості добавки для цементного тіста з гранітним наповнювачем.

6. Дані кінетики зміни швидкості проходження ультразвукових хвиль та електропровідності показують, що введення гранітного наповнювача до цементних паст приводить до подовження періоду формування коагуляційної структури і її перехід до кристалізаційної. Це викликано збільшенням кількості води, яка приймає участь у реакціях за рахунок розширення вільного простору між зернами цементу.

7. Введення гранітного наповнювача однозначно сприяє підвищенню ступеня гідратації цементного каменю особливо у ранні терміни твердіння. Композиції, що містять суперпластифікатор полікарбоксилатного типу одночасно з гранітним наповнювачем характеризуються максимальним ступенем гідратації 76% на 28 добу.

8. Зі ступенем гідратації та В/Ц однозначно пов'язана міцність цементного каменю. Максимальна міцність (близько 95МПа) спостерігається у складі, що містить гранітний наповнювач та має низьке В/Ц за рахунок використання

суперпластифікатора. При цьому досягається мінімальний показник розміру пор λ та максимальна однорідність пор.

9. Дані електронної мікроскопії підтвердили більшу однорідність порової структури цементного каменю, наповненого гранітними частинками в присутності суперпластифікатора, яка може бути основою для отримання високоміцного бетону.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІДХОДІВ КАМЕНЕПОДРІБНЕННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ

4.1. Вплив відходів каменеподрібнення на характеристики бетонних сумішей

Результати досліджень, які наведені розділі 3 показали, що дисперсні частинки гранітних відсівів значно впливають на реологічні властивості цементного тіста підвищуючи його в'язкість. Цей негативний вплив може суттєво коректуватись шляхом введення добавок-суперпластифікаторів. Аналогічний вплив дисперсних гранітних частинок спостерігається і на властивості бетонних сумішей, що містять гранітні відсіву у якості основного заповнювача (рис. 4.1)

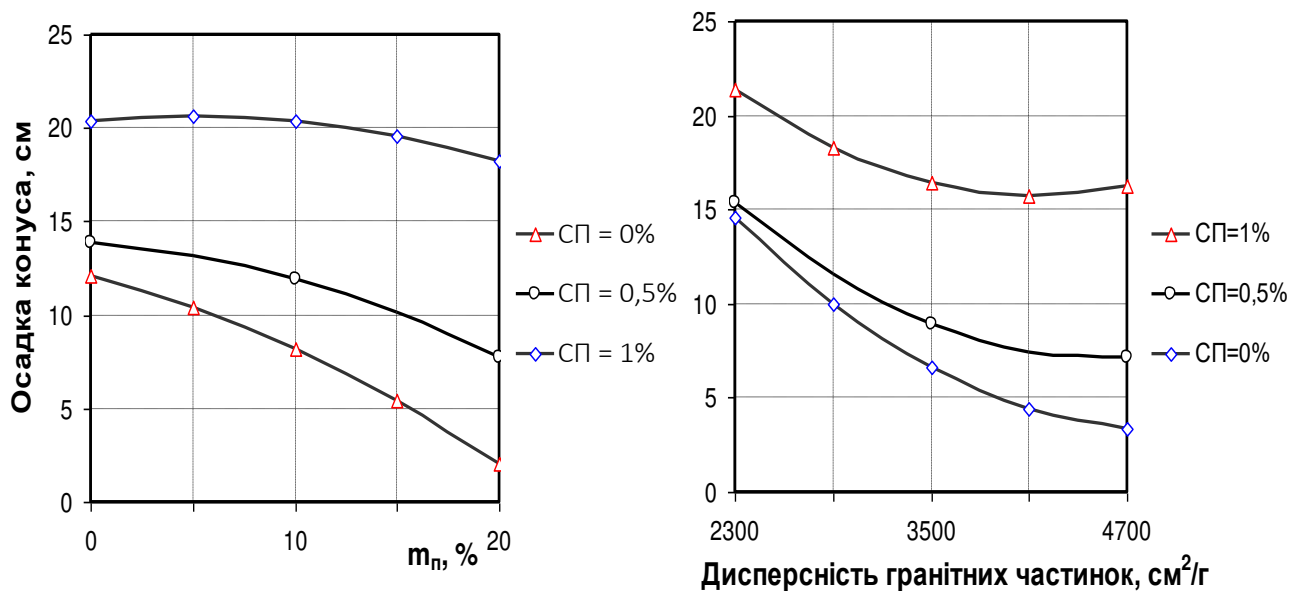


Рисунок 4.1 – Кількості гранітних частинок ($m_n, \%$) та їх дисперсності на рухомість дрібнозернистої бетонної суміші з гранітними відсівими в присутності суперпластифікатора (СП-1)

З рис. 4.1 видно, що збільшення вмісту дисперсних частинок відсівів та їх дисперсності у дрібнозернистих бетонних сумішах викликає суттєве зниження їх рухомості, яка може бути знівелювана за рахунок дії добавки-суперпластифікатора. Підвищений вміст суперпластифікатора робить вплив пилюватих частинок практично непомітним. Очевидно, що такий же чи більший ефект може викликати використання інший вид добавок, наприклад добавки на основі полікарбоксилатних ефірів.

Для дослідження впливу гранітних відсівів, які містять значну кількість частинок розміром $<0,16$ мм та їх дисперсності на реологічні властивості бетонної

суміші та встановлення кількісних залежностей було проведено планований експеримент за планом В₄ [154], умови планування та результати наведені у табл. 4.1, 4.2.

Таблиця 4.1 – Умови планування експериментів

Фактори варіювання		Рівні варіювання		
Натуральні значення	Кодовані значення	-1	0	+1
Вміст фракції відсіву $\leq 0,16$ (m_n), %	X_1	0	10	20
Витрата цементу (Π), кг/м ³	X_2	400	450	500
Витрата добавки суперпластифікатора Melflux 2651f, %	X_3	0	0,5	1
Питома поверхня частинок $< 0,16$ мм, $S_{0,16}$, см ² /г	X_4	2300	3500	4700

Таблиця 4.2 – Матриця планування експерименту та результати випробувань

Точки плану	Кодовані значення факторів				Вихідні параметри			
	X_1	X_2	X_3	X_4	ОК, см	В/Ц	tg φ	Δ ОК
1.	1	1	1	1	20...25	0,51	0,15	0,4
2.	1	1	1	-1		0,49	0,24	2,1
3.	1	1	-1	1		0,72	0,40	3,6
4.	1	1	-1	-1		0,66	0,50	4,3
5.	1	-1	1	1		0,72	0,21	0,0
6.	1	-1	1	-1		0,46	0,34	1,3
7.	1	-1	-1	1		0,97	0,50	2,8
8.	1	-1	-1	-1		0,67	0,65	3,5
9.	-1	1	1	1		0,55	0,25	3,1
10.	-1	1	1	-1		0,45	0,35	4,0
11.	-1	1	-1	1		0,75	0,51	5,3
12.	-1	1	-1	-1		0,61	0,62	5,2
13.	-1	-1	1	1		0,77	0,31	2,3
14.	-1	-1	1	-1		0,43	0,45	3,2
15.	-1	-1	-1	1		1,01	0,61	4,5
16.	-1	-1	-1	-1		0,63	0,75	4,4
17.	1	0	0	0		0,51	0,29	1,1

Продовження таблиці 4.2

18.	-1	0	0	0	0,52	0,40	2,9
19.	0	1	0	0	0,48	0,32	3,9
20.	0	-1	0	0	0,59	0,42	3,1
21.	0	0	1	0	0,48	0,30	1,9
22.	0	0	-1	0	0,69	0,58	4,1
23.	0	0	0	1	0,65	0,26	1,9
24.	0	0	0	-1	0,45	0,38	2,7

Для високорухомих бетонних сумішей важливим питанням є життєздатність бетонної суміші. Показник збереженості рухомості визначали з урахуванням вимог ДСТУ БВ.2.7–171:2008 як зміну рухомості бетонної суміші протягом 2-х годин (ΔOK).

Важливими показниками однорідності литих бетонних сумішей є водовідділення та розчиновідділення. Згідно діючих норм для литих бетонних сумішей, тобто сумішей марок за легкоукладальністю P4, P5, водовідділення не повинне перевищувати 0,8%, а розчиновідділення – 4%.

Водовідділення прямо пов'язане із водоутримуючою здатністю цементних паст та бетонних сумішей. Було доведено, що максимальне значення В/Ц, яке характеризує граничну водоутримуючу здатність цементного тіста в статичному стані при введенні добавок складає близько 2,5 $K_{н.г}$ (де $K_{н.г}$ - нормальна густина цементу), що на 80 % більше, ніж у цементного тіста без добавок ($1,65K_{н.г}$). Гранітний пил, завдяки високій дисперсності, інтенсивно зв'язує воду, тим самим знижуючи водовідділення сумішей.

Водопотреба бетонної суміші визначалась з метою досягнення, у всіх точках експерименту, рухомості 20...25 см (P5). Також за ДСТУ БВ.2.7-114-2002 та ДСТУ БВ.2.7–171:2008 досліджували розшаровуваність (розчиновідділення) бетонної суміші за показником кута внутрішнього тертя ($tg\varphi$) та показник збереження легкоукладальності.

Показник розчиновідділення – тангенс кута внутрішнього тертя, який визначається за осадкою (OK) та діаметром (D_p) розпливу стандартного конусу використовують для оперативної оцінки зв'язності та нерозшаровуваності бетонної суміші.

Показником кута внутрішнього тертя, знаходили за формулою:

$$tg\varphi = \frac{30-OK}{0,5 \cdot D_p}, \quad (4.1)$$

де OK – осадка конуса, см, D_p – розплив стандартного конуса, см.

В результаті статистичного аналізу експериментальних даних отримані адекватні з довірчою ймовірністю 95% рівняння регресії вихідних параметрів: В/Ц, показник розчиновідділення та зберезуваності бетонної суміші в часі ($\text{tg}\varphi$, ΔOK , см).

$$\text{В/Ц} = 0,51 - 0,002x_1 - 0,058x_2 - 0,102x_3 + 0,1x_4 + 0,003x_1^2 + 0,023x_2^2 + 0,0073x_3^2 + 0,04x_4^2 + 0,003x_1x_2 - 0,003x_1x_3 - 0,02x_1x_4 + 0,01x_2x_3 - 0,06x_2x_4 - 0,01x_3x_4 \quad (4.2)$$

$$\text{tg}\varphi = 0,35 - 0,054x_1 - 0,05x_2 - 0,14x_3 - 0,06x_4 - 0,004x_1^2 + 0,018x_2^2 + 0,093x_3^2 - 0,003x_4^2 - 0,002x_1x_2 + 0,001x_1x_3 + 0,001x_1x_4 + 0,01x_2x_3 + 0,01x_2x_4 + 0,003x_3x_4 \quad (4.3)$$

$$\Delta\text{OK} = 2,6 - 0,9x_1 + 0,4x_2 - 1,1x_3 - 0,4x_4 - 0,58x_1^2 + 0,91x_2^2 + 0,41x_3^2 - 0,26x_4^2 - 0,25x_1x_3 - 0,2x_1x_4 - 0,26x_3x_4 \quad (4.4)$$

Як показує аналіз моделі (1) збільшення вмісту пилюватої фракції $\leq 0,16$ мм від 0 до 20% без введення пластифікуючої добавки призводить до суттєвого зростання В/Ц. Введення суперпластифікатора 0,5% від маси цементу дозволило нівелювати негативний вплив пилюватої фракції $\leq 0,16$ і практично не вплинуло на зміну В/Ц. При збільшенні витрати добавки до 1% від маси цементу при максимальному вмісті пилюватої фракції спостерігається зниження В/Ц на 20% у порівнянні із вдвічі меншою витратою суперпластифікатора і без введення пилюватої фракції (рис. 4.2).

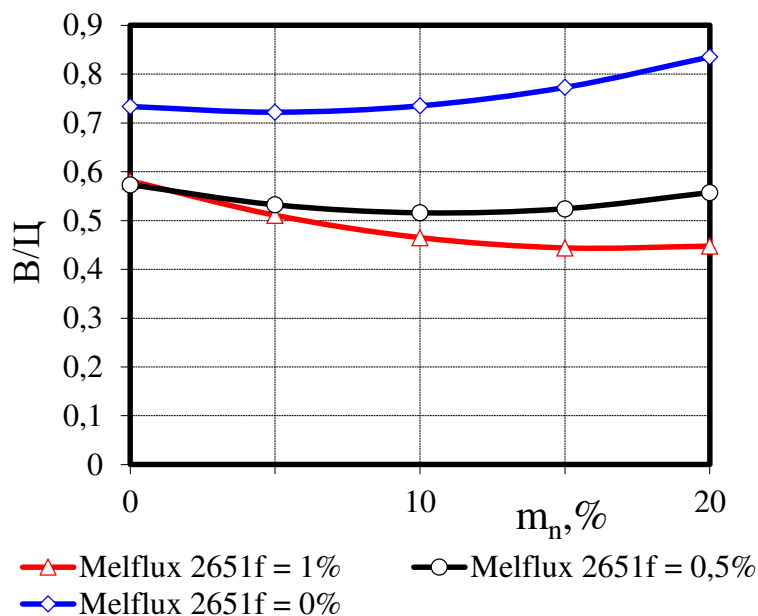


Рисунок 4.2 – Вплив вмісту пилюватої фракції розміром $\leq 0,16$ мм та витрати пластифікуючої добавки на основні властивості

При цьому також спостерігається збільшення міцності бетону при стиску у віці 28 днів на 16,8%. У випадку нівелювання негативного впливу дрібних частинок на водопотребу за допомогою суперпластифікатора, вони, як показують

експериментальні дані, можуть відігравати роль мікронаповнювача, що позитивно впливає на структуру цементної матриці [162].

Як видно з отриманого рівняння (4.2) та рис. 4.3, усі досліджувані фактори спричиняють суттєвий вплив на зниження розшарування. При цьому максимальний позитивний ефект викликає одночасне збільшення вмісту пилюватої фракції $\leq 0,16$ мм (X_1) та цементу (X_2) за умови введення добавки суперпластифікатора (X_3) від 0,5 до 1% від маси цементу. При збільшенні витрати цементу (X_1) у варійованих межах без введення пластифікуючої добавки (X_3) суттєво зростає водопотреба бетонної суміші, що викликає помітне розшарування бетонної суміші (рис 4.3а).

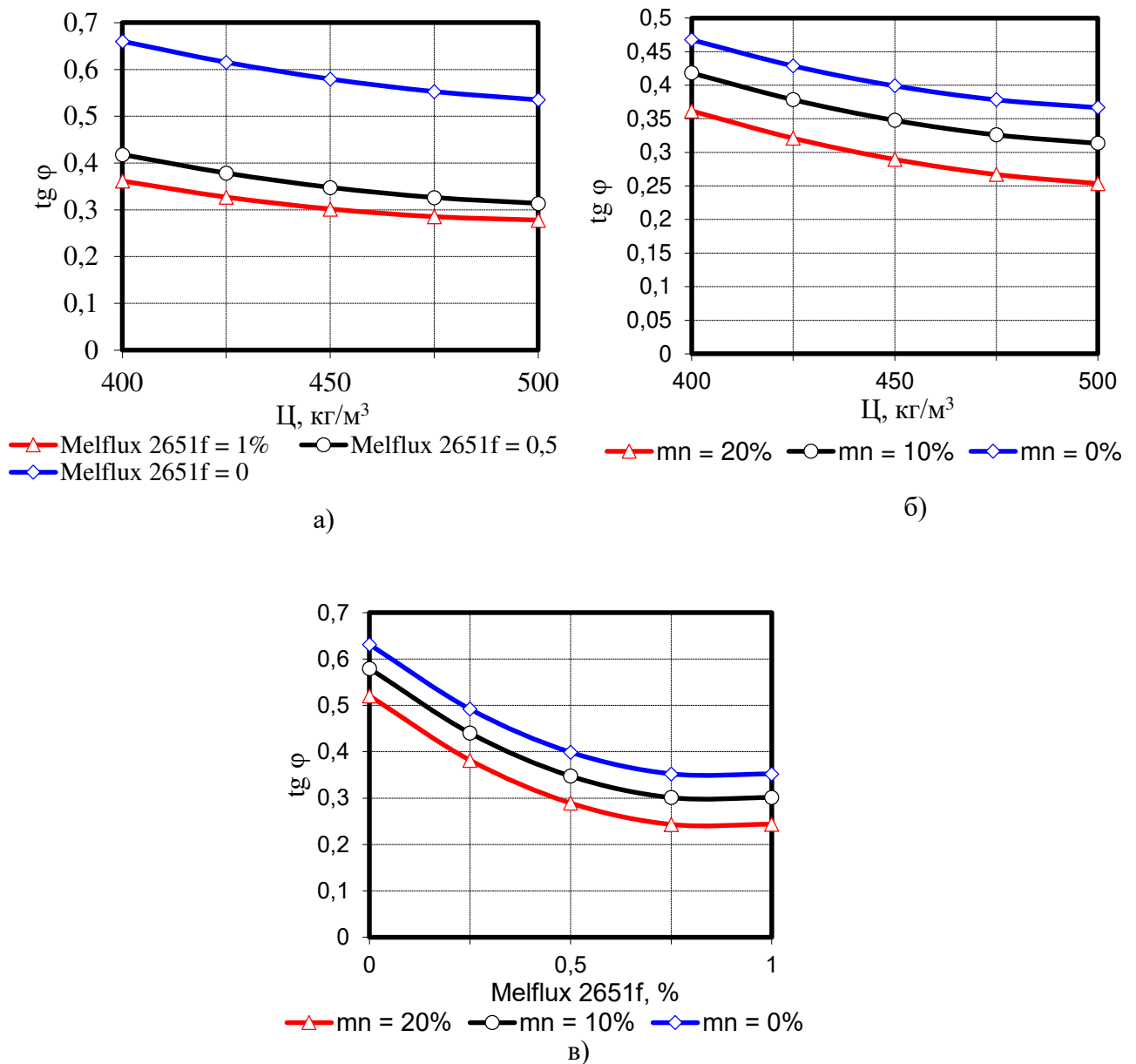


Рисунок 4.3 – Вплив технологічних факторів на $\text{tg } \varphi$.

а – вплив витрати суперпластифікатора при різній витраті цементу;

б – вплив частки пилюватої фракції при різній витраті цементу;

в – вплив частки пилюватої фракції при різній витраті суперпластифікатора.

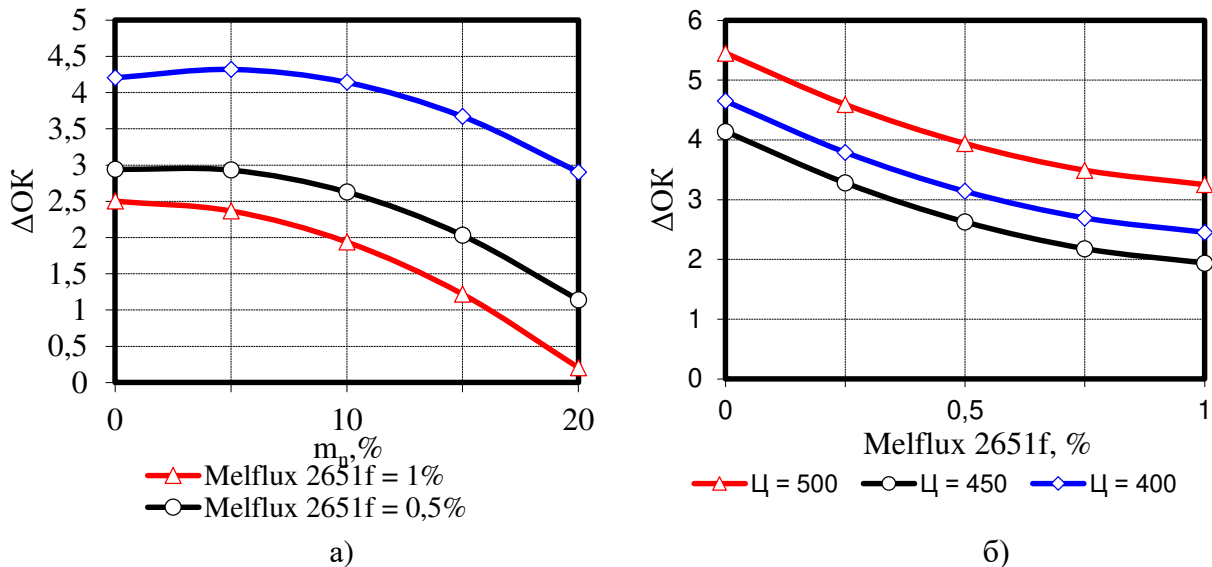


Рисунок 4.4 – Вплив технологічних факторів на кінетику зміни рухомості бетонних сумішей за осадкою конуса.

а – частки пилюватої фракції при різній витраті суперпластифікатора;

б – частки пилюватої фракції при різній витраті цементу;

Важливим питанням при дослідженні ефективності добавок у литих бетонах, є прогнозування втрати рухомості – т.зв. “життєздатності”, або збереженості суміші в часі, яке дозволяє вносити корективи при призначенні початкової легкоукладальності та визначати допустиму тривалість транспортування суміші.

Відомо [163], що литі пластифіковані суміші втрачають рухомість швидше, ніж рівнорухомі суміші без добавки суперпластифікатора, що закономірно пояснюється більшим водовмістом останніх. Завдяки сумісному введенню суперпластифікатора та пилюватої фракції $\leq 0,16$ мм втрата рухомості протягом 2-х год є незначною (рис. 4.4), це обумовлено сповільненням процесів початкового структуроутворення [164].

Підвищення дисперсності гранітного пилу робить бетонну суміш більш в'язкою і тому суттєво знижує її розшарування. Поряд з цим така підвищена в'язкість викликає значно швидшу втрату «життєздатності» суміші. У даному випадку оптимальна кількість добавки-суперпластифікатора, що нівелює властивості суміші, підвищується.

4.2. Вплив різних видів добавок-пластифікаторів на властивості бетонних сумішей, що містять відходи каменеподрібнення

Введення хімічних добавок і перш за все суперпластифікаторів, є одним з найбільш ефективних шляхів регулювання властивостей бетону і зниження витрати цементу [1]. Останнім часом найбільшої популярності набувають вискоєфективні пластифікуючі добавки на основі ефірів полікарбоксилату. Вони

відрізняються від відомих пластифікаторів більш високим водоредукуючим ефектом, який дає змогу суттєво підвищити щільність і покращити міцнісні та інші характеристики бетону. Суттєвим недоліком даних пластифікаторів є відносно висока їх вартість. Для зниження вартості і забезпечення поліфункціонального ефекту в технології бетону широко використовують комплексні добавки, які складаються з кількох компонентів, що коригують, доповнюють, а в багатьох випадках посилюють дію кожного з них.

Метою наступного етапу роботи було розробити склади комплексних добавок на основі ефірів полікарбоксилату та пластифікаторів інших типів, котрі повинні характеризуватися високим пластифікуючим та водоредукуючим ефектом і забезпечують високу значення міцності при низькій вартості.

Дослідження проводились на дрібнозернистому бетоні із застосуванням в якості заповнювача гранітних відсівів фракції 0...5 мм. Для проведення експериментальних досліджень було використано портландцемент ПАТ «Волинь-цемент» ПЦ І-500Н. Як пластифікуючі добавки використовували суперпластифікатор полікарбоксилатного типу Melflux 2651f (BASF, Німеччина), суперпластифікатор нафталін-сульфонатного типу С-3 (Владимирский ЖБК, РФ) та пластифікатор лігносульфонатного типу ЛСТМ (Камский ЦБК, РФ). Витрату цементу в бетонній суміші підтримували постійну – 500 кг/м³, В/Ц змінювалось в діапазоні 0,35...0,55.

Дослідження виконували у два етапи: на першому досліджували пластифікуючий ефект окремих добавок і композицій на їх основі, вплив їх на міцність при постійному водовмісті бетонних сумішей та різної тривалості тверднення; на другому визначали водоредукуючий ефект добавок та ефективність його використання для підвищення міцнісних характеристик бетону. Вплив даних факторів на міцнісні характеристики дрібнозернистого бетону наведені у розділі 5.

Дослідження були виконані із застосуванням математичного планування експерименту. Для цього були реалізовані алгоритмізовані експерименти за планом «склад-технологія-властивість» [165, 154]. У даному плані поєднуються симплекс-планування взаємозалежних факторів суміші компонентів та варіювання незалежних технологічних факторів.

Фактори, що варіювались згідно експериментального плану, на першому етапі:

V_1 - вміст пластифікатора ЛСТМ (0...0,5%);

V_2 - вміст суперпластифікатора С-3 (0...0,5%);

V_3 - вміст суперпластифікатора Melflux (0...0,5%);

X_1 - вміст частинок менших 0,16 мм (0...20% від маси відсіву);

X_2 - водо-цементне відношення (0,35...0,55)

Після проведення статистичного аналізу експериментальних даних отримані математичні моделі осадки конуса бетонної суміші та пластифікуючого ефекту впливу добавок, а також міцнісних параметрів бетону у вигляді поліноміальних рівнянь регресії типу:

$$y = A_1V_1 + A_2V_2 + A_3V_3 + A_{12}V_1V_2 + A_{13}V_1V_3 + A_{23}V_2V_3 + (Ab)_{11}V_1V_1 + (Ab)_{12}V_1V_2 + (Ab)_{21}V_2V_1 + (Ab)_{22}V_2x_2 + (Ab)_{31}V_3x_1 + (Ab)_{32}V_3x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 \quad (4.5)$$

Моделі виду (4.5) дозволяють виконувати комплекс розрахунків, пов'язаних з прогнозуванням досліджених вихідних параметрів, що характеризують бетонні суміші і бетони при введенні обраних добавок як окремо, так і в різних композиціях.

На другому етапі досліджень бетонні суміші виготовляли при постійній рухомості (ОК = 15...20 см) з визначенням необхідних значень водоцементного відношення та водоредукуючого ефекту при зміні у широкому діапазоні співвідношень між вибраними добавками. Були реалізовані експерименти за симплекс-решітчастим планом Шеффе «суміш-властивість» [154]. Математичні моделі отримані в результаті даних експериментів мали вигляд:

$$y = A_1V_1 + A_2V_2 + A_3V_3 + A_{12}V_1V_2 + A_{13}V_1V_3 + A_{23}V_2V_3 + A_{23}V_2V_3 + A_{123}V_1V_2 \quad (4.6)$$

Коефіцієнти отриманих математичних моделей виду (4.5 і 4.6) наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Коефіцієнти математичних моделей рухомості бетонної суміші (ОК), пластифікуючого (ПЕ) і водоредукуючого (ВРЕ) ефектів добавок.

Коефіцієнти	Вихідні параметри			Коефіцієнти	Вихідні параметри	
	ОК, см	ПЕ, %	ВРЕ, %		ОК, см	ПЕ, %
A_1	11,26	6	15,3	$(Ab)_{21}$	-4,64	-22
A_2	6,87	3	15,2	$(Ab)_{22}$	6,12	8
A_3	16,29	37	31,3	$(Ab)_{31}$	-0,53	-6
A_{12}	-11,99	-46	17,4	$(Ab)_{32}$	5,59	5
A_{13}	10,96	88	37,4	b_{12}	-1,38	-9
A_{23}	3,47	0	20	b_{11}	-0,48	3
A_{123}	-	-	41,8	b_{22}	3,23	23
$(Ab)_{11}$	-0,79	-5	-			
$(Ab)_{12}$	7,25	9	-			

При варіюванні обраних факторів в заданих межах осадка конуса бетонних сумішей змінювалась від 4 до 26 см. На рухомість найбільший вплив створювали вміст добавок та В/Ц. Ефективність комплексного впливу факторів на рухомість суміші оцінювали за величиною пластифікуючого ефекту, який визначався за формулою:

$$PE = \frac{OK - OK_0}{OK_0} \cdot 100\%, \quad (4.7)$$

де ОК – осадка конуса при додаванні пластифікуючої добавки; ОК₀ – осадка конуса контрольного складу.

Пластифікуючий ефект досліджених добавок різного складу при максимальному їх вмісті 0,5% від маси цементу знаходився в межах від 22% до 82%. Як слідує з математичних моделей ПЕ (табл. 4.3) найбільший пластифікуючий ефект здійснює суперпластифікатор полікарбоксилатного типу Melflux (при вмісті пилюватих частинок 0%, ПЕ змінюється в межах від 50% до 82% для бетонних сумішей з В/Ц = 0,35 і В/Ц = 0,55; при вмісті пилюватих частинок 20% - від 38% до 72% при з В/Ц = 0,35 і В/Ц = 0,55 відповідно). Пластифікатор ЛСТМ і суперпластифікатор С-3 показали дещо нижчі значення пластифікуючого ефекту (рис. 4.5). Збільшення пластифікуючого ефекту добавок всіх видів характерно при збільшенні В/Ц.

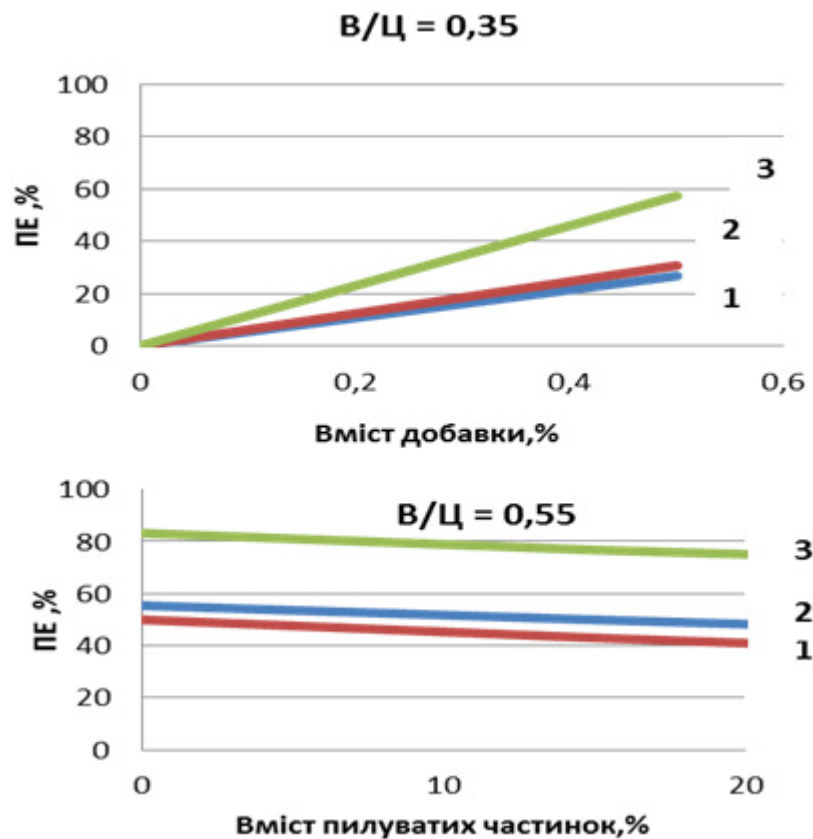


Рисунок 4.5 – Вплив одинарних добавок на пластифікуючий ефект (ПЕ), %

1 – добавка ЛСТМ; 2 – С-3; 3 – Melflux

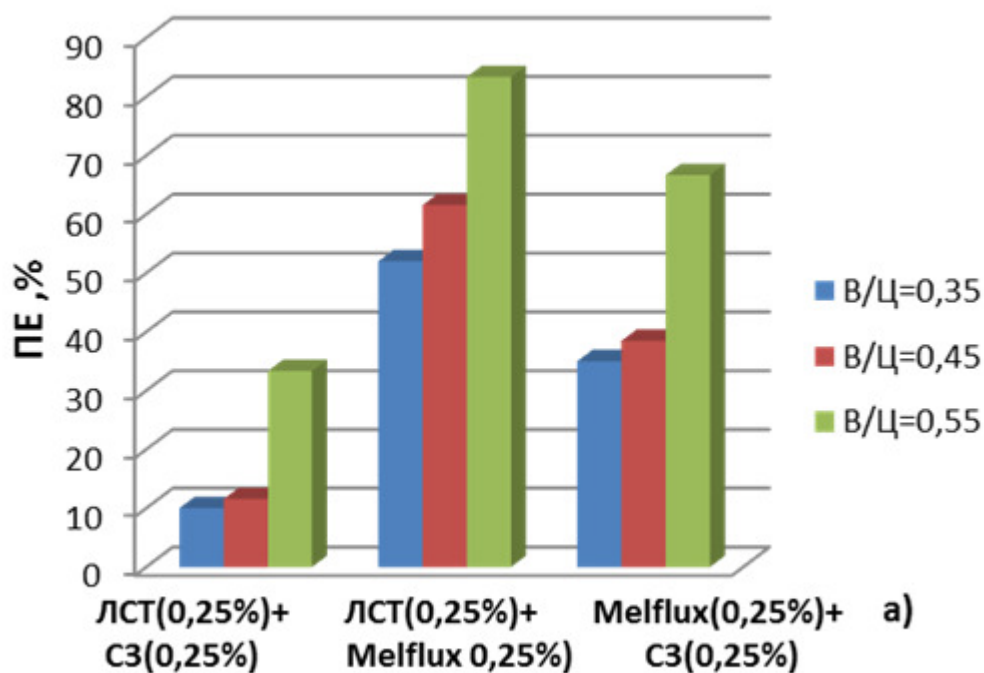
Збільшення вмісту дисперсних гранітних частинок викликає певне зниження пластифікуючого ефекту досліджуваних добавок. Це більш помітно при високих значеннях В/Ц (15...30%) (рис. 4.5б), при низьких В/Ц вплив частинок менших 0,16 мм на пластифікуючий ефект добавки незначний (до 15%).

При оцінці спільного впливу добавок різного типу максимальний пластифікуючий ефект спостерігався при поєднанні пластифікатора ЛСТМ з суперпластифікатором Melflux в однакових співвідношеннях (рис. 4.6а). В даному випадку ПЕ знаходився в межах 52-82%, що наближається до ефекту отриманому при індивідуальному введенні добавки Melflux. Комплексна добавка Melflux і С-3 призводить до зниження ПЕ до 35-68%. Найнижче значення пластифікуючого ефекту отримали при поєднанні пластифікатора ЛСТМ і суперпластифікатора С-3.

Поєднання трьох досліджуваних добавок в однакових пропорціях дозволяє отримати ПЕ при В/Ц = 0,55 60-63%, при В/Ц = 0,55 – 29-31%. Аналіз спільного впливу добавок за потрійною діаграмою дозволив встановити область співвідношень, що забезпечують максимальний пластифікуючий ефект (рис. 4.6 б):

при В/Ц = 0,35: Melflux - 68...73%, С-3 – 8...12%, ЛСТМ – 18...23% (ПЕ = 37...45%);

при В/Ц = 0,55: Melflux – 48...53%, С-3 – 8...15%, ЛСТМ – 35...42% (ПЕ = 55..65%).



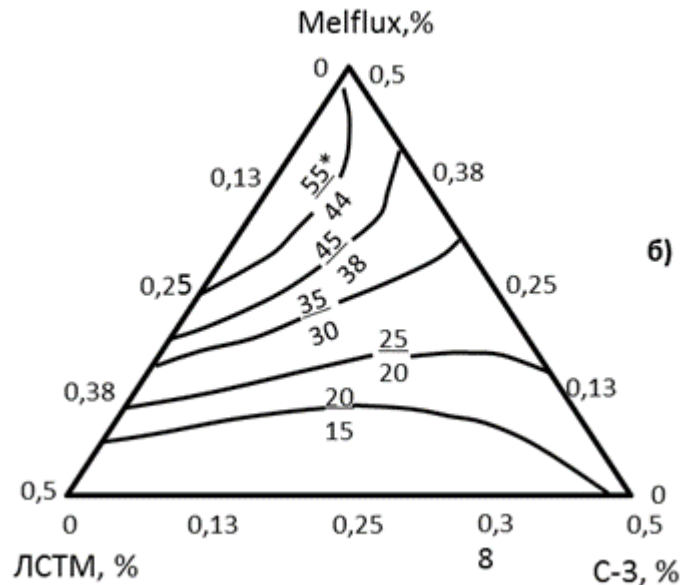


Рисунок 4.6 – Вплив комплексних добавок на ПЕ, %

Для виконання всебічної оптимізації добавок слід також дослідити їх водоредукуючий ефект. Останній можна розрахувати за формулою:

$$ВРЕ = \frac{B-B_0}{B_0} \cdot 100\%, \quad (4.8)$$

де B – витрата води при додаванні пластифікуючої добавки без зменшення початкової рухомості ($OK = 16...20$ см) бетонної суміші; B_0 – витрата води для бетонної суміші без вмісту пластифікатора.

Водоредукуючий ефект (ВРЕ) досліджених добавок змінювався в межах $13...28\%$. На величину водоредукуючого ефекту найбільший вплив становить тип пластифікуючої добавки. Найкращий водоредукуючий ефект показала добавка на основі полікарбосилатного ефіру ($25...30\%$) нижчий ВРЕ - добавки на основі лігносульфонату і нафталінформальдегіду ($10...15\%$). При оцінці спільного впливу добавок різного типу найкращий ВРЕ спостерігається при поєднанні суперпластифікатора Melflux і пластифікатора ЛСТМ в однакових співвідношеннях. В даному випадку ВРЕ знаходиться в межах $24...28\%$, що наближається до ефекту отриманого при окремому введенні добавки Melflux. Деяко нижчий ВРЕ показали комплексна добавка Melflux і C-3, а також добавка із трьох компонентів Melflux, C-3, ЛСТМ. Аналізуючи спільний вплив добавок за потрійною діаграмою можна встановити, межі добавок, що забезпечують максимальний водоредукуючий ефект: Melflux – $50...55\%$, C-3 – $10...15\%$, ЛСТМ – $30...35\%$. (рис. 4.7)

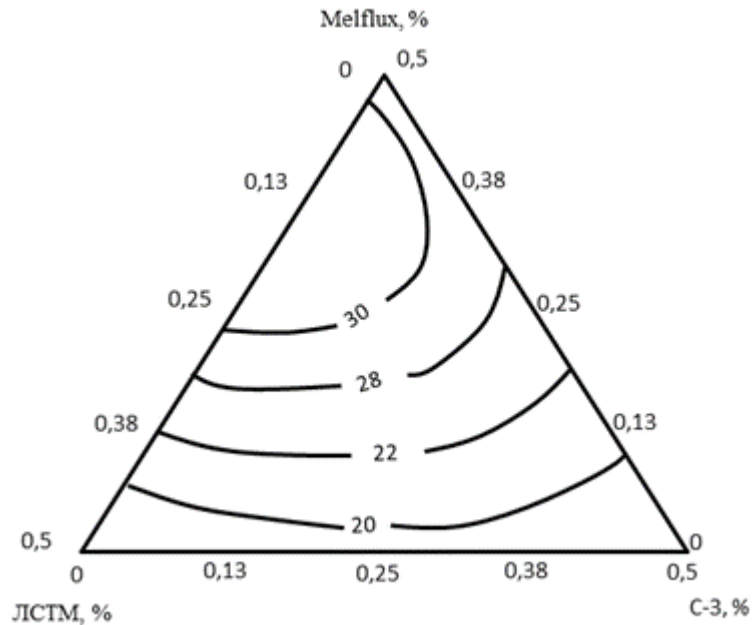


Рисунок 4.7 – Спільний вплив добавок на ВРЕ

Матеріали розділу 3 опубліковано автором у працях [160,160,166-169].

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

1. Збільшення вмісту пилюватих частинок відсівів та їх дисперсності у дрібнозернистих бетонних сумішах з гранітними відсівами в якості основного заповнювача викликає суттєве зниження їх рухомості. Підвищення водоредукуючої дії суперпластифікатора робить негативний вплив дисперсних частинок практично непомітним.

2. Використання гранітного відсіву з підвищеним вмістом пилюватих частинок дозволяє отримати високорухомі бетонні суміші з ОК=20...22 см без ознак розшарування. Підвищений вміст пилюватих частинок високої водопотреби спричиняє швидку втрату рухомості бетонної суміші.

3. Збільшення вмісту добавки-суперпластифікатора полікарбоксилатного типу при зростанні вмісту пилюватих частинок відсівів та їх дисперсності дозволяє забезпечити «життєздатність» бетонної суміші в межах, встановлених нормативними документами.

4. З використанням планів «склад-технологія-властивість» та «суміш-властивість» отримані математичні моделі рухомості бетонної суміші на гранітних відсівах, пластифікуючого та водоредукуючого ефекту комплексних добавок, що включають пластифікатори лігносульфонатного, нафталінформальдегідного та полікарбоксилатного типів.

5. Показано можливість раціонального поєднання суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу з пластифікуючими добавками інших видів і створення

ефективних комплексних добавок, що характеризуються високими пластифікуючим та водоредукуючим ефектами.

6. Встановлено область співвідношень, що забезпечують максимальний пластифікуючий ефект комплексних добавок при їх використанні у бетонній суміші на гранітних відсівах: при В/Ц = 0,35: Melflux - 68...73%, С-3 – 8...12%, ЛСТМ – 18...23% (ПЕ = 37...45%); при В/Ц = 0,55: Melflux – 48...53%, С-3 – 8...15%, ЛСТМ – 35...42% (ПЕ = 55..65%).

7. Співвідношення добавок, що забезпечує максимальний водоредукуючий ефект при постійній рухомості дрібнозернистої бетонної суміші наступне: Melflux – 50...55%, С-3 – 10...15%, ЛСТМ – 30...35%.

8. Отримані поліноміальні моделі дозволяють виконати необхідні розрахунки для оптимізації складів комплексних добавок і знаходження основних параметрів складів бетонних сумішей з їх застосуванням.

РОЗДІЛ 5
РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОТРИМАННЯ
ВИСОКОМІЦНОГО ДРІБНОЗЕРНИСТОГО БЕТОНУ З ВІДХОДАМИ
КАМЕНЕПОДРІБНЕННЯ

5.1. Міцність дрібнозернистого бетону на відсівах подрібнення граніту

Для дослідження впливу дисперсності частинок гранітних відсівів <0,16 мм якісного складу відсівів на міцність дрібнозернистого бетону при стиску і при згині та кінетику її набору було проведено планований експеримент для чотирьох факторів за планом B_4 [154].

В якості варійованих факторів прийняті наступні:

X_1 – витрата цементу на m^3 суміші;

X_2 – вміст суперпластифікатора СП-1, % від маси цементу;

X_3 – вміст частинок <0,16 мм у відсівах, ($m_{0,16}$, %);

X_4 – питома поверхня частинок <0,16 мм ($S_{0,16}$, cm^2/g).

Рухомість бетонної суміші у всіх точках плану підтримувалась на рівні 180 ± 5 мм. Ущільнення виконувалось шляхом вібрування. Умови планування та результати досліджень наведені в табл. 5.1 та табл. 5.2, відповідно.

Таблиця 5.1 – Умови планування експерименту

№	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	Натуральні	Кодовані	-1	0	1	
1.	Витрата цементу, kg/m^3	X_1	200	350	500	150
2.	Вміст суперпластифікатора СП-1, % від Ц	X_2	0	0,6	1,2	0,6
3.	Вміст дисперсних частинок у відсіві, ($m_{0,16}$, %)	X_3	0	12	24	12
4.	Питома поверхня частинок <0,16 мм, $S_{0,16}$, cm^2/g	X_4	2300	3500	4700	1200

Таблиця 5.2 – Результати експериментальних досліджень по визначенню впливу дисперсності частинок гранітних відсівів <0,16 мм на властивості ДЗБ

Точки плану	Кодовані значення				Натуральні значення											
	X_1	X_2	X_3	X_4	Ц, кг/м ³	СП-1, %	$m_{0,16}$, %	$S_{0,16}$, см ² /г	ρ_b , кг/м ³	$f_{c,tf}^3$ доби, МПа	$f_{c,tf}^7$ діб, МПа	$f_{c,tf}^{28}$ діб, МПа	f_c^3 доби, МПа	f_c^7 діб, МПа	f_c^{28} діб, МПа	В/Ц
1.	1	1	1	1	500	1,2	24	4700	2382	7,2	7,8	10,5	27,8	32,4	36,4	0,46
2.	1	1	1	-1	500	1,2	24	2300	2314	8,1	9,3	10,6	29,6	34,0	37,2	0,45
3.	1	1	-1	1	500	1,2	0	4700	2139	6,4	6,5	8,0	18,2	20,6	27,2	0,40
4.	1	1	-1	-1	500	1,2	0	2300	2139	6,2	7,4	10,3	18,2	24,1	27,2	0,40
5.	1	-1	1	1	500	0	24	4700	2232	4,0	4,1	6,0	19,0	19,8	20	0,66
6.	1	-1	1	-1	500	0	24	2300	2209	2,0	2,9	3,1	16,0	22,5	22,5	0,62
7.	1	-1	-1	1	500	0	0	4700	2264	2,3	3,7	4,3	23,1	24,0	25,8	0,45
8.	1	-1	-1	-1	500	0	0	2300	2264	1,8	2,2	2,5	23,1	24,0	25,8	0,45
9.	-1	1	1	1	200	1,2	24	4700	2195	7,1	8,2	9,8	12,4	14,4	15,6	1,23
10.	-1	1	1	-1	200	1,2	24	3500	2200	2,7	3,7	4,9	8,48	9,96	11,6	1,15
11.	-1	1	-1	1	200	1,2	0	4700	1897	6,1	7,1	8,2	2,68	4,94	5,69	1,00
12.	-1	1	-1	-1	200	1,2	0	3500	1944	5,0	6,1	6,5	1,95	3,38	3,49	0,50
13.	-1	-1	1	1	200	0	24	4700	2228	4,9	6,6	7,0	5,54	8,22	9,91	1,50
14.	-1	-1	1	-1	200	0	24	3500	1981	6,3	6,8	7,9	4,95	7,97	11,3	1,43
15.	-1	-1	-1	1	200	0	0	4700	1945	5,2	7,1	10,6	3,09	4,71	5,91	1,10
16.	-1	-1	-1	-1	200	0	0	3500	1945	5,7	6,5	8,0	8,76	8,82	8,86	0,40
17.	1	0	0	0	500	0,6	12	3500	2257	5,5	8,4	9,4	31,9	34,4	39,4	0,47
18.	-1	0	0	0	200	0,6	12	3500	2252	7,2	7,8	10,5	8,53	14,9	19,7	1,00
19.	0	1	0	0	350	1,2	12	3500	2125	8,1	9,3	10,6	29,8	33,2	35,0	0,56
20.	0	-1	0	0	350	0	12	3500	2050	6,4	6,5	8,0	18,3	24,112	28,6	0,73
21.	0	0	1	0	350	0,6	24	3500	2088	6,2	7,4	10,3	22,5	26,7	32,5	0,71
22.	0	0	-1	0	350	0,6	0	3500	2045	4,0	4,1	6,0	12,9	23,7	25,3	0,46
23.	0	0	0	1	350	0,6	12	4700	2046	2,0	2,9	3,1	20,2	24,2	25,6	0,73
24.	0	0	0	-1	350	0,6	12	3500	2165	2,3	3,7	4,3	25,3	29,1	33,1	0,60

В результаті статистичного аналізу даних було отримано адекватні з довірчою імовірністю 95% рівняння регресії вихідних параметрів (водопотреби бетонної суміші (В/Ц), середньої густини ДЗБ (ρ_0 , г/см³), міцність при стиску (f_c^{28} , МПа) та при згині ($f_{c.tf}^{28}$, МПа) у віці 28 діб:

$$\begin{aligned} \text{В/Ц} = & 0,62 - 0,28X_1 - 0,07X_2 + 0,17X_3 + 0,09X_4 + 0,11X_1^2 + 0,02X_2^2 - \\ & - 0,04X_3^2 + 0,04X_4^2 + 0,005X_1X_2 - 0,11X_1X_3 - 0,08X_1X_4 - \\ & - 0,05X_2X_3 - 0,01X_2X_4 - 0,06X_3X_4 \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} \rho_0 = & 2,12 + 0,09X_1 + 0,01X_2 + 0,07X_3 + 0,01X_4 + 0,13X_1^2 - 0,04X_2^2 - \\ & - 0,06X_3^2 - 0,02X_4^2 - 0,01X_1X_2 - 0,03X_1X_3 - 0,01X_1X_4 + \\ & + 0,05X_2X_3 - 0,02X_2X_4 + 0,02X_3X_4 \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} f_c^{28} = & 33,9 + 9,94X_1 + 2,71X_2 + 2,78X_3 - 0,06X_4 - 4,4X_1^2 - 2,15X_2^2 - \\ & - 5,06X_3^2 - 4,61X_4^2 + 1,59X_1X_2 - 1,4X_1X_3 - 0,82X_1X_4 + \\ & + 1,99X_2X_3 + 0,27X_2X_4 - 0,5X_3X_4 \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} f_{c.tf}^{28} = & 8,9 + 2,62X_1 + 0,99X_2 + 0,3X_3 - 0,11X_4 - 1,65X_1^2 - 0,39X_2^2 - \\ & - 0,544X_3^2 + 0,05X_4^2 + 0,52X_1X_2 + 0,19X_1X_3 - 0,18X_1X_4 + \\ & + 0,8X_2X_3 + 0,05X_2X_4 - 0,14X_3X_4 \end{aligned} \quad (5.4)$$

Водопотреба дрібнозернистої бетонної суміші оцінювалась за В/Ц до досягнення розпливу конуса 180 мм, що відповідає ОК = 9...15 см (марка за рухомістю Р3). Показник В/Ц знаходився у межах 0,4...1,4. Такий широкий діапазон В/Ц є наслідком досить значного інтервалу варіювання витрати цементу (200...500 кг/м³). Витрата води коливалась у межах від 100 до 330 л/м³. Графіки залежності В/Ц від досліджуваних факторів представлені на рис. 5.1. – 5.4.

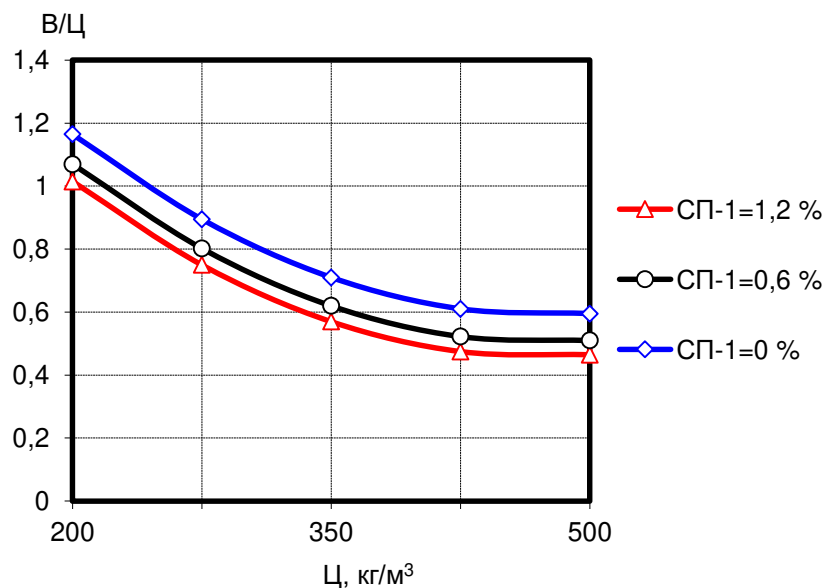


Рисунок 5.1 – Залежність В/Ц від витрати цементу та суперпластифікатора

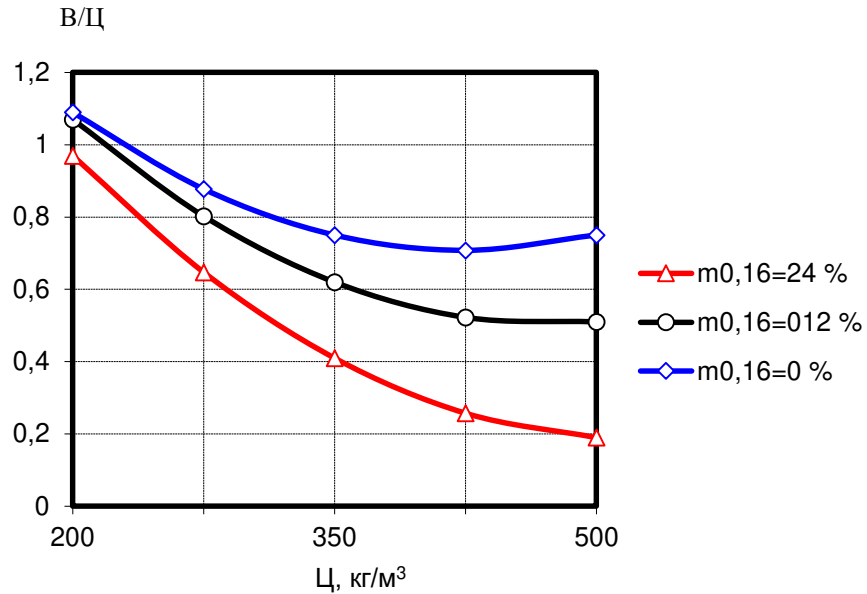


Рисунок 5.2 – Залежність В/Ц від витрати цементу та вмісту дисперсних частинок у відсівах

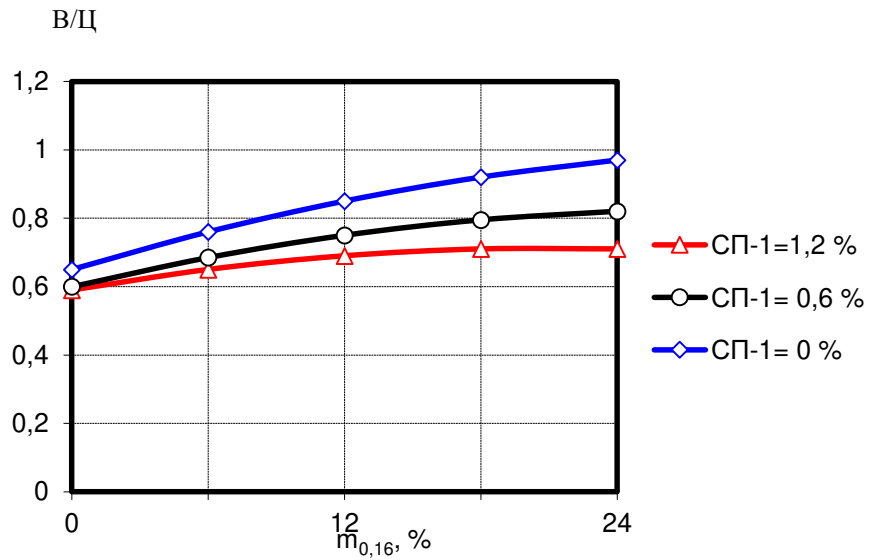


Рисунок 5.3 – Залежність В/Ц від витрати цементу та суперпластифікатора

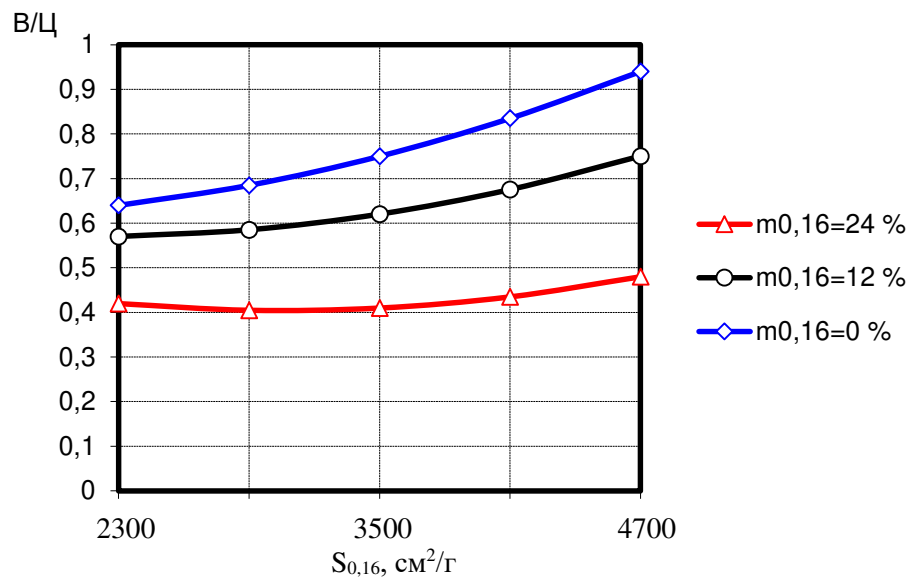


Рисунок 5.4 – Залежність В/Ц від вмісту дисперсних частинок у відсівах та їх питомої поверхні

Аналізуючи вплив досліджуваних факторів слід відмітити, що найбільший лінійний вплив на В/Ц створював фактор X_1 (витрата цементу), близький до нього – фактор X_3 (вміст частинок $<0,16$ мм). Якщо зміна фактора X_1 при переході з нижнього на верхній рівень варіювання викликає зниження В/Ц, то дія фактора X_3 , як слід було очікувати, суттєво підвищує водопотребу бетонної суміші. В свою чергу, додаткове підвищення водопотреби викликає і збільшення фактора X_4 (питомої поверхні гранітного наповнювача).

Фактор X_2 (вміст суперпластифікатора) у деякій мірі компенсує негативний вплив дисперсних частинок, однак, як видно з абсолютних величин відповідних ефектів, цієї компенсації у даному випадку недостатньо. Найважливішими взаємодіями факторів у даній моделі є ті, що можуть знизити водопотребу бетонної суміші при постійній витраті цементу. Так, суттєвий від'ємний ефект b_{23} свідчить про деяку компенсацію збільшення водопотреби, викликаного підвищеною кількістю дисперсних частинок за рахунок суперпластифікатора. Взаємодія факторів X_2 та X_4 значно менша, - розріджуючого ефекту нафталінформальдегідного суперпластифікатора недостатньо, щоб перекрити водопотребу дисперсного граніту з питомою поверхнею $4700 \text{ см}^2/\text{г}$.

Ще одним показником, котрий характеризує властивості бетонних сумішей із гранітним відсівом є середня густина бетонної суміші після ущільнення.

При постійній витраті цементу найбільш впливовим фактором, що сприяє ущільненню бетону є підвищення вмісту дисперсних частинок у гранітних відсівах (X_3). Деяке ущільнення спостерігається також за рахунок збільшення вмісту добавки-суперпластифікатора та дисперсності гранітного пилу (X_2 , X_4). Значні від'ємні квадратичні ефекти свідчать про екстремальний характер залежностей: збільшення вмісту дисперсних частинок у відсівах вище $10...12\%$ знижує густину бетону ймовірно через підвищення водовмісту сумішей.

Міцнісні характеристики дрібнозернистого бетону на гранітному відсвіві вивчалися шляхом визначення границь міцності при стиску та на розтяг при згині у віці 28 діб. Міцність при стиску знаходилась в межах від 1 до 40 МПа. Суттєва різниця у міцності різних експериментальних точок викликана не лише широким інтервалом варіювання витрати цементу, а й одночасною зміною виду заповнювача (гранулометричного складу відсівів подрібнення за рахунок зміни вмісту дисперсних частинок) (рис.5.5 – 5.8).

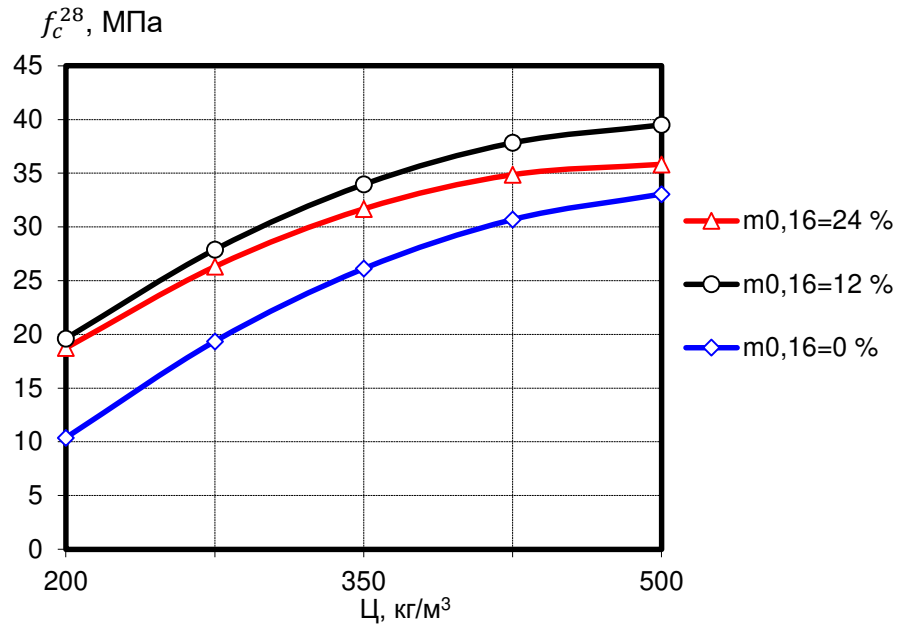


Рисунок 5.5 – Вплив витрати цементу та вмісту дисперсних частинок на міцність ДЗБ при стиску у віці 28 днів

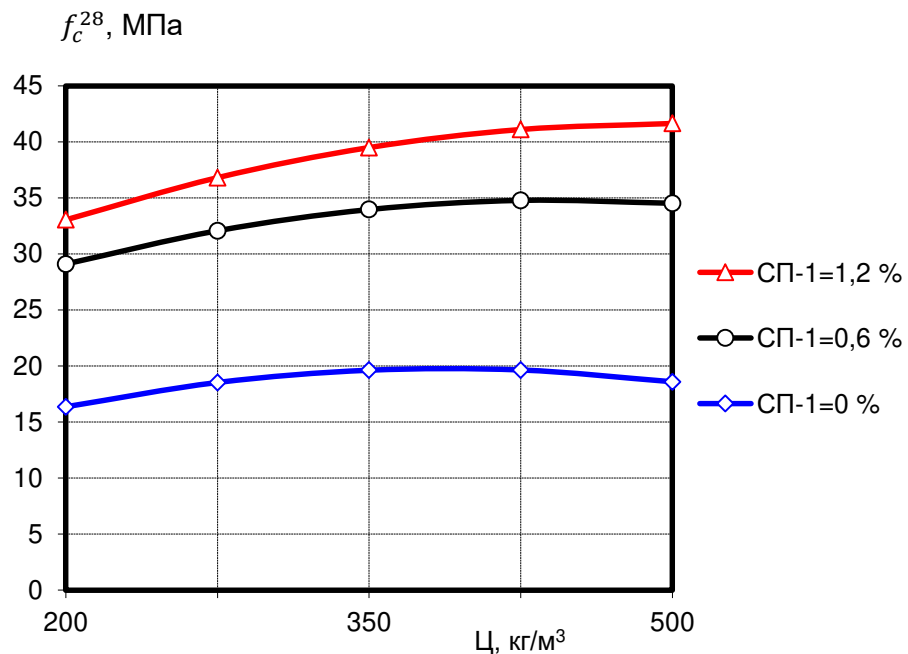


Рисунок 5.6 – Вплив витрати цементу та суперпластифікатора на міцність ДЗБ при стиску у віці 28 днів

Найбільший вплив на міцність з варійованих факторів створює витрата цементу (X_1), що викликає максимальну зміну В/Ц. При постійній витраті цементу фактори X_2 та X_3 (вміст суперпластифікатора та частинок менше 0,16 мм) сприяють підвищенню міцності в однаковій мірі, причому звертає на себе увагу наявність у моделі (5.3) також суттєвого додатнього коефіцієнта взаємодії даних факторів, - підвищення вмісту дисперсних частинок наповнювача з одночасним введенням суперпластифікатора сприяє підвищенню міцності. Присутність у рівнянні (5.4) значних квадратичних ефектів даних факторів вказує на наявність порогових значень даних факторів, після досягнення яких міцність починає знижуватись. Це

особливо помітно для фактора X_3 (вмісту дисперсних частинок гранітних відсівів). Збільшення питомої поверхні гранітного наповнювача призводить до зростання В/Ц. При вмісті частинок $<0,16$ мм у відсівах до 12% спостерігається позитивний вплив на міцність бетону при стиску, а подальше збільшення кількості частинок $<0,16$ мм веде до спаду міцності бетону.

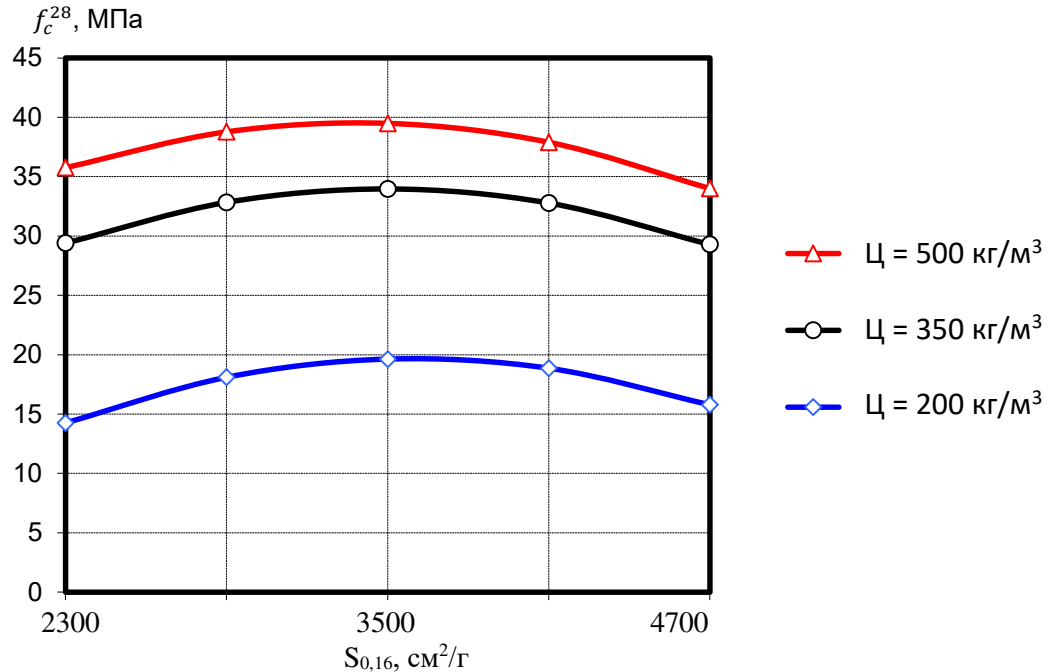


Рис. 5.7 – Вплив витрати цементу та питомої поверхні на міцність ДЗБ при стиску у віці 28 діб

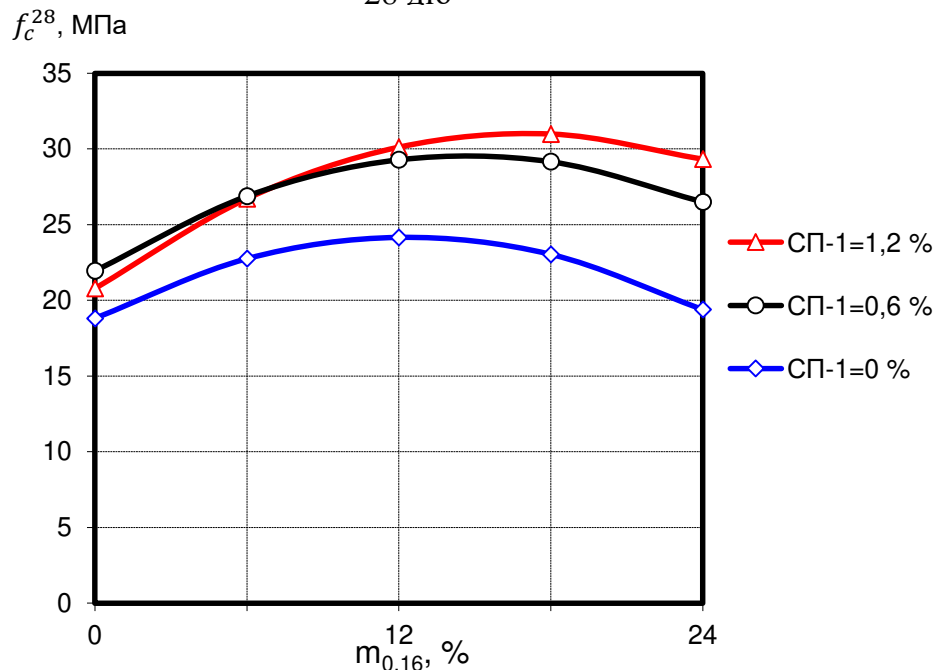


Рисунок 5.8 – Вплив суперпластифікатора та вмісту дисперсних частинок на міцність ДЗБ при стиску у віці 28 діб

Підвищення дисперсності пилюватої складової відсівів викликає деяке підвищення міцності дрібнозернистого бетону (в межах 15... 20%), не дивлячись на підвищення В/Ц. Максимальна питома поверхня, котра викликає зростання

міцності знаходиться у межах 3200...3500 см²/г. Основною умовою позитивного впливу дисперсних частинок, які найбільш сприяють структуроутворенню цементного каменю є розріджуюча дія добавки суперпластифікатора. Це підтверджує присутність у моделі (5.3) додатного ефекту взаємодії даних факторів.

Позитивний вплив частинок гранітних відсівів <0,16 мм на міцність бетону пов'язаний також зі впливом на середню густину. Підвищена пустотність піщаної фракції відсівів при відсутності пилюватих частинок викликає виникнення значного розшарування бетонної суміші, особливо при низьких витратах цементу і високій рухомості суміші. При такому поєднанні факторів мінімальна середня густина бетону складала близько 1900 кг/м³, міцність при стиску, відповідно, 1...3 МПа. Для малоцементних бетонів пилюватий гранітний наповнювач підвищує об'єм цементного тіста, підвищує однорідність і зв'язність суміші, забезпечуючи щільну та однорідну структуру бетону. В таких умовах міцність при стиску підвищується до 10...15 МПа.

Таким чином, на міцність дрібнозернистого бетону на стиск позитивно впливає збільшення витрати цементу, при вмісті у відсіві частинок <0,16 мм 12%, та введенні максимальної кількості суперпластифікатора. Максимальна міцність при даному поєднанні факторів становить 40...42 МПа, при відсутності гранітного наповнювача – 30...32 МПа.

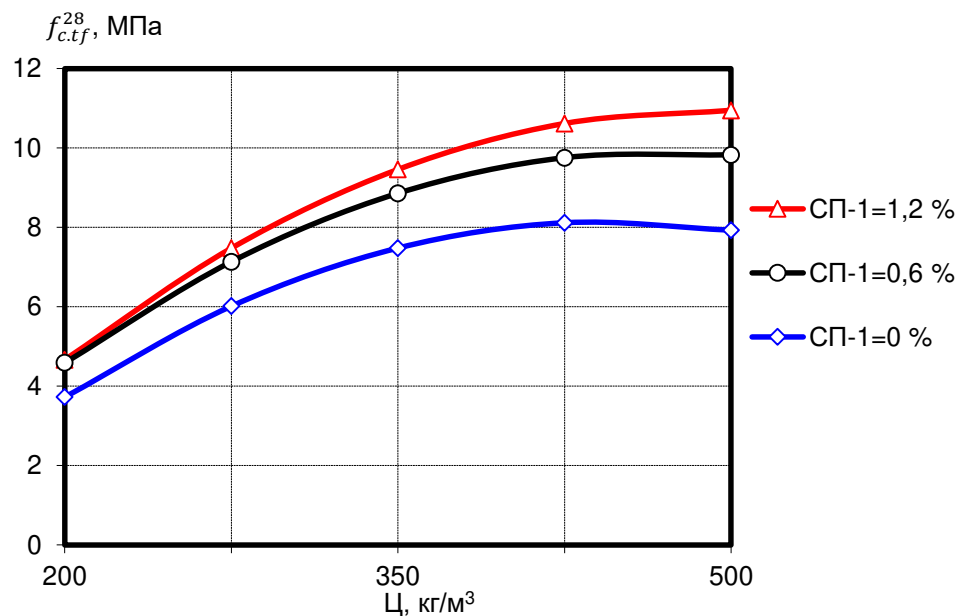


Рисунок 5.9 – Вплив витрати цементу та суперпластифікатора на міцність дрібнозернистого бетону при згині у віці 28 діб

Судячи з математичних моделей (5.4) найбільше впливає на міцність ДЗБ при згині зміна витрати цементу (рис. 5.9 – 5.12). Також на міцність дрібнозернистого бетону при згині позитивно впливає збільшення кількості суперпластифікатора та частинки менше 0,16 мм у відсівах.

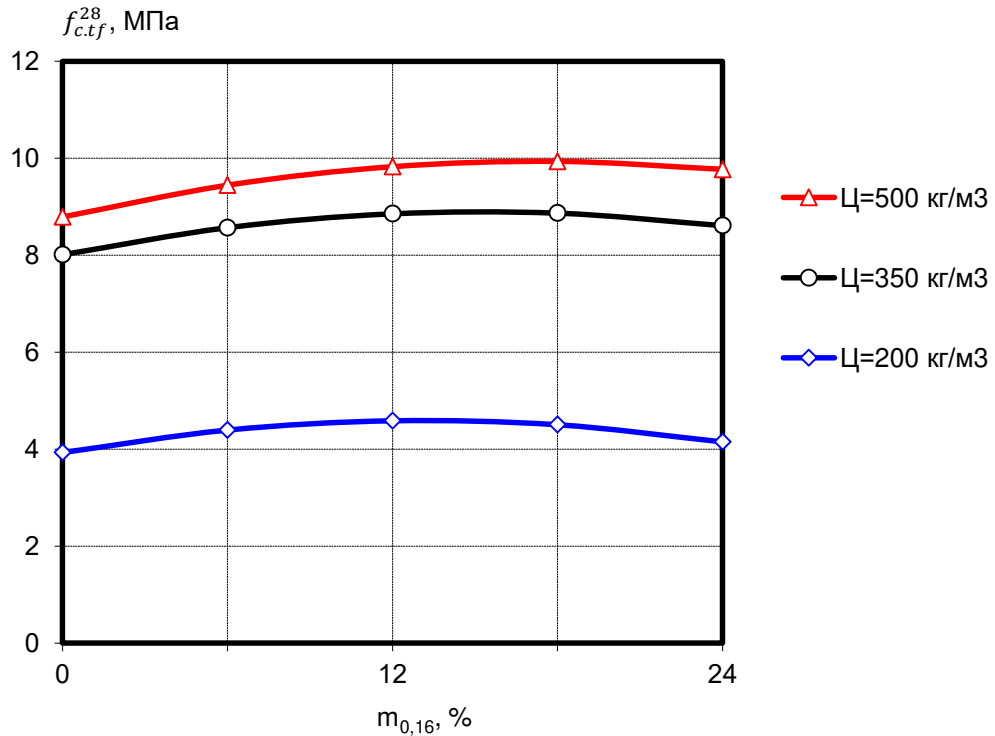


Рисунок 5.10 – Вплив витрати цементу та вмісту дисперсних частинок на міцність дрібнозернистого бетону при згині у віці 28 днів

Отримані результати підтвердили можливість використання гранітного відсіву як основного заповнювача дрібнозернистого бетону і показали можливість позитивного впливу частинок менше 0,16 мм на міцність при умові нейтралізації їх негативного впливу на водопотребу за рахунок добавки суперпластифікатора.

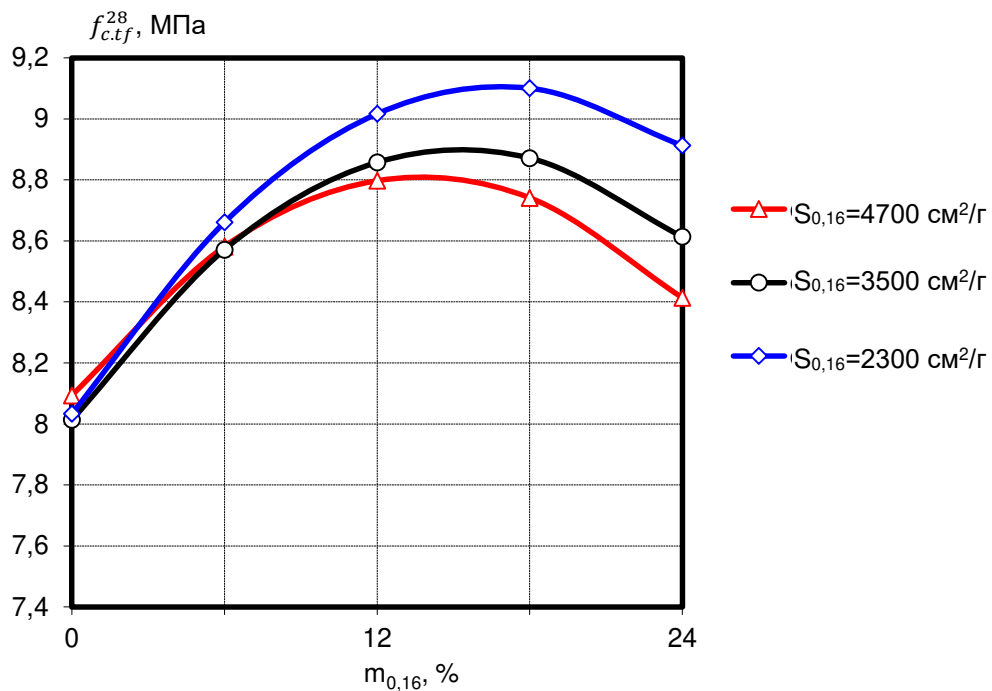


Рисунок 5.11 – Вплив питомої поверхні гранітного наповнювача та його вмісту на міцність ДЗБ при згині у віці 28 днів

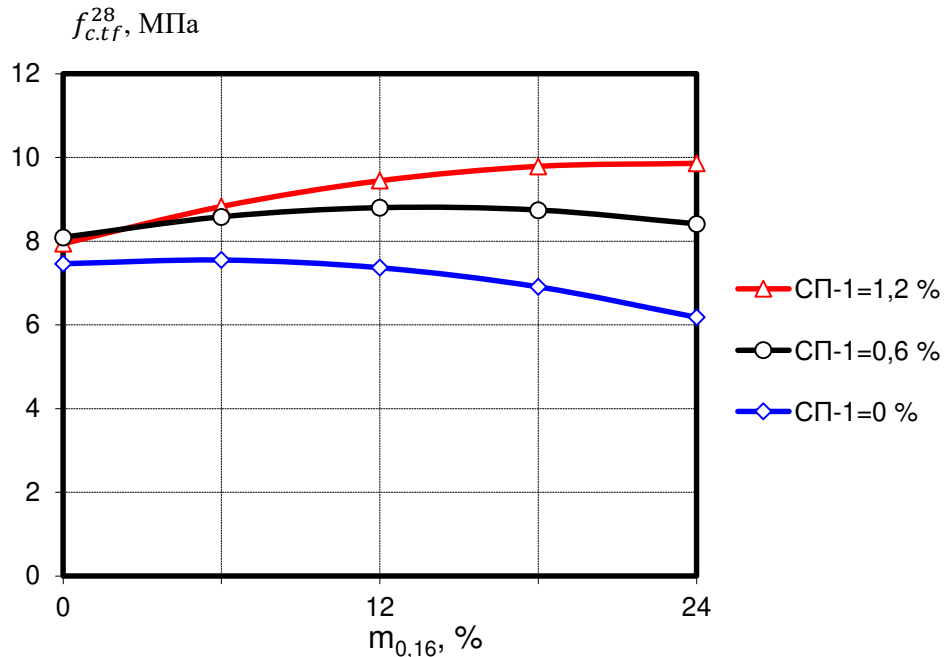


Рисунок 5.12 – Вплив вмісту дисперсних частинок та суперпластифікатора на міцність ДЗБ при згині у віці 28 діб

5.2. Вплив зернового складу заповнювача на основі відходів каменеподрібнення на властивості дрібнозернистого бетону

Результати досліджень, наведені у попередньому розділі показують, що, гранітні відсівки у чистому вигляді, внаслідок підвищеного вмісту пиловидних частинок та підвищеної пористості, не можуть забезпечити отримання дрібнозернистих бетонів підвищеної міцності навіть при нейтралізації пиловатих частинок за рахунок використання суперпластифікаторів нафталін-формальдегідного типу.

Так як відмивання пиловатих частинок є досить дорогим процесом, значний інтерес представляє збагачення відсівів шляхом фракціонування, що реалізується на деяких каменедобувних підприємствах. Розподіл на фракції дає можливість виділити з відсіву дрібний щебінь 2,5...5 мм, крупний пісок 0,63...2,5 мм та дрібний пиловатий пісок 0...0,63 мм. Оптимізація зернового складу відсіву за рахунок коректування вмісту фракцій одночасно із застосуванням добавок-суперпластифікаторів повинна сприяти підбору раціональних композицій для бетону різних класів, в тому числі і високоміцних.

Роботи з проектування зернового складу заповнювачів бетонів [1] були спрямовані на забезпечення мінімальної порожнистості сумішей зерен різної форми і крупності.

Сформувався два підходи для забезпечення щільних сумішей зерен заповнювачів: вибір переривчастого і безперервного їх зернового складу.

Оптимальні співвідношення діаметрів найменших фракцій зерен до діаметру найбільш великої фракції коливаються від 0,07 до 0,04.

Хоча переривчастий зерновий склад і забезпечує меншу порожнистість суміші зерен, відносно до бетонних сумішей більшість дослідників воліє безперервний зерновий склад заповнювачів. Це пояснюється необхідністю при однаковій рухливості бетонних сумішей в останньому випадку меншого обсягу дрібних фракцій і відповідно витрати цементу на обмазку зерен. Крім цього, суміші з безперервним зерновим складом менш схильні до розшарування.

Методика побудови кривих щільних сумішей, використовувана при підборі складу заповнювачів асфальтових бетонів, запропонована М. М. Івановим. Їм прийнято ідеальне співвідношення об'єму кожної наступної фракції до об'єму попередньої, максимальна крупність якої більша в 2 рази (т.зв. коефіцієнт збігу), рівний $\kappa = 0,81$. При розрахунку за формулою Фуллера таке співвідношення (за умови рівності густин кожної фракції) одне $\kappa = 0,707$, за формулою Гуммеля при $n = 0,3$ $\kappa = 0,812$. Досить щільні суміші за М.М. Івановим можна отримати при значенні коефіцієнта збігу в межах 0,65 ... 0,8 [1].

Якщо прийняти вміст у % першої фракції рівним a , то вміст другої буде $a_1\kappa$, третьої $a_2\kappa$ і т.д. Кількість останній фракції має дорівнювати $an^{-1}\kappa$.

Сума об'ємів усіх фракцій може бути записана в наступному виді:

$$a(1 + \kappa + \kappa^2 + \dots + \kappa^{n-1}) = 100\% \quad (5.5)$$

Отже, вміст першої фракції (тобто частковий залишок на відповідному ситі):

$$a_1 = \frac{1 - \kappa}{1 - \kappa^n} \cdot 100 \quad (5.6)$$

Однак, для цементних бетонів використання кривих щільних сумішей заповнювачів раціонально лише в деяких випадках, наприклад, для пресованих або вібропресованих бетонів, що виготовляються з особливо жорстких сумішей.

Були проведені експериментальні дослідження впливу зернового складу відсіву та добавки-суперпластифікатора на властивості бетону із високорухомих сумішей. Експеримент проводився із викорисатнням математичного плану «суміш-технологія-властивість» [154], котрий дає можливість одночасно варіювати вміст основних фракцій заповнювача та параметри складу бетонної суміші (витрата цементу та вміст хімічної добавки). В дослідах використовувався гранітний відсів виробництва ТОВ «ККНК «Технобуд»», портландцемент ПЦ-ІІ/А-Ш-500 та суперпластифікатор СП-1.

Таблиця 5.3 – Умови планування експерименту

Фактори		Рівні варіювання		
Натуральний вид	Код	-1	0	+1
Вміст дрібного щебеню (2,5...10 мм), %	V ₁	25	40	55
Вміст крупного піску (0,63...2,5 мм), %	V ₂	25	40	55
Вміст дрібної фракції (0...0,63 мм), %	V ₃	20	35	50
Вміст суперпластифікатора, (СП, %)	X ₁	0	0,5	1
Витрата цементу, (Ц, кг/м ³)	X ₂	300	400	500

Відсів був розділений на три основних фракції: 2,5...10 мм, 0,63...2,5 мм та 0...0,63 мм. Умови планування експерименту наведені у табл. 5.3. Згідно плану експерименту готувалась дрібнозерниста бетонна суміш з рухомістю, що відповідає марці Р4 – 16...21 см. Характеристикою водопотреби бетонної суміші було прийнято водоцементне відношення (В/Ц), що забезпечувало задану рухомість. З бетонної суміші виготовлялись зразки-куби 10×10×10 см, які піддавали твердінню у нормальних умовах і випробовували у віці 28 діб з визначенням міцності при стиску (f_{28} , МПа). Додатково контролювались характеристики заповнювача: питома поверхня (S , см²/г).

Таблиця 5.4 – Матриця планування та результати експерименту

№ д. т.	Кодовані значення факторів					Вихідні параметри							
	V ₁	V ₂	V ₃	X ₁	X ₂	В/Ц	Міцність, МПа						Пит. поверхня, см ² /г
							f_c^3	f_c^7	f_c^{28}	f_{ctf}^3	f_{ctf}^7	f_{ctf}^{28}	
1.	1	0	0	-1	-1	0,92	12,7	13,9	21,51	4,40	4,90	6,90	6,87
2.	1	0	0	+1	+1	0,43	22,4	38,0	49,00	6,40	8,40	9,20	6,87
3.	0	1	0	-1	-1	1,00	9,0	11,8	19,80	3,40	4,30	5,40	7,49
4.	0	1	0	+1	-1	0,60	17,5	25,8	37,40	6,00	7,20	9,90	7,49
5.	0	1	0	+1	+1	0,46	17,0	27,6	30,00	5,20	6,90	9,30	7,49
6.	0	1	0	-1	+1	0,87	6,5	11,9	21,40	3,40	4,50	5,90	7,49
7.	0	0	1	-1	-1	1,03	6,7	21,5	17,40	3,60	4,80	5,70	4,60
8.	0	0	1	+1	0	0,47	16,6	30,8	42,00	6,60	6,70	10,8	4,60
9.	0	1	1	-1	+1	0,81	13,0	17,4	22,00	5,20	5,80	6,70	4,60

Продовження таблиці 5.4

10.	0,5	0,5	0	0	-1	0,67	24,1	17,3	35,40	7,50	7,70	9,40	7,18
11.	0,8	0,2	0	-1	+1	0,79	18,6	9,3	27,20	5,40	5,87	7,30	6,99
12.	0,3	0	0,7	+1	+1	0,45	30,0	33,5	42,80	7,90	8,50	9,60	2,28
13.	0,5	0	0,5	+1	-1	0,55	28,3	25,0	37,80	7,10	8,60	12,9	10,73
14.	0,6	0	0,4	0	0	0,57	30,5	32,7	34,20	7,50	7,97	8,20	9,96
15.	0	0,4	0,6	0	-1	0,74	9,0	11,2	18,80	3,30	4,30	6,40	11,75
16.	0	0,5	0,5	-1	0	0,83	8,9	14,2	18,20	3,70	4,40	7,40	11,04

В результаті експерименту отримані адекватні математичні моделі вихідних параметрів, наведені нижче:

$$V/C = 0,54V_1 + 0,6V_2 + 0,61V_3 - 0,17V_1V_2 - 0,02V_1V_3 - 0,11V_2V_3 - 0,2V_1x_1 - 0,05V_1x_2 - 0,2V_2x_1 - 0,07V_2x_2 - 0,2V_3x_1 - 0,08V_3x_2 + 0,05x_1^2 + 0,07x_2^2 \quad (5.7)$$

$$f_{cm\ 28} = 38,8V_1 + 25,3V_2 + 32V_3 + 20V_1V_2 - 7,6V_1V_3 - 27,5V_2V_3 + 12,1V_1x_1 + 1,7V_1x_2 + 6,6V_2x_1 - 1,5V_2x_2 + 8,9V_3x_1 + 3,2V_3x_2 - 0,1x_1x_2 - 4,6x_1^2 + 1,3x_2^2 \quad (5.8)$$

Водопотреба бетонної суміші до досягнення заданої легковкладальності (В/Ц) змінювалась у широкому діапазоні – від 0,28 до 0,87. Такий діапазон викликаний спільною дією різних впливових факторів: зміна фактора X_2 (витрата цементу) викликає зниження В/Ц в середньому від 0,37 до 0,82, фактора X_1 (вміст суперпластифікатора) – від 0,72 до 0,53. Фактори зернового складу переважно змінюють водопотребу у відповідності до зміни питомої поверхні заповнювача. Збільшення вмісту фракції 2,5...10 мм знижує В/Ц на 0,03...0,05, збільшення фракцій 0,63...2,5 та 0...0,63 мм, в основному, підвищують водопотребу бетонної суміші. Поряд з цим вплив фракції 0...0,63 мм неоднозначний – при збільшенні вмісту фракції до 40% від варійованого діапазону водопотреба знижується і лише далі спостерігається її підвищення. Як відомо [82], мінеральні наповнювачі здатні підвищувати рухомість розчинів та бетонів при відсутності впливу на водопотребу. В даному випадку невелика кількість дрібної фракції, котра містить до 40% частинок менше 0,16 мм підвищує текучість суміші при нівелюванні негативного впливу за рахунок суперпластифікатора. При подальшому збільшенні вмісту гранітного піску водопотреба все ж підвищується.

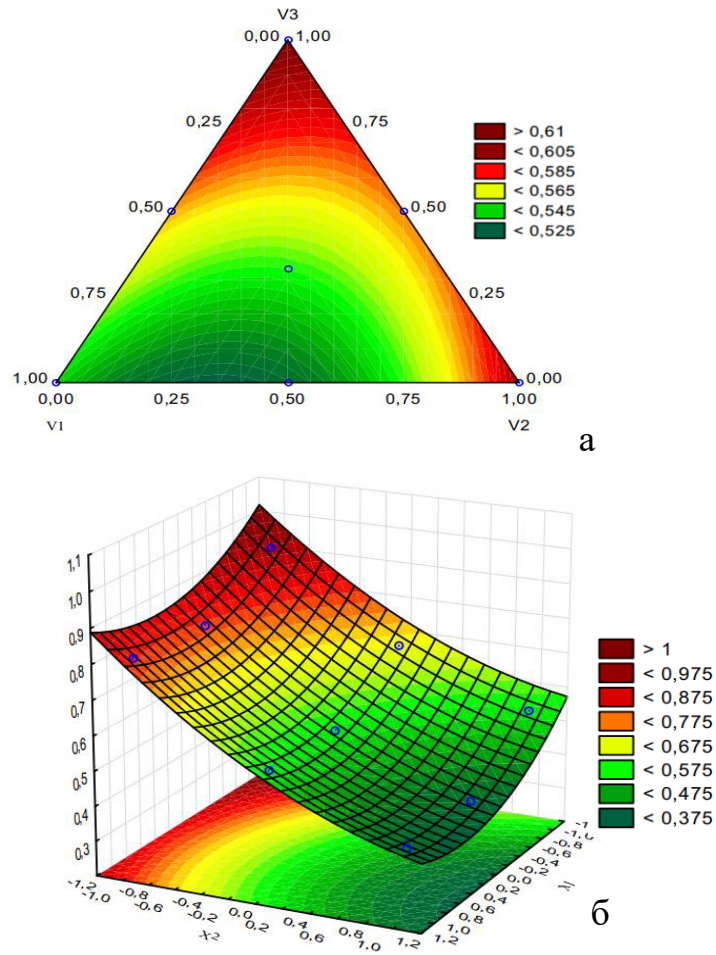


Рисунок 5.13 – Ізопараметрична діаграма (а) та поверхня відгуку (б) водоцементного відношення дрібнозернистого бетону

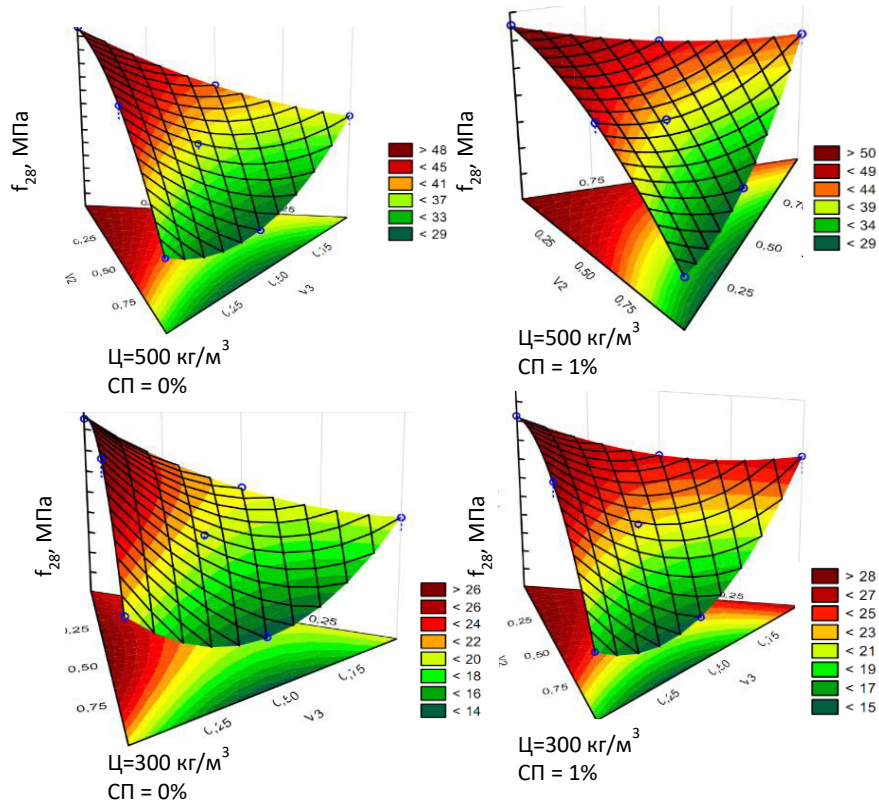


Рисунок 5.14 – Поверхні відгуку міцності при стиску у віці 28 діб.

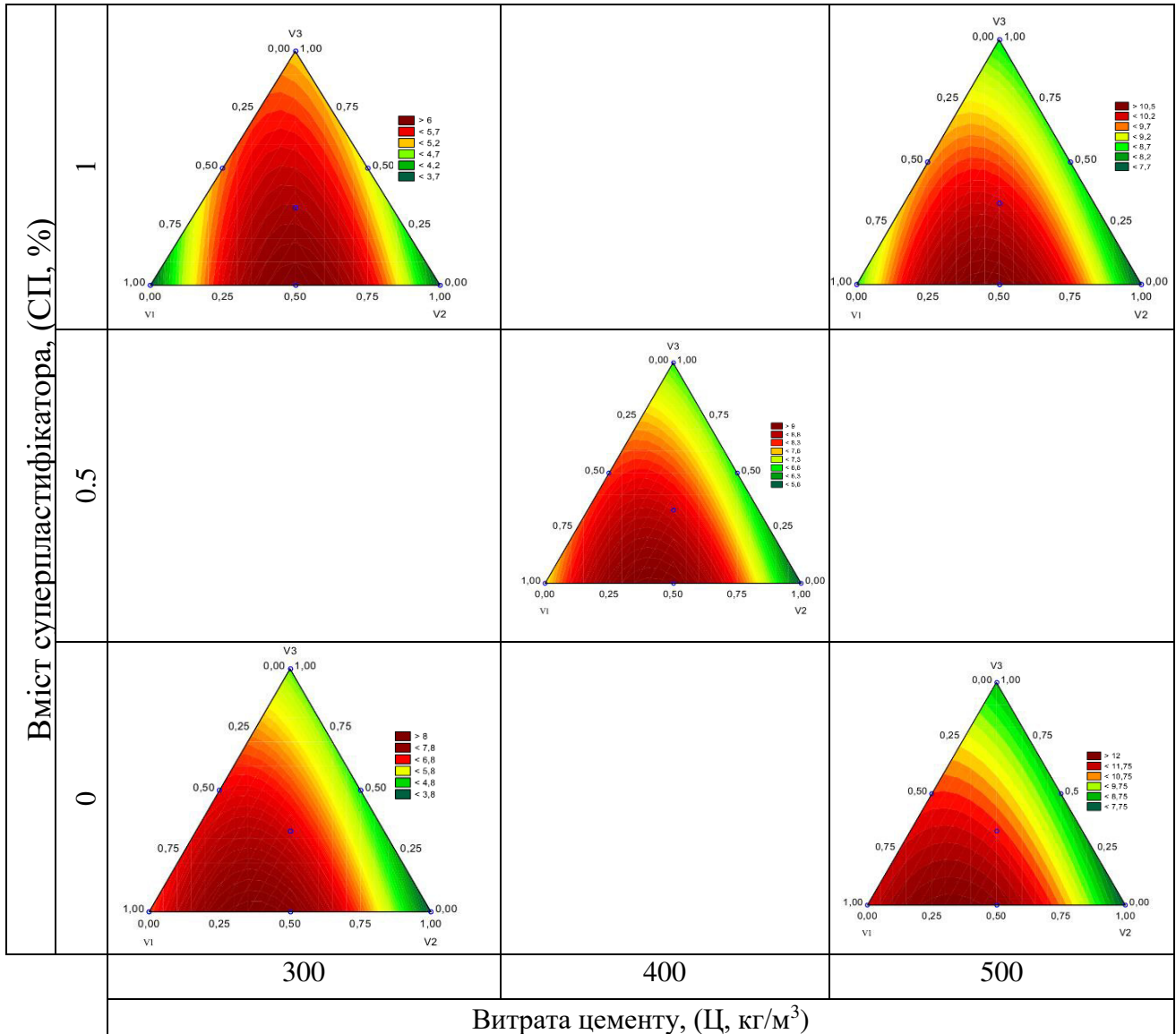


Рисунок 5.15 – Діаграма зміни оптимуму зернового складу гранітних відсівів з позиції досягнення максимальної міцності при згині залежно від витрати цементу та вмісту суперпластифікатора

Міцність бетону при стиску у віці 28 діб змінюється від 18 до 50 МПа (рис.5). Найбільш впливовим фактором є X_2 (витрата цементу). Спостерігається також позитивний вплив суперпластифікатора (X_1), однак суттєвий негативний квадратичний ефект даного фактора в моделі (5.8) свідчить про існування оптимальної кількості в межах області варіювання. Максимальне підвищення міцності спостерігається при вмісті добавки 0,4...0,5%. Вплив зернового складу на міцність, в основному, узгоджується зі впливом складових на водопотребу (рис. 5.12-5.13): область максимальної міцності 45...50 МПа практично співпадає з мінімумом В/Ц (2,5...10 мм – 45...55%; 0,63...2,5 мм – 25...40%; 0...0,63 мм – 20...35%). При підвищенні вмісту суперпластифікатора знижується негативний вплив дисперсних частинок і збільшується поріг їх корисної кількості.

Отримані бетони характеризувались досить високими значеннями міцності при згині (при деяких співвідношеннях факторів до 12 МПа), що пов'язане з особливостями дрібнозернистих бетонів, для яких зазвичай співвідношення між міцністю при стиску та при згині вище ніж для звичайних бетонів внаслідок більшої однорідності [170]. Також підвищена міцність при згині може бути викликана особливістю гранітних відсівів, для яких характерна наявність зерен лещадної і голчатої форми, котрі можуть проявляти деякий армуючий ефект [71].

Оптимум гранулометричного складу гранітного заповнювача, котрий забезпечує максимальну міцність ДЗБ при згині (рис. 5.14) зміщений стосовно оптимуму з позиції найбільшої міцності при стиску в сторону більшого вмісту зерен середніх та дрібних фракцій, котрі забезпечують більшу однорідність бетону. З підвищенням об'єму цементного тіста, що також зі свого боку сприяє підвищенню однорідності у бетоні оптимиуми зближуються.

З економічної точки зору при використанні фракціонованих (збагачених) відсівів важливим є максимальне використання фракції 0...0,63 мм при мінімальній витраті цементу і ефективній кількості суперпластифікатора. Отримані математичні моделі дають можливість розрахувати найбільш економічні склади бетону для різних проектних класів.

5.3. Оптимізація технологічних параметрів отримання дрібнозернистого бетону підвищеної міцності

Результати досліджень міцності ДЗБ, наведені у п. 5.1. показують, що використання суперпластифікатора нафталін-формальдегідного типу, яким є добавка СП-1 не дозволяє при використанні гранітних відсівів забезпечити досягнення низьких значень В/Ц, необхідних для отримання високоміцних бетонів. Тому для подальших досліджень з метою досягнення В/Ц в межах 0,25...0,35 та досягнення високої міцності було використано суперпластифікатор більшої ефективності полікарбоксилатного типу Melflux 2141f, а також гранітні відсіві оптимізованого гранулометричного складу (згідно п. 5.2.).

Для встановлення складу та технологічних параметрів отримання ДЗБ підвищеної міцності проведено дослідження за планом В₃ [154], умови планування експериментів наведені у табл. 4.1, результати – у табл. 5.5.

В результаті статистичного аналізу експериментальних даних отримані адекватні з довірчою ймовірністю 95% рівняння регресії міцності бетону при стиску у віці 1, 7, 28 діб.

$$f_{cm1} = 11,75 + 1,44x_1 + 1,67x_2 + 3,9x_3 - 0,03x_4 - 0,3x_1^2 - 0,85x_2^2 - 1,1x_3^2 - 1,98x_4^2 - 1,15x_1x_2 + 1,78x_1x_3 - 0,61x_1x_4 + 1,18x_2x_3 - 0,38x_3x_4 \quad (5.9)$$

$$f_{cm7} = 49,52 + 2,6x_1 + 4,34x_2 + 11,3x_3 - 0,04x_4 - 6,1x_1^2 - 2,95x_2^2 - 6,8x_3^2 - 2,7x_4^2 - 1,86x_1x_2 + 4,1x_1x_3 - 0,72x_1x_4 + 1,6x_2x_3 + 1,6x_2x_4 - 1,6x_3x_4 \quad (5.10)$$

$$f_{cm28} = 60,2 + 3,1x_1 + 4x_2 + 12,4x_3 - 0,4x_4 + 0,1x_1^2 - 3,7x_2^2 - 10,94x_3^2 - 4,5x_4^2 - 1,71x_1x_2 + 2,76x_1x_3 - 1,1x_1x_4 + 1,9x_2x_3 + 0,32x_2x_4 - 0,9x_3x_4 \quad (5.11)$$

Таблиця 5.5 – Матриця планування експерименту та результати випробувань

Точки плану	Кодовані значення факторів				ОК, см	Вихідні параметри		
	X_1	X_2	X_3	X_4		f_{cm1}	f_{cm7}	f_{cm28}
1.	1	1	1	1	20...25	15,4	51,9	62,8
2.	1	1	1	-1		17,3	54,1	66,3
3.	1	1	-1	1		2,5	19,0	30,5
4.	1	1	-1	-1		2,7	19,1	30,5
5.	1	-1	1	1		11,8	43,4	51,8
6.	1	-1	1	-1		14,1	46,3	56,6
7.	1	-1	-1	1		3,6	16,9	24,6
8.	1	-1	-1	-1		4,2	17,7	25,9
9.	-1	1	1	1		12,5	43,7	54,4
10.	-1	1	1	-1		11,9	43,0	53,5
11.	-1	1	-1	1		6,6	27,1	33,4
12.	-1	1	-1	-1		4,5	24,4	29,0
13.	-1	-1	1	1		4,3	27,8	41,1
14.	-1	-1	1	-1		4,1	27,8	41,5
15.	-1	-1	-1	1		3,1	17,6	25,2
16.	-1	-1	-1	-1		1,4	15,5	22,1
17.	1	0	0	0		12,9	46,0	63,3
18.	-1	0	0	0		10,0	40,8	57,2
19.	0	1	0	0		12,6	50,9	60,8
20.	0	-1	0	0		9,2	42,2	51,9
21.	0	0	1	0		14,6	54,0	62,1
22.	0	0	-1	0		6,7	31,4	36,2
23.	0	0	0	1		9,7	46,8	55,7
24.	0	0	0	-1		9,8	46,9	55,9

Отримані моделі міцності бетону на стиск (5.9-5.11) дозволили оцінити вплив пилюватої фракції $\leq 0,16$ мм та добавки суперпластифікатора на кінетику набору міцності. Як і очікувалось, збільшення вмісту пилюватої фракції $\leq 0,16$ мм від 10 до 20% від маси заповнювачів без введення добавки суперпластифікатора призводить до зростання водопотреби бетонної суміші на 20% (рис. 5.1) та зниження міцності як в ранньому так і в марочному віці 10...15% (рис 5.16). Одночасне збільшення кількості добавки суперпластифікатора і пилюватої фракції $\leq 0,16$ мм позитивно відображається на міцності бетону протягом всього періоду набору міцності. У віці 1 доби зростання двох варійованих факторів (X_1) та (X_3) дозволяє збільшити міцність бетону при стиску на 180...240% у порівнянні із зразками без введення добавки суперпластифікатора, а у віці 7 діб отримати 80% від марочної міцності.

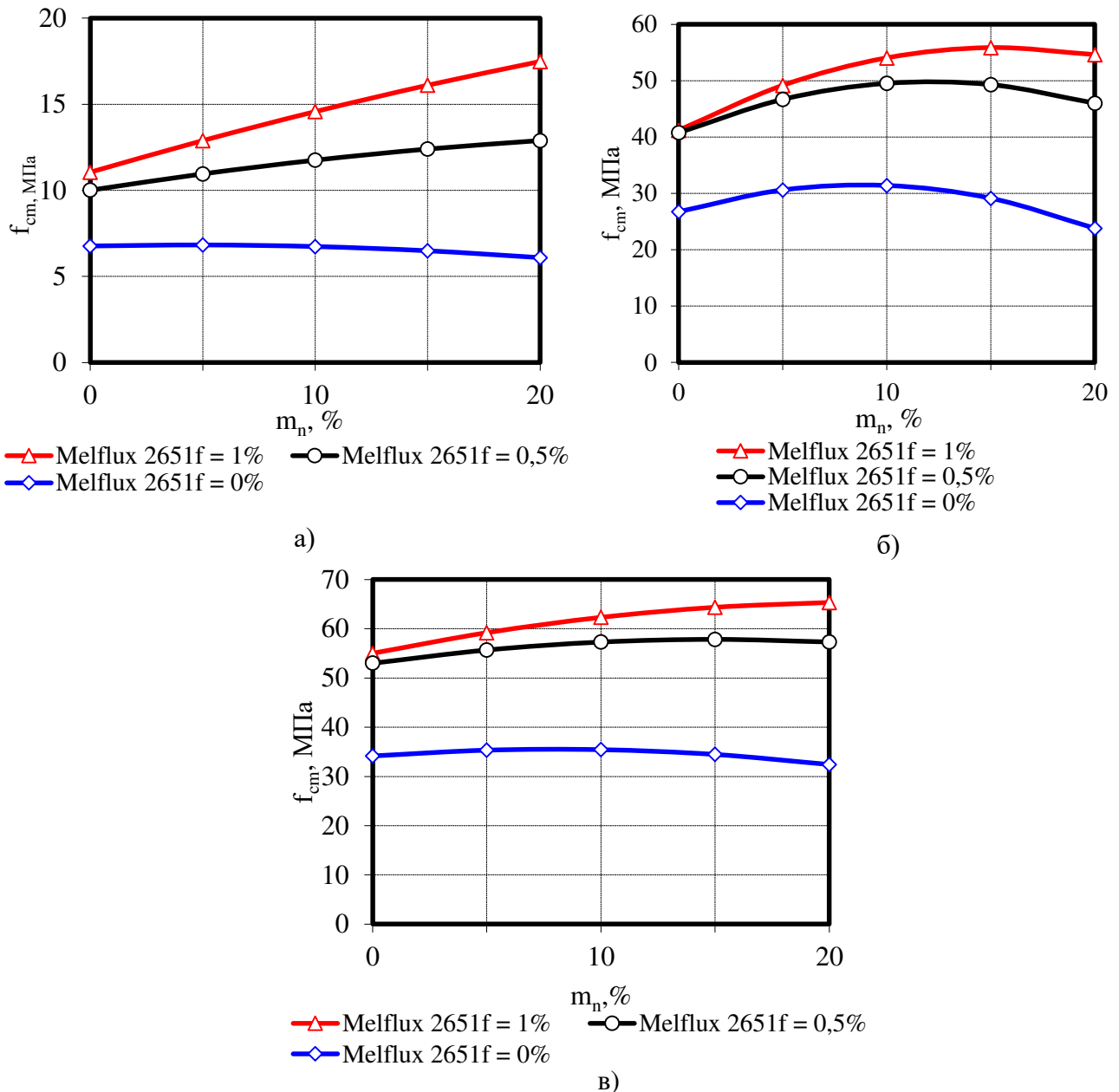


Рисунок 5.16. Вплив частки пилуватої фракції при різній витраті суперпластифікатора на міцність бетону при стиску:

а - у віці 1 доби,

б – у віці 7 діб,

в – у віці 28 діб.

Таким чином, за рахунок використання полікарбосилатного суперпластифікатора та використання заповнювача з оптимізованим гранулометричним складом досягаються низькі значення В/Ц ДЗБ на гранітних відсівах, що забезпечує отримання міцності близько 60...65 МПа. Тобто бетон даного виду можна віднести уже до високоміцних.

Одним із найважливіших факторів для отримання високоміцних бетонів, здатних забезпечити і механічні властивості, і довговічність конструкції є низьке

(в межах 0,25-0,35) водоцементне відношення. При забезпеченні необхідних значень В/Ц, можливе отримання бетонів підвищеної міцності і на заповнювачах нижчої якості при деякій нейтралізації негативного впливу пилюватих частинок на водопотребу. Таким чином, раціональне застосування відсівів подрібнення одночасно з сучасними методами зниження водопотреби бетонних сумішей дає можливість використовувати їх для отримання навіть високоміцних бетонів і може перетворити відсів на цінний продукт, здатний забезпечити необхідні вимоги до бетону.

Максимальна міцність дрібнозернистого бетону при стиску, що була отримана на гранітних відсівах, становить 60...66 МПа. Додатковим джерелом підвищення міцності дрібнозернистих бетонів на відсівах може бути спільне використання полікарбоксилатних суперпластифікаторів та високоактивних мінеральних добавок, таких як мікрокремнезем та метакаолін [3, 20, 171].

У досліджах використовували портландцемент ПЦ І-А-500, полікарбоксилатні суперпластифікатори Melflux 2651F і Sika Viscocrete 225P (табл. 5.4), а також високоактивні мінеральні добавки – метакаолін (ТОВ "Західна каолінова компанія") та мікрокремнезем (відхід виробництва Стаханівського заводу феросплавів). Для коригування зернового складу незбагачених відсівів з $M_{кр}=3,23$ зі вмістом частинок $<0,16$ мм 17% до них добавляли пісок з відсівів фракції 2,5-5 мм у кількості 20%.

Бетони характеризувались однаковим масовим співвідношенням кількості заповнювача і цементу (З/Ц=3). Рухомість бетонної суміші змінювали у межах марки РЗ (9...15 см). Визначали міцність бетону при стиску у віці 3, 7, 28 діб шляхом випробувань зразків-кубів (100×100×100 мм). Результати випробувань представлено в табл. 5.6.

Таблиця 5.6 – Вплив добавок на міцність дрібнозернистих бетонів на гранітних відсівах

№ серії	Вид суперпластифікатора та його кількість, %	Мінеральна добавка, мас %	Водоцементне відношення, В/Ц	Осадка конуса, см	Міцність при стиску (МПа), у віці (діб)		
					3	7	28
0	-	-	0,5	12	25	34	45

1	Melflux 2651F, 0,5%	-	0,32	12	63	71	78
2	Sika VC 225P, 0,5%	-	0,34	14	45	69	76
3	Melflux 2651F, 0,5%	метакаолін, 5%	0,37	12	43	48	53
4	Melflux 2651F, 0,5%	мікрокремнезем, 5%	0,35	13	40	56	62
5	Melflux 2651F, 1%	метакаолін, 5%	0,35	13	60	75	85
6	Melflux 2651F, 1%	мікрокремнезем, 5%	0,33	14	58	80	90

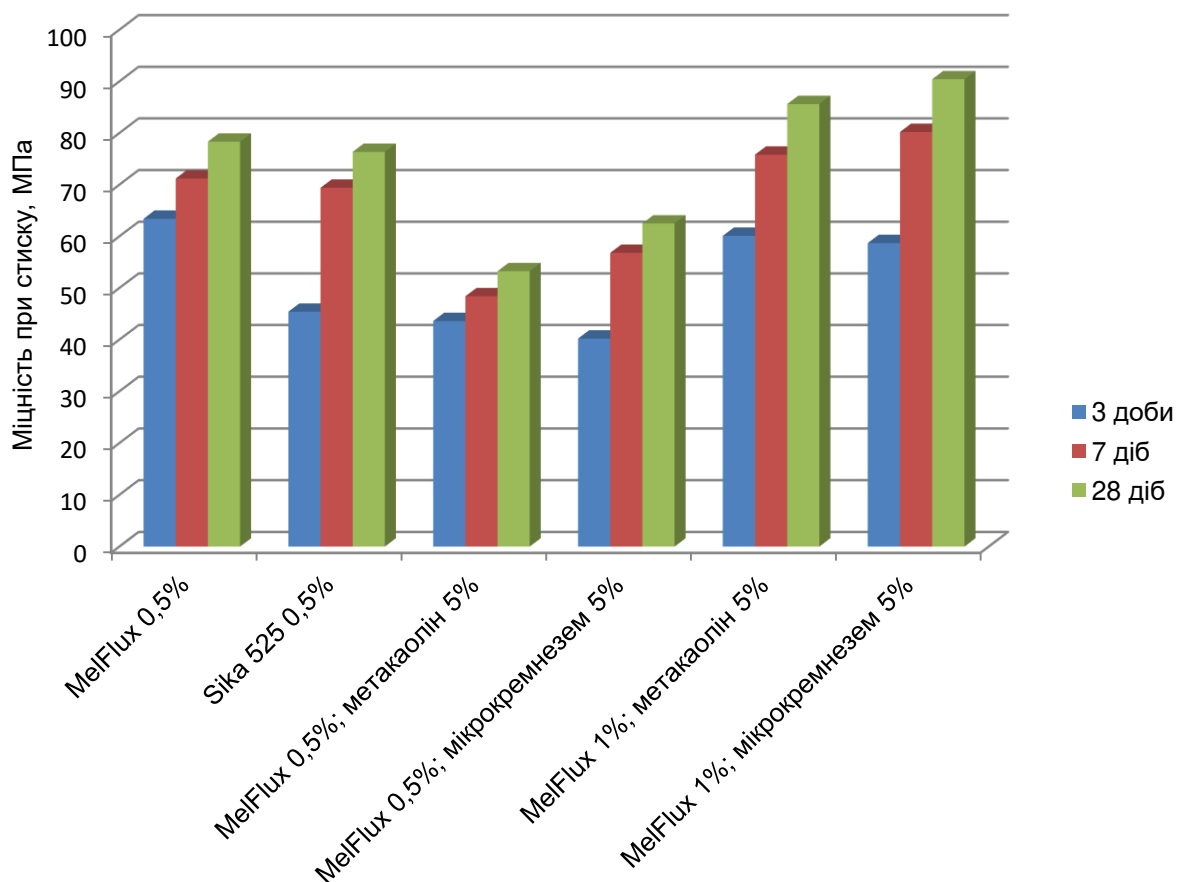


Рисунок 5.17 – Залежність міцності дрібнозернистих бетонів від виду добавок

Максимальні значення міцності при стиску дрібнозернистого бетону на гранітних відсівах, що отримані в результаті експериментів, склали (85-90) МПа. Найбільш впливовим фактором, що забезпечує отримання підвищеної міцності, виявилось низьке В/Ц бетону (0,32...0,37), що досягається при використанні суперпластифікаторів. Так, при введенні добавки Melflux 2651f у кількості 0,5% від маси цементу задана рухомість бетонної суміші була досягнута при В/Ц = 0,32, а в сумішах з добавкою Sika Viscocrete 225P (0,5%) – при В/Ц = 0,34. Значення міцності у віці 28 діб склали, для зазначених добавок становили відповідно, – 78 і 76 МПа.

Введення високоактивних мінеральних добавок (метакаоліну і мікрокремнезему) при незмінній кількості суперпластифікатора (Melflux 2651F) підвищило В/Ц (до 0,37 і 0,35, відповідно). Підвищення водопотреби бетонних сумішей мінеральними добавками практично не спостерігалось при збільшенні вмісту суперпластифікатора до 1%. Підвищення міцності бетону, що викликане високоактивними мінеральними добавками при низьких значеннях В/Ц, підтверджують відомі дані [3].

Для кількісного оцінювання впливу факторів складу на властивості високоміцного дрібнозернистого бетону на гранітних відсівах були реалізовані алгоритмізовані досліді за планом V_3 [154]. В якості варійованих факторів вибрані: витрата суперпластифікатора полікарбоксилатного типу Melflux 2651f (Д, % (X_1)), вміст частинок менше 0,16 мм у гранітних відсівах ($m_{0,16, \%}$ (X_2)), витрата метакаоліну (МК, % (X_3)). Умови планування експериментів приведені в табл. 2. В досліді використовувались відсіви з відкоригованим зерновим складом. Склад бетону, за виключенням варійованих добавок, при проведенні експериментів був прийнятий постійним ($\rho = 545 \text{ кг/м}^3$, $\rho_s = 1640 \text{ кг/м}^3$). Визначали такі параметри: В/Ц бетонної суміші, що необхідне для досягнення марки за рухомістю Р4 ($OK = 16-21 \text{ см}$) і границя міцності бетону при стиску у віці 1 (f_c^1) і 28 (f_c^{28}) діб.

Таблиця 5.7 – Умови планування експериментів

№ з/п	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	Натуральний вид	Кодований	-1	0	1	
1	Витрата суперпластифікатора Melflux 2651F, (Д, %)	X_1	0	0,35	0,7	0,35
2	Вміст частинок менше 0,16 мм у відсівах ($m_{0,16, \%}$)	X_2	0	6	12	6
3	Вміст метакаоліну (МК, %)	X_3	0	4	8	4

Рівняння регресії для даних параметрів залежно від значення варійованих факторів представлені нижче

$$V/C = 0,35 - 0,079x_1 + 0,02x_2 + 0,052x_3 + 0,026x_1^2 - 0,014x_2^2 + 0,011x_3^2 - 0,018x_1x_2 - 0,03x_1x_3 + 0,003x_2x_3 \quad (5.12)$$

$$f_c^1 = 21,99 + 2,71x_1 + 0,34x_2 + 0,19x_3 - 0,83x_1^2 + 0,022x_2^2 - 2,37x_3^2 + 0,538x_1x_2 - 0,063x_1x_3 - 0,113x_2x_3 \quad (5.13)$$

$$f_c^{28} = 64 + 6,64x_1 + 2,7x_2 + 6,3x_3 - 1,1x_1^2 - 4,7x_2^2 - 8,33x_3^2 + 4,18x_1x_2 + 6,8x_1x_3 - 4x_2x_3 \quad (5.14)$$

Усі варійовані фактори, як слідує з аналізу рівнянь (5.12 і 5.13), викликають суттєві зміни водопотреби бетонної суміші і, як наслідок, В/Ц і міцності бетону. За величиною досягнутого ефекту фактори можна проранжувати у послідовності:

$$x_1(D) > x_3(MK) > x_2(m_{0,16}).$$

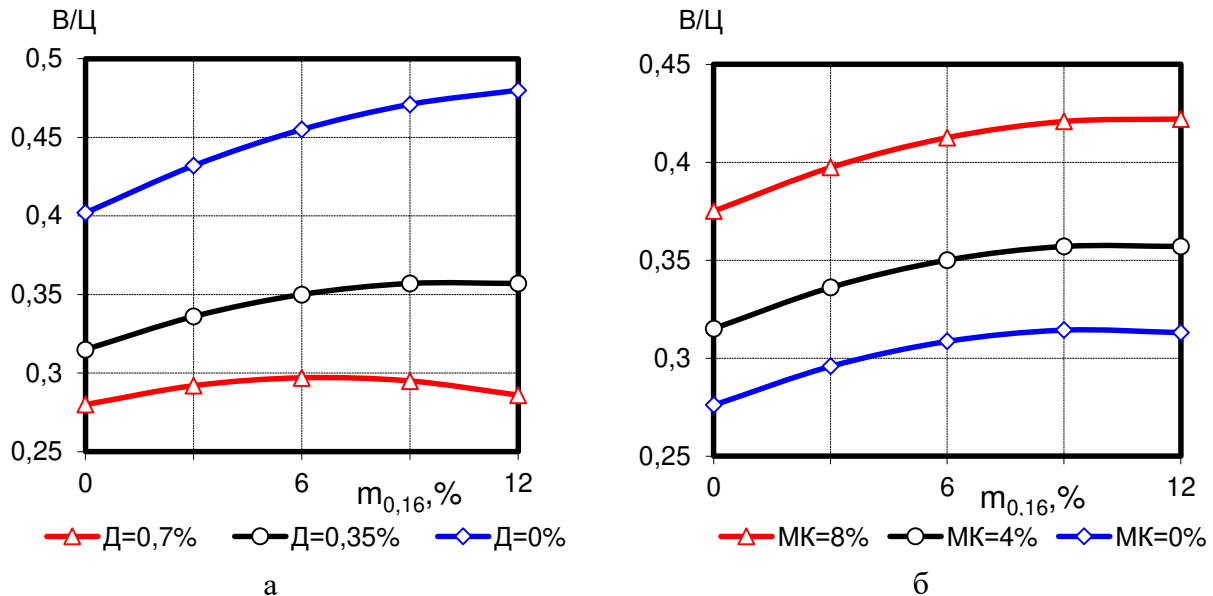


Рисунок 5.18 - Залежність водоцементного відношення бетону від:
 а – вмісту частинок <0,16 та вмісту суперпластифікатора;
 б – вмісту частинок <0,16 та вмісту метакаоліну

Найбільш значними взаємодіями факторів у рівнянні (5.12) є «витрата суперпластифікатора – вміст метакаоліну» і «витрата суперпластифікатора–вміст частинок <0,16 мм», які підтверджують можливість нівелювання негативного впливу у відсівах дисперсних частинок за рахунок суперпластифікатора при низьких значеннях В/Ц (рис. 5.18).

Графічні залежності (рис. 5.19), що отримані аналізом відповідної експериментально-статистичної моделі, свідчать про можливість отримання при заданих умовах дрібнозернистого бетону на гранітних відсівах з максимальною міцністю у віці 28 діб 72...75 МПа. Максимальне підвищення міцності спостерігається при оптимальних значеннях факторів X_1 і X_2 . При цьому ефект зміни фактора X_2 вмісту частинок < 0,16 мм у варійованих границях майже у 2 рази менше ніж витрати суперпластифікатора. Збільшення суперпластифікатора (X_1) призводить до практично лінійного зростання міцності, що, в основному, відповідає характеру зміни досягнутого В/Ц бетонної суміші. Для факторів X_2 і X_3 , що (вплив дисперсних мінеральних наповнювачів), характерна наявність у рівняннях міцності суттєвих квадратичних ефектів зі знаком «-», що свідчать про наявність граничної області їх ефективної дії. Зі збільшенням вмісту

суперпластифікатора ефект дисперсних мінеральних компонентів (гранітного пилу і метакаоліну) суттєво зростає. В складах, які не містять добавку суперпластифікатора, збільшення частинок <0,16 мм у відсівах до (4-5)%. Практично не відображається на міцності бетону. При подальшому підвищенні вмісту пиловидних частинок міцність знижується на (23-25)%.

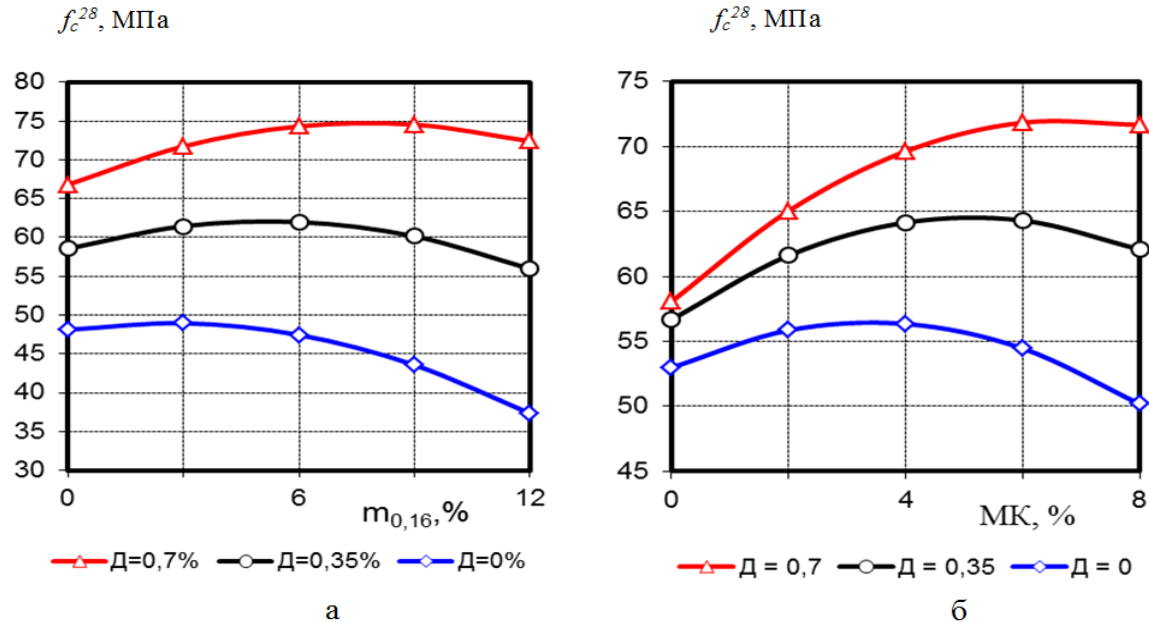


Рисунок 5.19 – Залежність міцності дрібнозернистого бетону у віці 28 діб від кількості суперпластифікатора і вмісту: частинок <0,16 мм у відсівах (а), метакаоліну (б)

Введення добавки Melflux 2651F сприяє позитивному впливу гранітного наповнювача, що викликає при оптимальному поєднанні факторів підвищення міцності бетону на 12...16%. Ефективний вміст гранітного пилу у відсівах зростає зі збільшенням вмісту суперпластифікатора: при вмісті добавки Melflux 2651F 0,35% позитивний ефект зберігається до (6-7)% вмісту пилу, при максимальному вмісті Melflux 2651F (0,7% від маси цементу) – до 8...9% вмісту пилу. Метакаолін (фактор X_3), внаслідок високої дисперсності і пуцоланової активності, забезпечує більшу ефективність ніж гранітний пил. Підвищення міцності дрібнозернистого бетону за рахунок метакаоліну становить (35-38)%, що узгоджуються з відомими даними [171]. Як і для пиловатої фракції відсівів, ефективність введення метакаоліну суттєво зростає при веденні суперпластифікатора, хоча підвищення міцності до (8...10%) спостерігається і для непластифікованих сумішей.

Ефект взаємодії факторів (X_2 і X_3) у рівняннях (1)-(3), що характеризують вміст наповнювачів, негативний, що свідчить про зниження їх ефективності при одночасному збільшенні вмісту метакаоліну і кількості гранітних частинок <0,16 мм. У цьому випадку помітне суттєве підвищення водопотреби суміші, яке не

вдається нейтралізувати за рахунок стеричного ефекту полікарбоксилатного суперпластифікатора при визначеній його кількості. Для проявлення максимального ефекту метакаоліну при отриманні високоміцного дрібнозернистого бетону на гранітних відсівах необхідно, щоб вміст частинок $<0,16$ мм у відсівах не перевищував (4-5)%, що, узгоджується з вимогами чинного національного стандарту [172].

Найбільшим впливом на досягнення максимальної ранньої міцності (у віці 1 доби) відрізняється фактор X_1 (вміст суперпластифікатора), вплив інших факторів незначний, він проявляється практично тільки при максимальній кількості пластифікуючої добавки.

Виконані експериментальні дослідження показали, що за умови введення полікарбоксилатного суперпластифікатора в бетонну суміш компенсується негативний вплив пилюватої фракції відсіву, що позитивно відбивається на основних властивостях бетонної суміші та міцності бетону при стиску, при цьому виконує роль активного мікронаповнювача.

Гранітні відсіви з підвищеним вмістом фракції $\leq 0,16$ мм, при введенні суперпластифікатора в бетонну суміш можуть застосовуватись як ефективний заповнювач для виготовлення високоміцних дрібнозернистих бетонів.

Таким чином, при умові використання ефективних суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу і додатковому введенні високоактивних мінеральних добавок можна отримати високоміцні дрібнозернисті бетони з використанням як основного заповнювача гранітних відсівів.

5.4. Міцність дрібнозернистого бетону з комплексними добавками

Основним з чинників, що забезпечують отримання високоміцних дрібнозернистих бетонів на відсівах каменеподрібнення застосування хімічних добавок з високим пластифікуючим та водоредукуючим ефектами, котрі забезпечують нівелювання підвищення водопотреби, викликане дисперсними частинками. За рахунок таких ефектів можливе суттєве зниження В/Ц бетону та отримання високих значень міцності.

Для встановлення впливу комплексних пластифікуючих добавок на основі ефірів полікарбоксилату та пластифікаторів інших типів були проведені алгоритмізовані експерименти за планами «склад-технологія-властивості» та «склад- властивість». Опис досліджених факторів, область їх варіювання та форма рівнянь регресії, що були отримані в результаті статистичного аналізу експериментальних даних наведені у п.4.2.

В результаті експерименту було визначено міцність при стиску ДЗБ на відсівах подрібнення 12 год, 1, 7, 28 діб двох серій зразків: перша – без урахування водоредукуючого ефекту добавок (при різній рухомості бетонних сумішей та постійному В/Ц), друга – з урахуванням водоредукуючого ефекту (при постійній рухомості та зниженні В/Ц). Коефіцієнти математичних моделей виду (4.5 та 4.6) міцності бетону наведені у табл.5.8.

Таблиця 5.8 – Коефіцієнти математичних моделей міцнісних параметрів бетону

Коефіцієнти	Вихідні параметри				Коефіцієнти	Вихідні параметри			
	Міцність на стиск (f_{cm}), МПа у віці					Міцність на стиск (f_{cm}), МПа у віці			
	12 год	1 доба	7 діб	28 діб		12 год	1 доба	7 діб	28 діб
A ₁	1,79	3,6/ 9,4*	27,9/ 30,7	34/ 39,6	(Ab) ₂₁	-0,41	-0,12	-1,88	-3,41
A ₂	6,74	13,5/ 18,9	23,7/ 43,1	35,4/ 46,7	(Ab) ₂₂	-0,90	-4,36	-1,44	-2,80
A ₃	6,85	13,7/ 18,6	40,5/ 54,3	46,8/ 61,9	(Ab) ₃₁	-0,10	-1,18	1,72	-5,22
A ₁₂	3,28	6,6/ -4,8	-23,4/ 15,1	49,6/ -5,8	(Ab) ₃₂	-0,90	-3,33	-2,55	-1,00
A ₁₃	2,47	4,9/ 16,3	-9,4/ -42,2	33,1/ -6,1	b ₁₂	-0,30	-0,04	-0,05	10,64
A ₂₃	-2,42	-4,9/ 2,9	0,01/ 41,9	22,7/ 43,9	b ₁₁	0,18	0,67	1,51	0,43
A ₁₂₃	-	-/-4	- /106,4	- /176,6	b ₂₂	0,14	0,30	0,71	-3,41
(Ab) ₁₁	-0,55	-1,09	-5,73	2,46					
(Ab) ₁₂	0,00	0,00	-1,08	-4,83					

* - над ризикою коефіцієнти математичних моделей міцності бетону без врахування водоредукуючого ефекту (рівняння виду (4.5)), під ризикою – з врахуванням водоредукуючого ефекту (рівняння виду (4.6)).

Результати досліджень свідчать про те, що бетони з добавками С-3 і Melflux, збільшуючи суттєво рухомість, позитивно також впливають і на міцність навіть за умови незмінних значень В/Ц (рис. 5.20). Суттєво знижується рання (12 годинна і 1 доба) міцність бетонів без врахування водоредукуючого ефекту при введенні добавки ЛСТМ. Негативний вплив добавки ЛСТМ практично не відчувається у віці 7 діб, а у віці 28 діб спостерігається деякий позитивний ефект. Негативний ефект добавки ЛСТМ в ранньому віці нівелюється поєднанням даного пластифікатора з

суперпластифікатором С-3 у складі комплексних добавок (рис.5.20). Менш ефективні композиції ЛСТМ і Melflux.

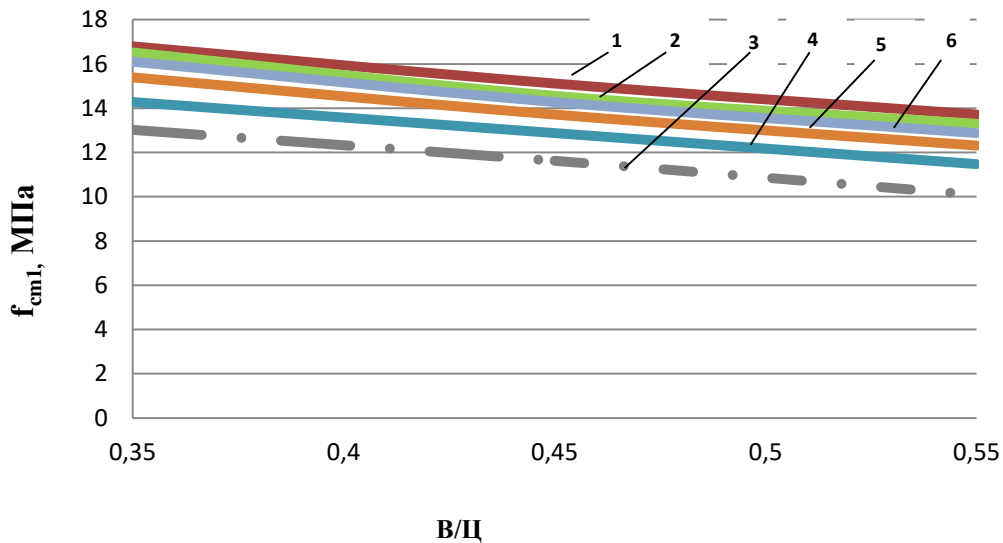


Рисунок 5.20 – Вплив добавок при їх загальному вмісті 0,5% від маси цементу на міцність бетону при стиску (f_{cm1}) у віці 1 доби (без врахування водоредукуючого ефекту)

1 – С-3, 2 – Melflux, 3 – бетон без добавок, 4 – ЛСТМ+С-3, 5 – ЛСТМ+ Melflux, 6 – С3+Melflux, (в комплексних добавках компоненти прийняті в рівних масових співвідношеннях)

У віці 28 діб, при постійних значеннях В/Ц, вплив комплексних добавок, що включають ЛСТМ і С-3, ЛСТ і Melflux, С-3 і Melflux є практично однаковим. Навіть без врахування водоредукуючого ефекту всі ці добавки збільшують міцність на 20...25%. Найбільший ефект збільшення міцності спостерігається при низьких значеннях В/Ц.

Поєднання трьох добавок – Melflux, ЛСТМ, С-3 веде до деякого зниження їх позитивного ефекту в ранньому віці на міцність бетону при постійних значеннях В/Ц (рис. 5.21).

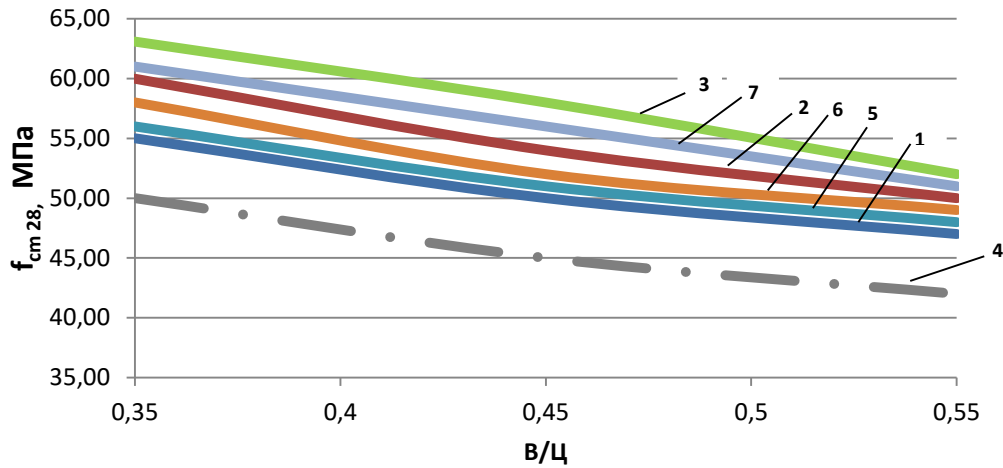


Рисунок 5.21 – Вплив добавок при їх загальному вмісті 0,5% від маси цементу на міцність при стиску (f_{cm28}) у віці 28 діб. (з врахуванням водоредукуючого ефекту)

1 – ЛСТМ, 2 – С-3, 3 – Melflux, 4 – бетон без добавок, 5 – ЛСТМ+С-3, 6 – ЛСТМ+ Melflux, 7 – С-3+ Melflux, (в комплексних добавках компоненти прийняті в рівних масових співвідношеннях)

Позитивний вплив комплексних добавок на міцність бетону, суттєво збільшується при врахуванні їх водоредукуючого ефекту.

Пряма залежність між підвищенням міцності і ВРЕ спостерігається при зміні вмісту в бетоні лише конкретної добавки. Загальна залежність між приростом міцності в однодобовому віці (Δf_{cm1}), та і у віці 28 діб (Δf_{cm28}) і ВРЕ не є однозначною для бетонів з добавками різних видів (рис. 5.22).

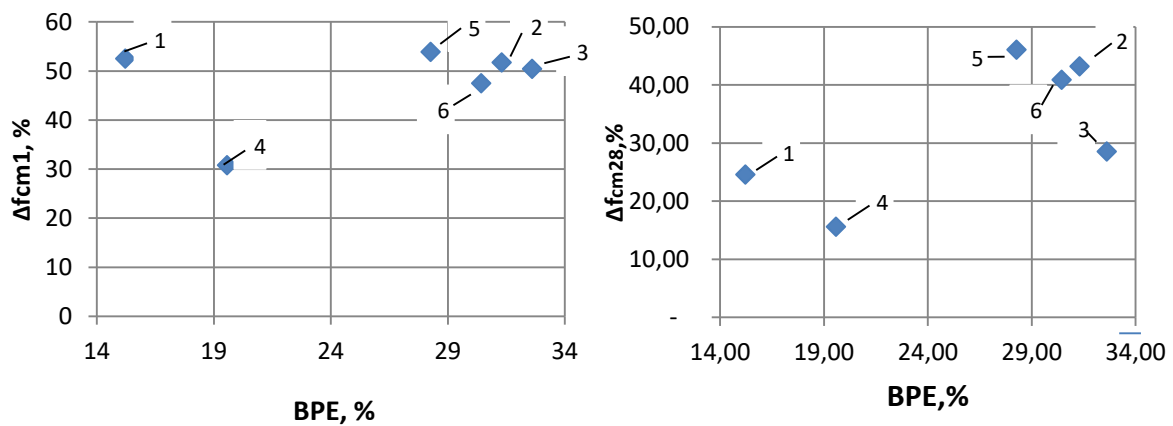


Рисунок 5.22 Залежності зміни міцності (Δf_{cm}) від ВРЕ, %

1 – С-3; 2 – Melflux; 3 - ЛСТМ+Melflux; 4 - ЛСТМ+С-3; 5 - С-3+Melflux; 6 - ЛСТМ+С-3+Melflux. Загальний вміст добавок 0,5% від маси цементу. (в комплексних добавках компоненти прийняті в рівних масових співвідношеннях)

Приріст міцності подвійних комплексних добавок С-3 і Melflux, а також потрійних в системі ЛСТМ, С-3, Melflux наближається до приросту міцності отриманого при окремому введенні добавки Melflux. Найкращі добавки, що

забезпечують максимальний приріст міцності за рахунок врахування їх водоредукуючого ефекту, наведені в табл. 5.9.

Таблиця 5.9 – Значення приросту міцності бетонної суміші з врахуванням ВРЕ*

Добавки	Співвідношення за масою	ВРЕ, %	Δf_{cm1} , %	Δf_{cm28} , %
С-3	-	15,22	52,49	24,55
Melflux	-	31,30	51,72	43,18
ЛСТМ+С-3	1:1	19,57	30,78	15,60
ЛСТМ+Melflux	1:1	32,61	50,44	28,57
С-3+Melflux	1:1	28,26	53,87	46,08
ЛСТМ+С-3+Melflux	1:1:1	30,43	47,50	40,86

* - загальний вміст добавки 0,5% від маси цементу

Визначення оптимальних складів комплексної добавки залежить від конкретних умов оптимізації. Такими умовами можуть бути: наприклад, забезпечення максимальної міцності бетону в 1 добу при постійній рухомості бетонної суміші або забезпечення максимальної рухомості бетонної суміші без зниження ранньої міцності, та інші.

На рис. 5.23 показано приклад графо-аналітичного вибору області оптимальних складів комплексної добавки за умови досягнення бетоном міцності на стиск на 1 добу не менше 12 МПа, у 28 діб не менше 60 МПа із забезпеченням пластифікуючого ефекту не менше 20%.

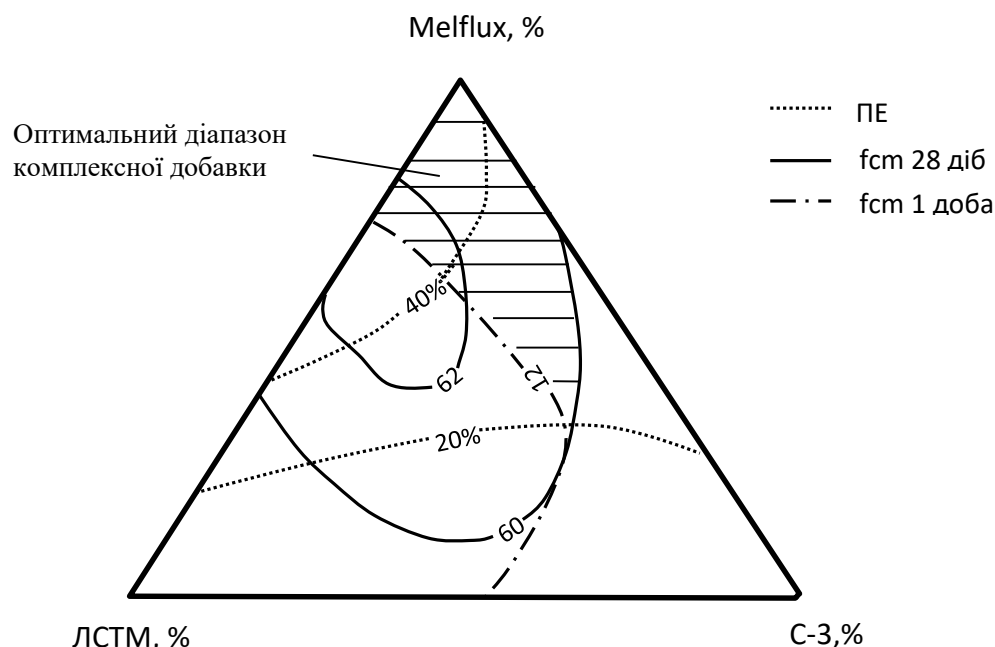


Рисунок 5.23 – Приклад вибору області оптимальних складів комплексної пластифікуючої добавки

Отримані математичні моделі міцності бетону з врахуванням ефекту впливу пластифікуючих добавок, дозволяють запропонувати розрахункові формули для вибору Ц/В при проектуванні складів бетонної суміші з добавками. Як показує

аналіз (рис. 3.19) при введенні добавок зберігається лінійна залежність міцності бетону від Ц/В. При апроксимації експериментальних даних, розрахункову формулу міцності бетону можна представити у вигляді загальної залежності виду, що узгоджується з відомими рекомендаціями [19]:

$$f_{cm} = kAR_{ц} \left(\frac{Ц}{В} + в \right), \quad (5.15)$$

де k – коефіцієнт який враховує вид добавки, A , $в$ – коефіцієнти, що враховують якість вихідних параметрів, вік бетону умови тверднення, $R_{ц}$ – активність цементу, МПа, Ц/В – цементно-водне відношення.

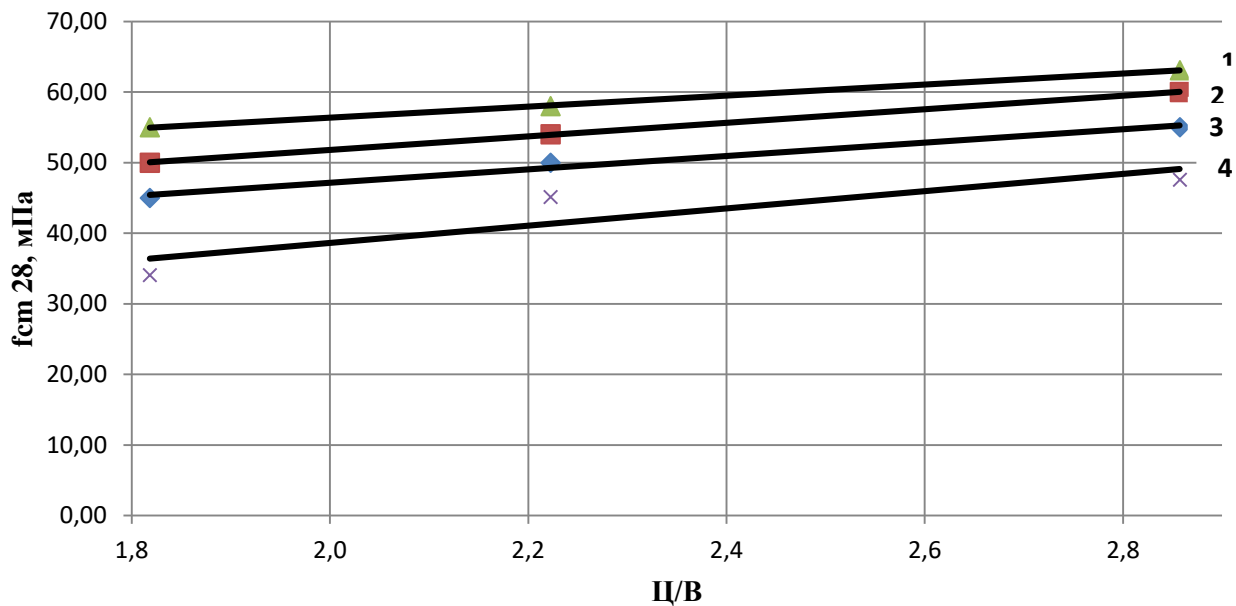


Рисунок 5.24 – Залежність міцності бетону у віці 28 діб (f_{cm28}) від Ц/В.
1 – Melflux, 2 – ЛСТМ(0,166%)+С-3(0,166%)+Melflux(0,166%), 3 – С-3 (0,5%), 4 – ЛСТМ (0,5%)

В табл. 5.10 наведені розрахункові значення коефіцієнтів k і $в$ ($A=0,44$).

Таблиця 5.10 - Значення коефіцієнтів у рівнянні міцності (5.10)

Вид пластифікуючої добавки	Коефіцієнти рівняння	
	k	$в$
Melflux (0,5%)	0,43	2,98
С-3 (0,5%)	0,44	3,4
ЛСТМ (0,5%)	0,35	5,22
ЛСТМ(0,166%)+С-3(0,166%)+ Melflux(0,166%)	0,55	1,16

Виконані дослідження показали можливість раціонального поєднання суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу з пластифікуючими добавками інших видів і створення ефективних комплексних добавок, що характеризуються

високими пластифікуючим та водоредукуючим ефектами. Аналіз поліноміальних моделей отриманих з допомогою планів «склад-технологія-властивості» дозволяє виконати необхідні розрахунки для оптимізації складів комплексних добавок і знаходження основних параметрів складів бетонних сумішей з їх застосуванням.

Матеріали розділу 3 опубліковано автором у працях [160,161,173-176].

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

1. Підвищення вмісту у відсівах частинок менших 0,16 мм до 12% та їх дисперсності до 3200...3500 см²/г при використанні суперпластифікатора нафталінформальдегідного типу СП-1 в кількості 1,2% від маси цементу, котрий компенсує підвищення В/Ц дрібнозернистого бетону, спричиняє підвищення міцності на 30...35%. Максимальна міцність при даному поєднанні факторів становить 40...42 МПа.

2. Подальше підвищення вмісту пилюватих частинок у відсівах до 24% призводить до зниження міцності внаслідок підвищення В/Ц, що недостатньо компенсується за рахунок пластифікуючого ефекту добавки СП-1.

3. Збільшення кількості суперпластифікатора та частинок менших 0,16 мм у відсівах також позитивно впливають на міцність дрібнозернистого бетону при згині (підвищення до 8...10 МПа).

4. Суттєву зміну міцності дрібнозернистого бетону як при стиску так і при згині викликає варіювання зернового складу відсівів подрібнення. Область максимальної міцності 45...50 МПа практично співпадає з мінімумом В/Ц (2,5...10 мм – 45...55%; 0,63...2,5 мм – 25...40%; 0...0,63 мм – 20...35%). При підвищенні вмісту суперпластифікатора знижується негативний вплив дисперсних частинок і збільшується поріг їх корисної кількості.

5. Оптимум гранулометричного складу заповнювача, котрий забезпечує максимальну міцність ДЗБ при згині (рис. 5.14) зміщений стосовно оптимуму з позиції найбільшої міцності при стиску в сторону більшого вмісту зерен середніх та дрібних фракцій, котрі забезпечують більшу однорідність бетону.

6. Використання полікарбоксилатного суперпластифікатора Melflux 2651F зі значно більшим пластифікуючим ефектом та заповнювача з оптимізованим гранулометричним складом дозволяє досягти значення В/Ц близько 0,3...0,35, що забезпечує отримання міцності 60...66 МПа.

7. За рахунок комплексного впливу полікарбоксилатного суперпластифікатора, пилюватої фракції гранітного відсіву та активної алюмосилікатної добавки метакаоліну міцність дрібнозернистого бетону у віці 28

діб підвищується до 72...75 МПа. Максимальна кількість дисперсних гранітних частинок у відсівах, що забезпечує отримання високоміцного дрібнозернистого бетону становить 4-5% за масою.

8. З використанням планів «склад-технологія-властивість» та «суміш-властивість» досліджено вплив комплексний вплив пластифікуючих добавок різних видів на міцність дрібнозернистого бетону на гранітних відсівах. Отримано математичні моделі міцності у різному віці (12 год., 1 доба, 7 та 28 діб), що дозволяють проектувати склад комплексної добавки, відповідно різних критеріїв оптимізації.

8. На основі математичних моделей встановлено область складів комплексних добавок, що забезпечують необхідні умови для отримання високоміцних бетонів на відсівах подрібнення (максимальний пластифікуючий ефект, міцність у віці 1 та 28 діб): Melflux - 25...35%, С-3 – 40...50%, ЛСТМ – 25...35%.

9. Розроблено розрахункові формули для вибору Ц/В при проектуванні складів бетонної суміші з комплексними добавками та визначено коефіцієнти рівняння міцності для різних співвідношень добавок.

РОЗДІЛ 6

ДОВГОВІЧНІСТЬ ВИСОКОМІЦНИХ ДРІБНОЗЕРНИСТИХ БЕТОНІВ З КАМ'ЯНИМИ ВІДСІВАМИ ТА ПРОЕКТУВАННЯ ЇХ СКЛАДІВ

6.1. Властивості дрібнозернистого бетону, що визначають довговічність

Довговічність бетону забезпечується при відповідності його складу й структури умовам експлуатації конструкцій і споруд. Стійкість бетону характеризується його здатністю зберігати задані показники якості й працездатність при впливі агресивних факторів навколишнього середовища, з яких найбільш характерні впливи температури й водного середовища.

Морозостійкість та водонепроникність бетону обумовлена переважно характером порової структури бетону: об'ємом і розміром пор, а також співвідношенням умовно-замкнених пор, утворених в результаті контракції та повітровтягування, та відкритих пор, які насичуються водою. Відомо, що литі бетонні суміші порівняно із бетонами, виготовленими з низько рухливих сумішей, мають вищий вміст капілярних пор внаслідок їх значного водопотреби. Введення суперпластифікатору за умови зменшення водопотреби бетонної суміші призводить до зменшення капілярної пористості, ущільнення структури цементного каменю і бетону та підвищення морозостійкості та водонепроникності бетонів [20, 163]. Введення мінеральних добавок є невід'ємним компонентом сучасних самоущільнюючих бетонів. Їх застосування дає змогу уникнути водовідділення, значно збільшити пластичність і в'язкість бетонних сумішей, а також підвищити щільність структури бетону, підвищити їх міцність та довговічність [167, 178]. У зв'язку з обмеженою кількістю кондиційних заповнювачів, актуальним є використання використання в якості заповнювача цементних бетонів відходів переробки гірських порід на щебінь (відсівів). Також відомо, що введення відсівів каменеподрібнення в бетонну суміш, без використання пластифікуючих добавок, призводить до суттєвого зниження морозостійкості бетону [179, 180]. Але як показали дослідження М. Я. Якобсона [65], що в деяких випадках використання відсівів каменеподрібнення при виготовленні дрібнозернистого бетону дозволяють навіть підвищити морозостійкість.

З метою вивчення впливу гранітних відсівів на властивості дрібнозернистого бетону, що визначають довговічність була проведена серія алгоритмізованих експериментів

Дослідження проводились на дрібнозернистому бетоні із застосуванням в якості заповнювача гранітного відсіву фракції 0...5 мм (ККНК «Технобуд»).

Для оптимізації зернового складу відсівів додатково вводили фракцію 2,5...5 в кількості 20% від маси заповнювача. В якості пластифікуючої добавки використовували суперпластифікатор полікарбосилатного типу Melflux 2651f (BASF, Німеччина).

Для дослідження впливу частинок відсівів $<0,16$ мм на властивості ДЗБ що визначають довговічність було проведено запланований експеримент за планом В₃, умови планування наведені у табл. 4.1, та результати експериментів 6.1.

Таблиця 6.1 – Результати випробувань

Точки плану	Вихідні параметри				
	П _в , %	α	λ	F, цикли	W, МПа
1.	3,0	0,79	0,32	550	12
2.	9,5	0,55	0,32	500	8
3.	8,2	0,56	0,44	150	4
4.	9,0	0,43	0,55	100	2
5.	6,5	0,67	0,44	450	8
6.	13,8	0,49	0,50	300	2
7.	12,8	0,34	0,45	100	2
8.	14,4	0,27	0,62	100	2
9.	1,7	0,75	0,38	450	10
10.	6,9	0,59	0,38	350	8
11.	12,5	0,39	0,63	150	6
12.	12,0	0,34	0,74	150	4
13.	4,6	0,63	0,53	250	6
14.	10,6	0,53	0,59	150	2
15.	16,4	0,17	0,67	100	2
16.	16,7	0,18	0,84	100	2
17.	4,4	0,53	0,41	450	8
18.	4,9	0,47	0,55	400	6
19.	6,1	0,59	0,45	400	10
20.	10,2	0,45	0,57	300	6
21.	6,6	0,68	0,43	400	10
22.	12,3	0,39	0,61	200	4
23.	6,3	0,55	0,49	450	8
24.	9,7	0,43	0,57	400	6

Водопотреба бетонної суміші визначалась з метою досягнення, у всіх точках експерименту, рухомості 20...25 см (P5). Також досліджували водопоглинання бетону за об'ємом (відкрити пористість (P_v), показник середнього розміру відкритих пор (λ), показник однорідності розмірів пор (α), морозостійкість (F), водонепроникність (W).

В результаті статистичного аналізу експериментальних даних отримані адекватні з довірчою ймовірністю 95% рівняння регресії вихідних параметрів.

$$P_v = 7,2 - 0,25x_1 - 2,1x_2 - 2,8x_3 - 1,7x_4 - 2,3x_1^2 + 1,2x_2^2 + 2,5x_3^2 + 1,22x_4^2 - 0,2x_1x_2 + 1,4x_1x_3 - 0,33x_1x_4 + 0,3x_2x_3 + 0,2x_2x_4 - 1,41x_3x_4 \quad (6.1)$$

$$\lambda = 0,51 - 0,07x_1 - 0,06x_2 - 0,09x_3 - 0,042x_4 - 0,02x_1^2 + 0,009x_2^2 + 0,004x_3^2 + 0,025x_4^2 - 0,008x_1x_2 + 1,4x_1x_3 - 0,03x_2x_3 \quad (6.2)$$

$$\alpha = 0,51 + 0,05x_1 + 0,06x_2 + 0,145x_3 + 0,05x_4 - 0,03x_1^2 + 0,001x_2^2 + 0,03x_3^2 - 0,032x_4^2 - 0,04x_1x_2 - 0,021x_1x_4 - 0,03x_2x_3 + 0,015x_2x_4 + 0,0281x_3x_4 \quad (6.3)$$

$$F = 418 + 34x_1 + 53x_2 + 12x_3 + 28x_4 + 6,7x_1^2 - 68,3x_2^2 - 118x_3^2 - 6,7x_4^2 - 9,3x_1x_2 + 40,6x_1x_3 + 3,1x_1x_4 + 31,3x_2x_3 - 3,12x_2x_4 + 21,9x_3x_4 \quad (6.4)$$

$$W = 8,0 + 0,1x_1 + 1,8x_2 + 2,1x_3 + 1,2x_4 - x_1^2 - 0,5x_2^2 - 0,58x_3^2 - 0,3x_4^2 + 0,2x_1x_2 + 0,9x_1x_3 + 0,9x_2x_3 \quad (6.5)$$

Стійкість матеріалів до шкідливого впливу різного роду чинників, таких як морозостійкість та водонепроникності, в основному визначається структурою його порового простору. Для більш повного дослідження морозостійкості та водонепроникності литого дрібнозернистого бетону на відсівах каменеподрібнення, спершу необхідно дослідити вплив технологічних факторів на його пористість.

Найбільш важливою частиною порового простору є так звана «уявна пористість» (P_v), яка характеризує об'єм відкритих пор, доступних для водопоглинання. Зміна водопоглинання може вказувати на зміну й інших властивостей матеріалів, наприклад міцності, морозостійкості, хімічної стійкості, тому даний показник часто нормується.

Як показує аналіз математичної моделі (6.1) найбільш значний позитивний вплив на зниження водопоглинання бетонної суміші, практично вдвічі, забезпечує введення добавки суперпластифікатора 0,5...1% від маси цементу. Також на 50% знижує водопоглинання бетону додавання фракції $\leq 0,16$ мм, при умові сумісного введення добавки суперпластифікатора полікарбосилатного типу. В іншому випадку позитивного ефекту не спостерігається і навпаки збільшення вмісту пилюватої фракції призводить до суттєвого зростання водопоглинання (рис.6.1).

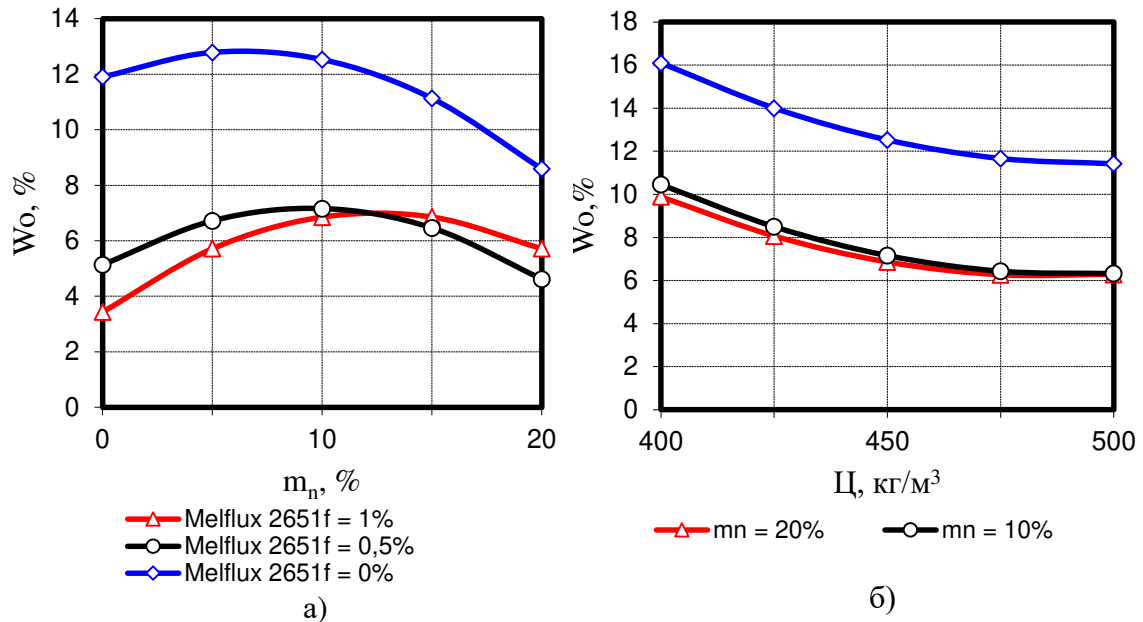


Рисунок 6.1 – Вплив технологічних факторів на відкриту пористість дрібнозернистого бетону:

а – частки пилюватої фракції при різній витраті суперпластифікатора;

б – частки пилюватої фракції при різній витраті цементу;

Збільшення кількості цементу позитивно відображається на зниженні водопоглинання і має лінійний характер. Також важливими показниками порового простору ДЗБ є показник середнього розміру відкритих капілярних пор (λ), показник однорідності розмірів відкритих капілярних пор (α). Показник середнього розміру відкритих капілярних пор (λ) знаходиться в межах – 0,21 – 0,81, показник однорідності розмірів відкритих капілярних пор (α) – 0,19 – 0,76. З варійованих факторів найбільший вплив на параметри λ створюють X_1 (вміст пилюватої фракції $\leq 0,16$) та X_3 (витрата добавки суперпластифікатора), а на параметри α – X_2 (витрата цементу) та X_3 (витрата добавки суперпластифікатора). З переходом фактора X_3 (витрати добавки суперпластифікатора) з нижнього на верхній рівень, що призводить до суттєвого зниження водопотреби і збільшення в'язкості бетонної суміші. Це в свою чергу сприяє зменшенню середнього розміру пор з 0,7 до 0,43 і підвищенню їх однорідності з 0,48 до 0,71. Збільшення вмісту цементу найбільше впливає на однорідність порової структури, збільшуючи її з 0,33 при витраті цементу 400 кг/м^3 до 0,49 при 500 кг/м^3 (рис 6.2). Дещо в меншій мірі витрата цементу впливає на середній розмір пор. При збільшенні витрати цементу, показник середнього розміру пор змінюється з межах 0,61...0,51. Хоча при сумісному введенні суперпластифікатора спостерігається суттєве зменшення розміру пор із 0,7 до 0,41. Пилювата фракція $\leq 0,16$ найбільше впливає на середній розмір пор, зменшує показник λ із 0,7 до 0,49, а при введенні добавки

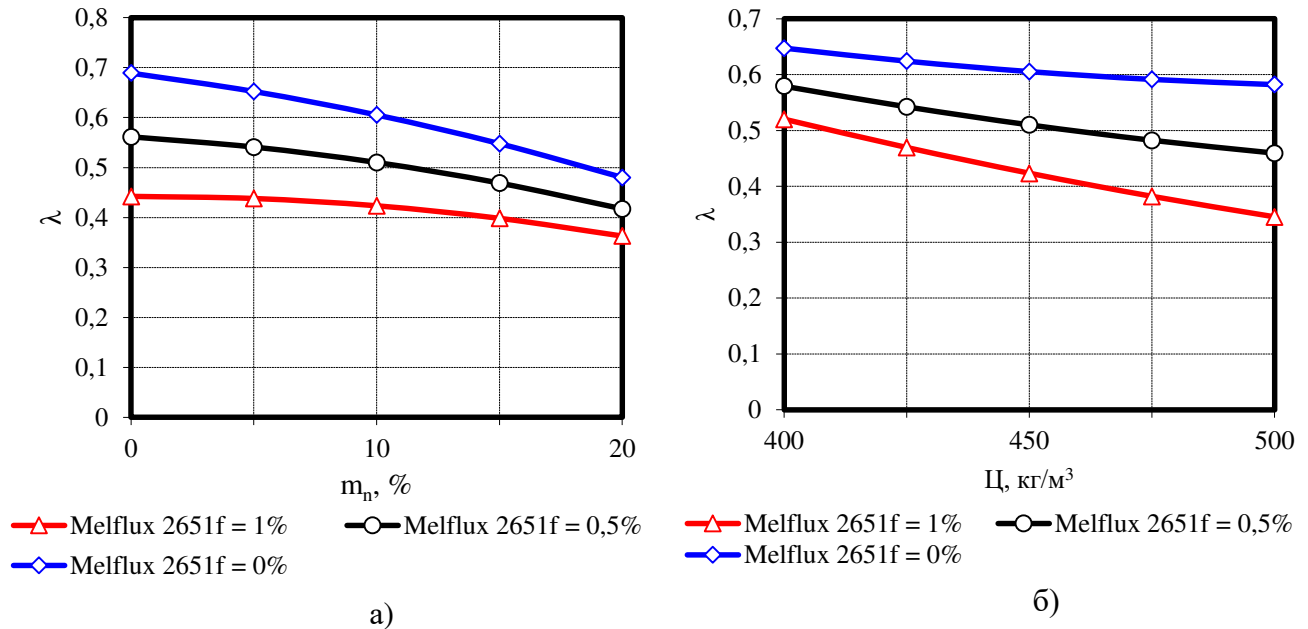


Рисунок 6.2 – Вплив технологічних факторів на показник середнього розміру відкритих капілярних пор (λ):

а – частки пилюватої фракції при різній витраті суперпластифікатора;

б – витраті цементу при різній витраті суперпластифікатора.

суперпластифікатора до 0,38. Дещо в меншій, вона впливає на однорідність капілярних пор, при цьому показник змінюється в межах від 0,3 до 0,41 (рис. 6.3). Важливо відмітити, що чим менше водопоглинання (W_o), показник середнього розміру відкритих капілярних пор (λ), і чим більше показник однорідності розмірів відкритих капілярних пор (α), тим рівномірніше розподілені за розміром пори. Це

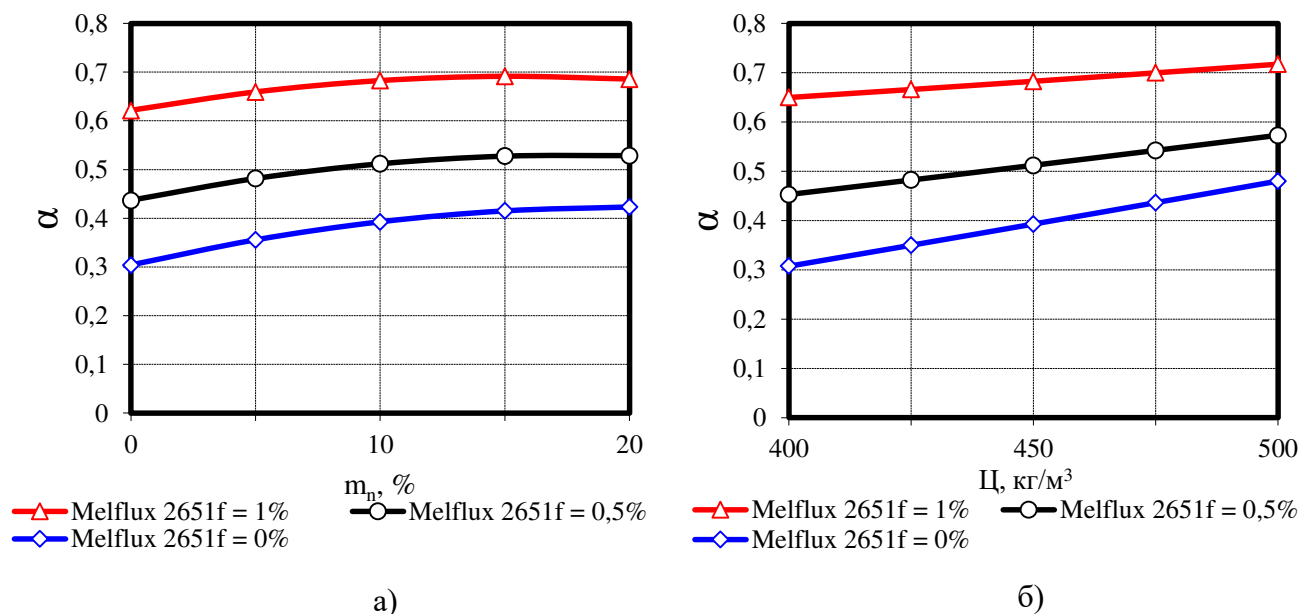


Рисунок 6.3 – Вплив технологічних факторів на показник однорідності розмірів відкритих капілярних пор (α):

а – частки пилюватої фракції при різній витраті суперпластифікатора;

б – витраті цементу при різній витраті суперпластифікатора.

дозволяє отримати більш щільну структуру ДЗБ. Пористість бетону значним чином впливає на його морозостійкість. Як відомо [181] руйнування бетону під час поперемінного заморожування і відтаювання у насиченому водою стані відбувається через дію розтягуючих зусиль, котрі проникають внаслідок збільшення об'єму льоду, що при цьому утворюється. Здатність бетону опиратись руйнуванню при багаторазовій дії заморожування і відтавання пояснюється присутністю в його структурі резервних пор незаповнених водою, у які (під дією кристалів льоду, що ростуть при замерзанні) відтискуються частина води. Руйнування відбудеться в тому випадку коли всі резервні (умовно-замкнені) пори будуть заповнені рідиною.

Як видно із моделі (6.4), введення пилюватої фракції $\leq 0,16$ призводить до підвищення водопотреби бетонних сумішей, збільшення капілярної пористості, і відповідно до зниження морозостійкості. Але при додатковому введенні добавки суперпластифікатора полікарбосилатного типу, спостерігається суттєве підвищення морозостійкості, практично вдвічі, що зумовлене перерозподілом пористості, зменшенням середнього розміру пор. З переходом фактора X_2 (витрати цементу) з нижнього на верхній рівень спостерігається відносно незначне зростання морозостійкості із 100 до 200 циклів, а при сумісному введенні добавки суперпластифікатора спостерігається суттєве зростання морозостійкості до 500 циклів (рис.6.4).

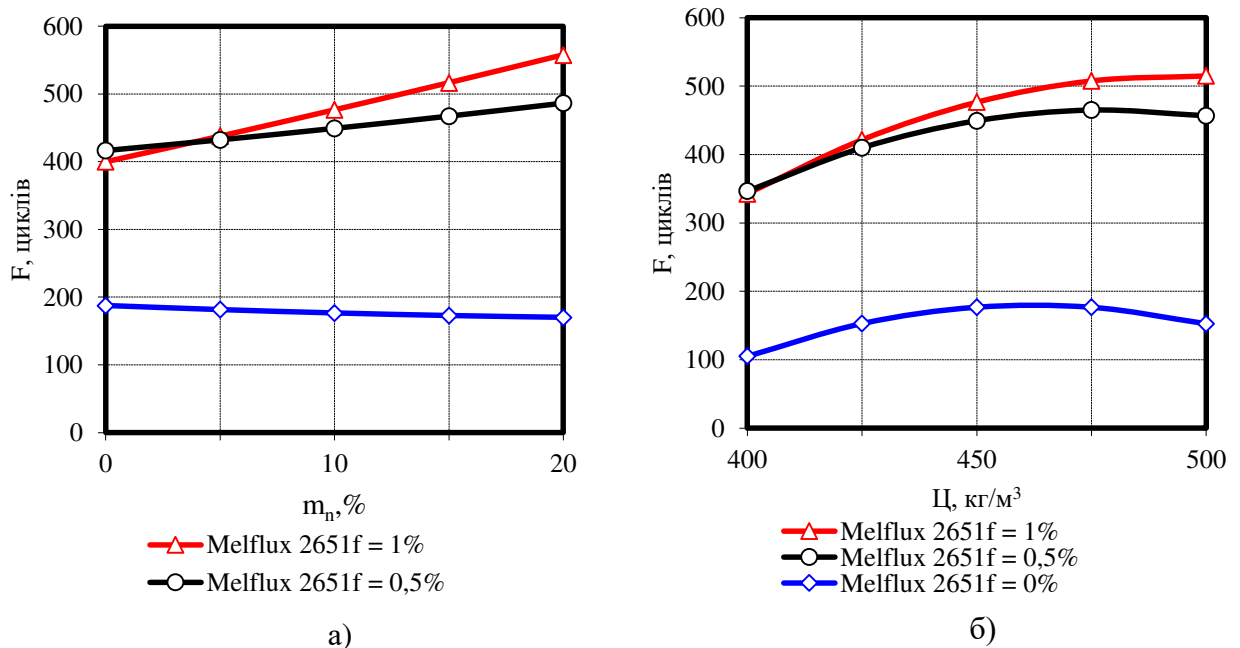


Рисунок 6.4 – Вплив технологічних факторів на морозостійкість (F) ДЗБ:
 а – частки пилюватої фракції при різній витраті суперпластифікатора;
 б – витраті цементу при різній витраті суперпластифікатора.

Таким чином, досліджувані бетони можна віднести до класів підвищеної (F100...F200) та високої (F400...F500) морозостійкості [1].

Водонепроникність бетону також суттєво залежить від особливостей порової структури, особливо об'єму та розмірів наскрізних пор, які фактично представляють собою шляхи фільтрації води. Найбільш активною частиною порового простору є так звана «уявна пористість» (W_0), яка характеризує об'єм відкритих пор, доступних для водопоглинання.

Як видно із аналізу моделі (6.5), з варійованих факторів найбільший вплив на водонепроникність (W) створюють фактори X_1 та X_2 . Фактор X_3 впливає в дещо меншій мірі. При збільшенні витрати цементу від 400 до 500 кг/м³ спостерігається зростання показника водонепроникності на $2 \text{ МПа} \cdot 10^{-1}$, а при введенні добавки суперпластифікатора в кількості 0,5-1% водонепроникність зростає до W8-W10 (рис. 6.5). Додавання фракції $\leq 0,16 \text{ мм}$ призводить до зниження водонепроникності від W6 до W2. Як відзначалось раніше, це пов'язано із збільшенням водопотреби бетонної суміші, що призводить до збільшення відкритої пористості, так і розміру пор. Введення добавки суперпластифікатора дозволяє нівелювати негативний вплив пилюватої фракції і збільшити показник водонепроникності на $4 \text{ МПа} \cdot 10^{-1}$.

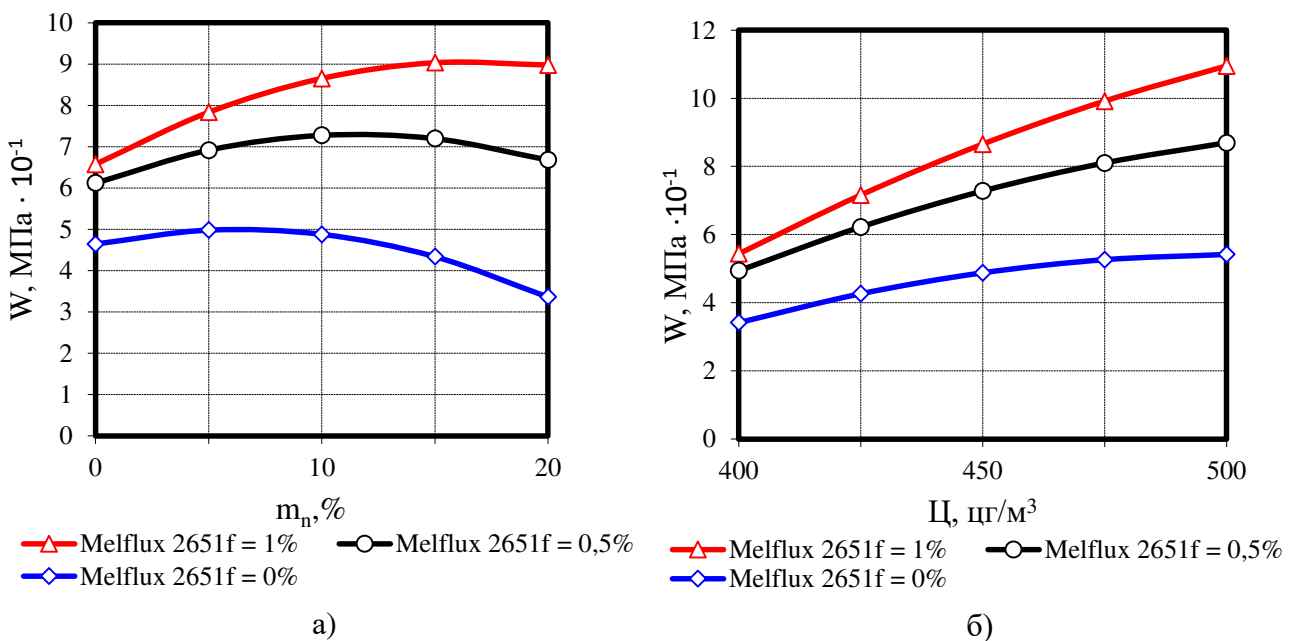


Рисунок 6.5 – Вплив технологічних факторів на водонепроникність (W) бетону:
 а – частки пилюватої фракції при різній витраті суперпластифікатора;
 б – витраті цементу при різній витраті суперпластифікатора.

6.2. Проектування складу високоміцного дрібнозернистого бетону

Отримані експериментально-статистичні моделі (5.7-5.9) дають можливість запропонувати методику розрахунку високоміцного дрібнозернистого бетону з використанням як заповнювача гранітних відсівів.

Для розрахунку Ц/В, що забезпечує задану границю міцності бетону при стиску у певному віці можна використати модифіковане рівняння [19], яке враховує вплив активних мінеральних наповнювачів:

$$f_{cm} = AR_u \left(\left(\frac{C}{B} \right)_{np} - b \right), \quad (6.6)$$

де A – коефіцієнт, що враховує якість заповнювача, b – коефіцієнт, що враховує тип бетонної суміші (табл. 3), $\left(\frac{C}{B} \right)_{np}$ – приведене Ц/В бетону, що враховує кількість і активність мінерального наповнювача.

$\left(\frac{C}{B} \right)_{np}$ розраховується за формулою:

$$\left(\frac{C}{B} \right)_{np} = \frac{C + K_{ц.е}H}{B}, \quad (6.7)$$

де C , B , H – витрати ($\text{кг}/\text{м}^3$) цементу, води і мінерального наповнювача, відповідно, $K_{ц.е.}$ – коефіцієнт цементуючої ефективності мінерального наповнювача.

Таблиця 6.2 – Усереднені значення коефіцієнтів рівняння (6.6) [19]

Характеристика якості заповнювача	A	b
висока	0,52	0,65
середня	0,48	0,65
Низька	0,44	0,65

Як наповнювачі бетонної суміші розглядають дисперсні компоненти – вміст пиловидних ($<0,16$ мм) частинок у відсівах і активні мінеральні добавки.

Показник $K_{ц.е.}$ залежить від особливостей (хіміко-мінералогічного складу, дисперсності, гідравлічної активності) наповнювачів, щозастосовуються, і зазвичай визначається експериментально. Отримані математичні моделі міцності високоміцного дрібнозернистого бетону на гранітних відсівах із застосуванням метакаоліну і ефективного полікарбоксилатного суперпластифікатора (5.8, 5.9) дозволили розрахувати відповідні значення $K_{ц.е.}$ (табл. 6.3).

Для визначення витрати води у високоміцному дрібнозернистому бетоні була побудована номограма, яка враховувала вплив суперпластифікатора, активної

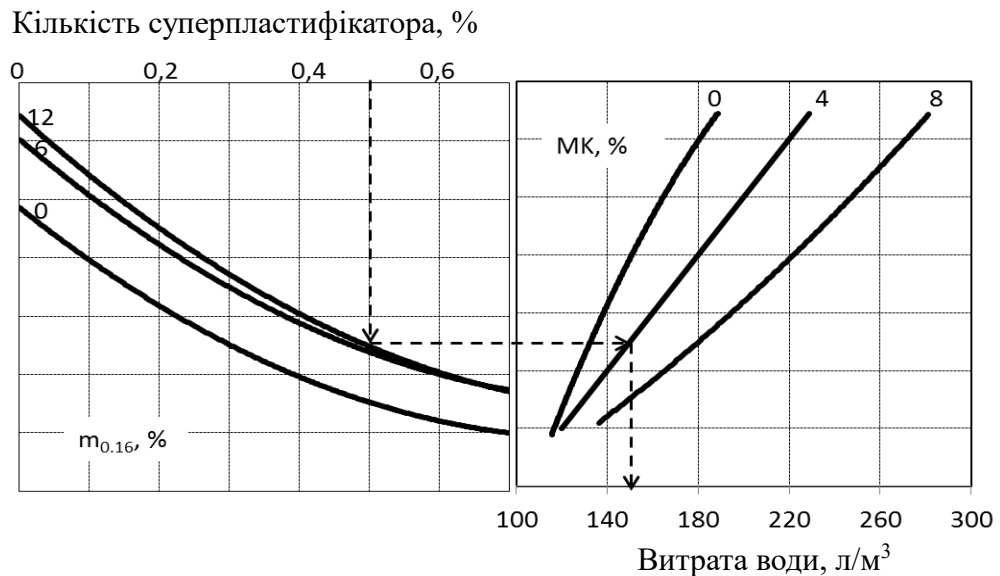


Рисунок 6.6 – Номограма для визначення витрати води для дрібнозернистого бетону з використанням гранітних відсівів (ОК=15...21 см)

мінеральної добавки і вмісту частинок <0,16 мм (рис. 6.6).

Витрати цементу знаходимо з виразу:

– без застосування мінеральних наповнювачів:

$$Ц = (Ц / В) \cdot В, \quad (6.8)$$

– із застосуванням мінеральних наповнювачів:

$$Ц = (Ц / В)_{np} \cdot В - K_{ц.е} \cdot Н. \quad (6.9)$$

де Ц, В, Н – витрати (кг/м³) цементу, води і мінерального наповнювача, відповідно, $K_{ц.е}$ – коефіцієнт цементуючої ефективності мінерального наповнювача.

Таблиця 6.3 – Розрахунково-експериментальні значення коефіцієнтів цементуючої ефективності метакаоліну і пилу гранітних відсівів при використанні полікарбоксилатного суперпластифікатора

Вміст суперпластифікатора Melflux 2651F, %	Коефіцієнт цементуючої ефективності мінеральних наповнювачів	
	пил гранітного відсіву	метакаолін
0	-0,08	0,12
0,35	0,11	3,22
0,7	0,58	5,89

Витрату заповнювачів (гранітних відсівів) знаходимо з рівняння абсолютних об'ємів, враховуючи розрахункові значення витрати цементу і води.

Врахування крім показників міцності бетону також інших властивостей, таких як морозостійкість та водонепроникність доцільно використовувати отримані у п.6.1 моделі цих властивостей (5.11), (5.12). Для спрощення розрахунків за моделями (5.11), (5.12) побудовані номограми відповідних властивостей (рис. 6.7, 6.8), котрі дозволяють знаходити розв'язки моделей графічним способом.

При вирішенні задач проектування складів бетону основними критеріями їх оптимізації переважно приймають найменшу витрату цементу або вартість бетону, тобто суму вартості усіх компонентів. При проектуванні складів високоміцних бетонів, котрі містять підвищену кількість ефективних суперпластифікаторів використанні задача мінімізації вартості при застосуванні такого підходу до визначення складу значно ускладнюється. Вирішення такої задачі значно спрощується при застосуванні математичного програмування [5-6].

У даному випадку задачу визначення оптимального складу високоміцного бетону із заданими параметрами якості можна сформулювати так: визначити значення факторів складу високоміцного бетону $x_1 \dots x_n$, при яких вартість мінімальна:

$$V_B = V_{\text{ц}} \cdot \text{Ц} + V_{\text{д}} \cdot \text{Д} + V_{\text{з}} \cdot \text{З} \rightarrow \min \quad (6.10)$$

при умові забезпечення заданих якісних показників

$$П_1 \geq f(x_1, x_2, \dots, x_n); \quad (6.11)$$

$$П_2 \geq f(x_1, x_2, \dots, x_n);$$

.....

$$П_m \geq f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$\text{при } x_1 \dots x_n \in [a \dots b], \quad (6.12)$$

де $V_{\text{ц}}$, $V_{\text{д}}$, $V_{\text{з}}$ – відповідно вартість цементу, добавки модифікатора (суперпластифікатора, активної мінеральної добавки тощо) та заповнювача чи інших компонентів бетону (наприклад фібри), у.о./кг; Ц , Д , З – відповідно витрата цементу, добавки та заповнювача, кг/м³; $П_1 \dots П_m$ – задані показники якості бетону; $x_1 \dots x_n$ – фактори, характеризують склад бетону; a , b – обмеження можливих значень факторів.

Для того, щоб визначити оптимальний склад високоміцного бетону з урахуванням мінімальної вартості, необхідно розв'язати задачу математичного програмування такого виду: визначити склад високоміцного бетону на гранітному відсіві, який би дозволив забезпечити необхідні міцність при стиску у віці 28 діб,

морозостійкість та водонепроникність при мінімальній загальній вартості в межах інтервалу варіювання факторів, заданого при проведенні експерименту.

Найбільш вдалим способом вирішення такої задачі є використання програмного середовища Microsoft Excel, через його додаток "Пошук рішення". Ця «надбудова» призначена для пошуку рішення рівнянь та оптимізаційних задач.

Послідовність розв'язку задачі наступна. Підставляємо у рівняння (5.7), (6.4) та (6.5) значення міцності, морозостійкості та водонепроникності, що повинні забезпечуватись, а у вираз (6.10) – значення вартості компонентів високоміцного бетону. У виразі (6.12) встановлюємо межі значень факторів (-1...1) (табл.4.1). Далі програма перебирає різні комбінації факторів забезпечуючи значення заданих параметрів якості (5.7), (6.4) та (6.5) більше заданих, мінімізуючи при цьому функцію (6.10).

Як результат таких ітерацій є визначення оптимальних значень факторів складу: вміст пилюватих частинок у заповнювачі, витрати цементу, суперпластифікатора В/Ц та дисперсності пилюватих частинок.

Приклад. Розрахувати склад дрібнозернистого бетону класу за міцністю при стиску В60, морозостійкість F300, водонепроникність W6. Рухомість суміші – Р4 (15...21 см). Матеріали: портландцемент СЕМ І 42,5, (активність цементу (R_u) – 50 МПа, дійсна густина (ρ_u) – 3,1 г/см³), гранітний відсів із вмістом пилюватих частинок 10%, (дійсна густина (ρ_3) – 2,7 г/см³), суперпластифікатор Melflux 2651F.

1. Розраховуємо необхідну середню міцність бетону при стиску у віці 28 діб, що забезпечує клас бетону В60 (при нормативному коефіцієнті варіації 13,5%). З цією метою використовуємо формулу (6.10):

$$f_{cm}^{28} = B / \left(1 - 1,64 \cdot \frac{C_v}{100} \right), \quad (6.10)$$

де C_v – коефіцієнт варіації, %.

$$f_{cm}^{28} = 60 / (1 - 1,64 \cdot 0,135) = 77 \text{ МПа}.$$

2. Враховуючи активність цементу і необхідне значення міцності бетону у віці 28 діб, за формулою (5) находимо необхідне $(Ц/В)_{np}$. Коефіцієнти у формулі приймаємо рівними $A=0,44$, $b=0,65$ – як для заповнювача низької якості при відповідній рухомості суміші (табл. 3).

$$f_{cm}^{28} = 0,44 R_u \left((Ц/В)_{np} - 0,65 \right).$$

$$(Ц/В)_{np} = \left(\frac{f_{cm}^{28}}{0,44 R_u} \right) + 0,65 = \left(\frac{77,1}{0,44 \cdot 50} \right) + 0,65 = 4,16.$$

3. За номограмою (рис. 6.6) знаходимо витрату води, враховуючи кількість пилюватих частинок у відсівах – $B=185$ л/м³.

4. За формулою (6), знаючи витрату води і $(C/B)_{np}$ знаходимо витрату цементу без врахування наповнювача:

$$C = (C/B)_{np} \cdot B = 4,16 \cdot 185 = 768 \text{ кг/м}^3.$$

5. За формулами (8), (9), (10), знаходимо об'єм цементного тіста, об'єм і масу заповнювача:

$$V_{ц.т.} = \frac{C}{\rho_{ц}} + B = \frac{768}{3,1} + 185 = 433 \text{ л};$$

$$V_з = 1000 - 433 = 567 \text{ л};$$

$$З = 567 \cdot 2,7 = 153 \text{ кг/м}^3.$$

6. Проводимо уточнення складу високоміцного дрібнозернистого бетону при використанні суперпластифікатора Melflux 2651F і враховуючи дисперсну фракцію відсівів як мінеральний наповнювач:

6.1. Знаходимо орієнтовну кількість дисперсної фракції відсівів (10% від кількості заповнювача):

$$H = 0,01 \cdot З = 0,01 \cdot 1531 = 153 \text{ кг}.$$

6.2. За номограмою (рис. 6.6) знаходимо витрату води, яка забезпечує задану рухомість, підбираючи ефективну кількість суперпластифікатора.

При кількості суперпластифікатора 0,5% від маси цементу потрібна витрата води складає 135 л.

За табл. 6.3 знаходимо коефіцієнт цементуючої ефективності для пилюватої фракції відсівів при прийнятій кількості суперпластифікатора: $K_{ц.е}=0,35$.

6.3. Приймаючи вміст мінерального наповнювача (H) 153 кг/м³ за формулою (7) розраховуємо уточнену витрату цементу:

$$C = (C/B)_{np} \cdot B - K_{ц.е.} \cdot H = 4,16 \cdot 135 - 0,35 \cdot 153 = 508 \text{ кг/м}^3.$$

6.4. Знаходимо витрату заповнювача:

$$V_{ц.т.} = \frac{C}{\rho_{ц}} + B = \frac{508}{3,1} + 135 = 299 \text{ л};$$

$$V_з = 1000 - 299 = 701 \text{ л};$$

$$З = 701 \cdot 2,7 = 1893 \text{ кг/м}^3.$$

Розрахунковий склад бетону на 1 м³ бетону:

– цемент – 508 кг;

- заповнювач (відсів) – 1893 кг;
- вода – 135 л;
- суперпластифікатор – 2,54 кг.

6.5 За розрахованими параметрами складу бетону проводимо перевірку забезпечення марки за водонепроникністю та морозостійкістю.

6.5.1. За номограмою (рис. 6.7) прогнозована морозостійкість становить F300

6.5.2. За номограмою (рис. 6.8) прогнозована водонепроникність становить W10.

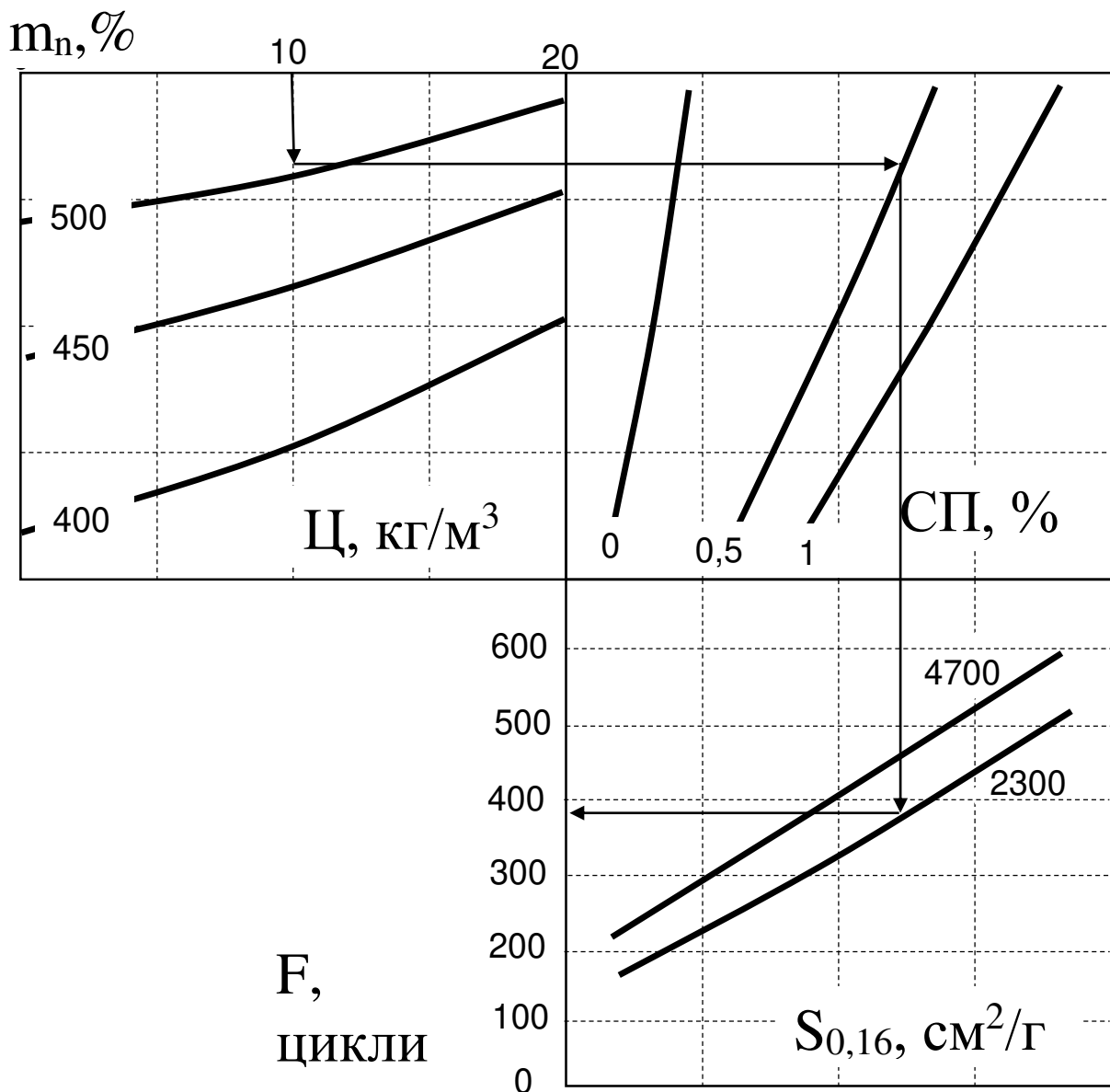


Рисунок 6.7 – Номограма визначення морозостійкості дрібнозернистого бетону на гранітних відсівах

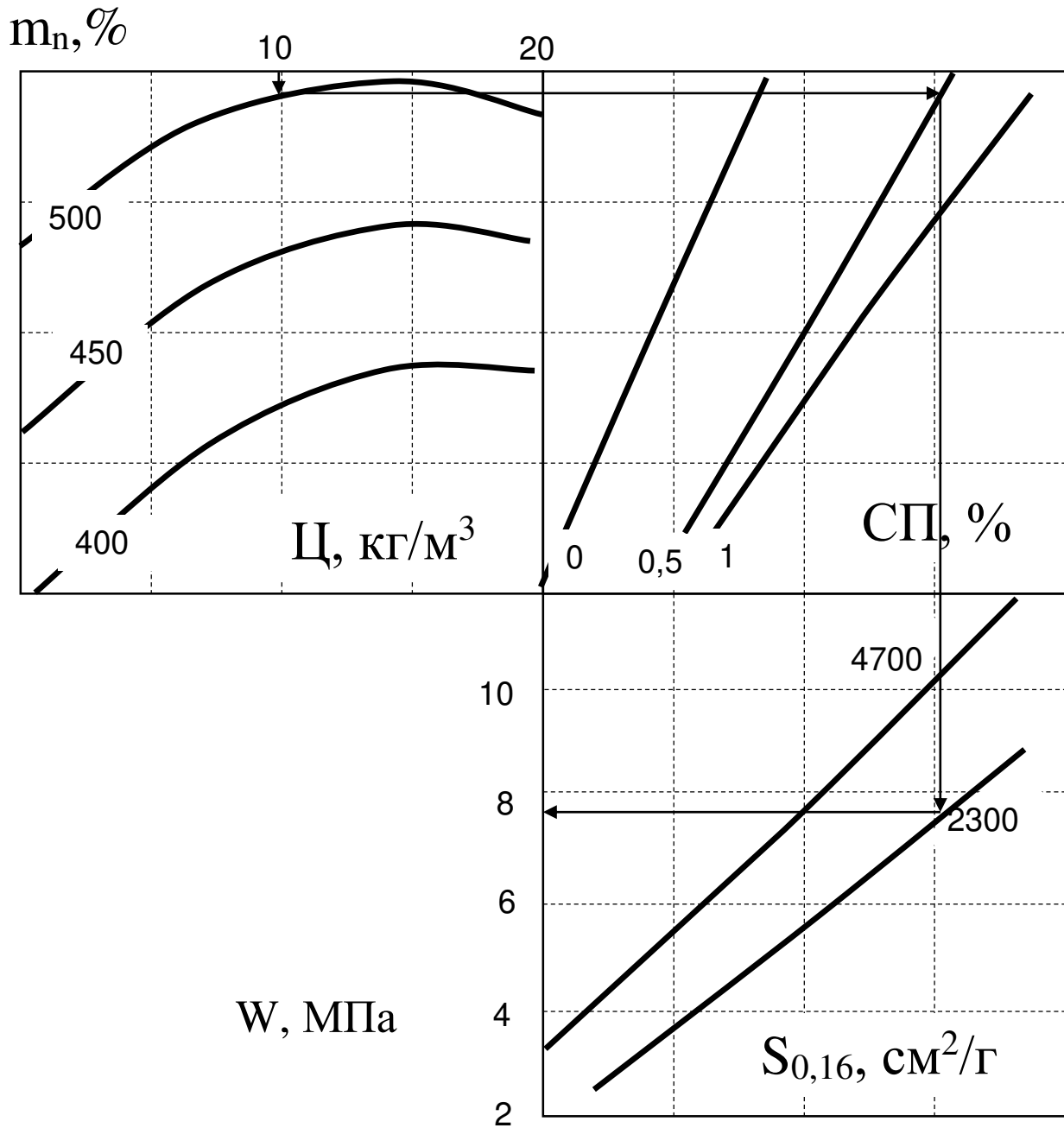


Рисунок 6.8 – Номограма визначення морозостійкості дрібнозернистого бетону на гранітних відсівах

За допомогою програмного додатку "Пошук рішення" знаходимо значення факторів, що задовольняють встановленій області варіювання для даного прикладу і мінімізують загальну вартість високоміцного бетону на гранітному відсіві:

$$X_1 = 0,028; X_2 = 0,92; X_3 = 0,004, X_3 = 0,41.$$

Склад бетону, що відповідає таким значенням, наступний:

- цемент – 496 кг;
- заповнювач – 1898 кг;
- вода – 135 л;
- суперпластифікатор – 2,49 кг.

Матеріали розділу 6 опубліковано автором у працях [160,161,166,167, 173,182].

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

1. Максимальне зниження відкритої пористості дрібнозернистого бетону забезпечує введення добавки суперплатифікатора 0,5...1% від маси цементу. Підвищення вмісту фракції відсіву менше 0,16 мм при умові сумісного використання суперпластифікатора знижує водопоглинання на 40...50%.

2. Для дрібнозернистого бетону на гранітних відсівах середнього розміру відкритих капілярних пор (λ) знаходиться в межах – 0,21 – 0,81, показник однорідності розмірів відкритих капілярних пор (α) – 0,19 – 0,76. Підвищення вмісту фракції відсіву менше 0,16 мм зменшує показник λ із 0,7 до 0,49, введенні добавки суперпластифікатора до 0,38. При цьому показник однорідності пор змінюються в межах від 0,3 до 0,41.

3. Досліджувані бетони можна віднести до класів підвищеної (F100...F200) та високої (F400...F500) морозостійкості. Зниження розмірів пор та підвищення їх однорідності, викликане збільшення кількості пиловатих частинок відсівів при вмісті суперпластифікатора 0,5...1% сприяє підвищенню морозостійкості до 500...550 циклів.

4. Підвищення вмісту фракції відсіву менше 0,16 мм у відсівах без суперпластифікатора внаслідок збільшення водопотреби бетонної суміші і, відповідно, відкритої пористості та розміру пор викликає зниження водонепроникності від W6 до W2. В присутності добавки кількості 0,5-1% водонепроникність зростає до W8-W10.

5. Розроблено спосіб проектування складу високоміцного дрібнозернистого бетону на гранітних відсівах, який дозволяє визначати співвідношення між компонентами та необхідний вміст добавок, враховуючи необхідну міцність при стиску, вміст фракції менше 0,16 мм у відсівах.

6. Побудовано номограми морозостійкості та водонепроникності високоміцного дрібнозернистого бетону на гранітних відсівах, що дозволяють додатково враховувати ці параметри при проектуванні складу бетону.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну задачу щодо отримання оптимальних технологічних параметрів виготовлення високоміцних дрібнозернистих бетонів з використанням в якості основного заповнювача відсівів подрібнення граніту та розроблено методику проектування складів високоміцних дрібнозернистих бетонів з комплексом заданих властивостей. Основними висновками, які відображають результати дисертаційної роботи, є наступні:

1. Дисперсні гранітні частинки гранітних відсівів суттєво впливають на реологічні показники цементних паст та їх зміну в часі на початкових стадіях твердіння. Встановлено, що загальний характер зміни вібров'язкості, напруження зсуву та в'язкості гранично зруйнованої структури цементного тіста різними наповнювачами близький до експоненційної залежності. Збільшення кількості та дисперсності гранітного наповнювача викликає погіршення його реологічних показників і вимагає значно більшого пластифікуючого ефекту суперпластифікатора.

Отримані математичні моделі реологічних параметрів наповненого цементного тіста, що дозволяють враховувати вплив кількості та дисперсності гранітного наповнювача, а також вміст суперпластифікатора.

2. Встановлено, що частинки відсівів менше 0,16 мм можуть проявляти структуроутворюючу дію на цементний камінь, як дисперсний мінеральний наповнювач і сприяти покращенню експлуатаційних властивостей бетону, при умові нейтралізації негативного їх впливу на водопотребу за рахунок використання ефективних добавок-суперпластифікаторів.

Введення гранітних частинок в присутності суперпластифікатора полікарбосилатного типу однозначно сприяє підвищенню ступеня гідратації цементного каменю та його міцності, особливо у ранні терміни твердіння. При цьому досягається мінімальний показник розміру пор λ та максимальна однорідність пор.

3. Збільшення вмісту пилюватих частинок відсівів та їх дисперсності у дрібнозернистих бетонних сумішах з гранітними відсівами в якості основного заповнювача викликає суттєве зниження їх рухомості. Підвищення водоредукуючої дії суперпластифікатора робить негативний вплив дисперсних частинок практично непомітним. Використання гранітного відсіву з підвищеним вмістом пилюватих частинок дозволяє отримати високорухомі бетонні суміші з ОК = 20...22 см без ознак розшарування. Збільшення вмісту добавки-суперпластифікатора полікарбосилатного типу при зростанні вмісту пилюватих

частинок відсівів та їх дисперсності дозволяє забезпечити «життєздатність» бетонної суміші в межах, встановлених нормативними документами.

4. Виконані дослідження показали можливість раціонального поєднання суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу з пластифікуючими добавками інших видів і створення ефективних комплексних добавок, що характеризуються високими пластифікуючим та водоредукуючим ефектами. Аналіз поліноміальних моделей отриманих з допомогою планів «склад-технологія-властивості» дозволяє виконати необхідні розрахунки для оптимізації складів комплексних добавок і знаходження основних параметрів складів бетонних сумішей з їх застосуванням.

5. Фракціонування та оптимізація фракційного складу гранітного відсіву дозволяє забезпечити максимальну щільність заповнювача і забезпечити максимальну міцність бетону. Введення добавки суперпластифікатора дозволяє максимально використати найбільш дисперсну складову відсіву, яка є найдешевшою і незатребуваною. Встановлено оптимальний зерновий склад відсіву для дрібнозернистого бетону різних класів при використанні суперпластифікаторів.

6. Доведено, що за рахунок використання полікарбоксилатного суперпластифікатора Melflux 2651f з найбільшим пластифікуючим ефектом та заповнювача з оптимізованим гранулометричним складом дозволяє досягти значення В/Ц близько 0,3...0,35, що забезпечує отримання міцності 60...65 МПа. Комплексний вплив полікарбоксилатного суперпластифікатора, пиловатої фракції гранітного відсіву та активної алюмосилікатної добавки метакаоліну дозволяє отримати дрібнозернистий бетон з міцністю при стиску у віці 28 діб 70...75 МПа.

7. Отримано математичні моделі комплексного впливу пластифікуючих добавок різних типів на міцність дрібнозернистого бетону на гранітних відсівах у різному віці (12 год., 1 доба, 7 та 28 діб), що дозволяють проектувати склад комплексної добавки, відповідно встановлених критеріїв оптимізації. Розроблено розрахункові формули для вибору Ц/В при проектуванні складів бетонної суміші з комплексними добавками та визначено коефіцієнти рівняння міцності для різних співвідношень добавок.

8. Встановлено, що підвищення вмісту фракції відсіву менше 0,16 мм при умові використання суперпластифікатора знижує водопоглинання на 40...50%, показник розміру пор - від 0,7 до 0,38, а показник однорідності пор - від 0,3 до 0,41. При цьому морозостійкість ДЗБ підвищується до 500...550 циклів, а водонепроникність - до W8...W10.

9. Розроблено спосіб проектування складу високоміцного дрібнозернистого бетону на гранітних відсівах, який дозволяє визначати співвідношення між компонентами та необхідний вміст добавок, враховуючи необхідну міцність при стиску, морозостійкість та водонепроникність та вміст фракції менше 0,16 мм у відсівах, можливість отримання високоміцних дрібнозернистих бетонів на гранітних відсівах запропонованого оптимізованого складу підтверджено випуском промислово-дослідно партії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дворкін Л. Й. Основи бетонознавства / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін // - К.: Основа, 2007. – 616 с. ISBN 978-966-699-298-0.
2. Kosmatka S.H., Panarese W.C., Kerkhoff B., Design and Control of Concrete Mixtures. Portland Cement Association, Illinois, 2002, 360 p.
3. Метаксаолін в будівельних розчинах і бетонах / [Дворкін Л. Й., Лушнікова Н.В., Рунова Р.Ф. та ін.] – Монографія. – КНУБіА: Київ, 2007. – 216 с.
4. Aitcin P.-C. High-Performance Concrete, / P.-C. Aitcin // Modern Concrete Technology, E & FN Spon, London, 1998, 591 pages.
5. Наноматериалы и нанотехнологии в современной технологии бетонов / Ю. М. Баженов, В. Р. Фаликман, Б. И. Булгаков // Вестник МГСУ. - 2012. - № 12. - С. 125-133
6. Fereshteh Alsadat Sabet, , Nicolas Ali Libre, Mohammad Shekarchi. Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash. Construction and Building Materials (ELSEVIER), Volume 44, 2013, p. 175–184
7. Багатокомпонентні композиційні цементы і бетони / Ю. М. Баженов // Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. - 2012. - Вип. 43. - С.10-13
8. Ушеров-Маршак, А. В. Бетоноведение : Современные этюды /. А. В. Ушеров-Маршак.– Х.: Раритеты Украины, 2016. — 135 с.
9. Дворкін Л.Й., Бабич Є.М., Житковський В.В., Бордюженко О.М. та ін. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони. Рівне. НУВГП.2017. - 331 с.
10. Фере Р. Технология строительных вяжущих материалов. Пер. с франц. Под ред. Н.Н. Лямина . – С – П.:1902. – 132 с.
11. Powers T. Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. Journal of American Ceramic Society, 41, 1958.18–26.
12. Шейкин, А. Е. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня / А. Е. Шейкин. – М. : Стройиздат, 1974. – 192 с.
13. Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Каганов В.О. Бетони на основі наджорстких сумішей. Рівне, ДЦНТІ, 2006. –179 с.
14. Ахвердов Н. И. Основы физики бетона. –М.: Стройиздат,1981. – 464 с.
15. Roy D., Gouda G., Bobrowski A. Very high strength cement pastes prepared hot pressing and other high pressure techniques. // Cement and Concrete Research, n.3, 1972., p. 807-820

16. Brylicki W.: Kostka Brukowa z betonu wibroprasowanego. Polski Cement Krakow 1998.
17. Теоретичні основи технологій виробів із пресованих бетонів : Моногр. / І. Н. Дудар; Вінниц. нац. техн. ун-т. - Вінниця : Універсум-Вінниця, 2005. - 90 с.
18. Lawrence C. The properties of cement paste compacted under high pressure. // Cement and Concrete Association research report. London, 1969., p. 176-191.
19. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л.Проектування складів бетонів. Рівне, НУВГП. 2015-353 с.
20. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. - М.,1998. - 768 с.
21. Физико-химическая механика дисперсных структур. / Под ред. П.А. Ребиндера.– М.: Наука, 1966.– 400 с.
22. Липатов Ю.С. Адсорбция полимеров. / Ю.С. Липатов, Л.М. Сергеев //- Киев: Наукова думка, 1972.- 196 с.
23. Липатов Ю.С. Физикохимия многокомпонентных полимерных систем: В 2-х томах/ Под ред. Ю.С. Липатова //. - Киев: Наукова думка, 1986. - Т.1. Наполненные полимеры. - 450 с.
24. Липатов Ю.С. Зависимость адсорбции полиакриловой кислоты от степени ионизации макромолекул./ Ю.С. Липатов, В.Ф. Федорко, А.П. Закордонский, М.Н. Солтыс // Коллоидный журнал, 1978.- Т.40.- N 1, С. 43-46.
25. Когановский А.М. Адсорбция органических веществ из воды./ А.М. Когановский, Н.А. Клименко, Т.М. Левченко, И.Г. Рода // - Л.: Химия, 1990.- 256 с.
26. Неппер Д. Стабилизация коллоидных дисперсий полимерами./ Д.Неппер // - М.. Мир, 1986.-487 с.
27. Studies on Adsorption of Methyl biobt on Alemina Selica and Zine oxide mizza M.I.Salena Q.U.A. I Indian.- Chem.Soc., 1987, 64,N2.-P. 84-87.
28. Costa U. Adsorption of superplasizers on C3S; changes in zeta potential and reology of pastes / U. Costa, F. Massazza, A. Berrila // Cemento, 1982.- У .19, N4 - P.323- 336
29. Hoeve C.A. On the general theory of polymer adsorbtion at int- faces / C.A. Hoeve // J.Polym.Sci.,1971. - N 34. - P. 1-10.
30. Silberberg A. Structure and properties of macromolecular surface phases. / A. Silberberg // Faraday Discuss. Chem. Soc., 1975.-N 59. - P.203-208.

31. Вовк А.И. Анализ взаимосвязи строения ПАВ с их адсорбционными характеристиками в системе цементный минерал - вода. / А.И. Вовк // Коллоидный журнал. - М., 1997. - Т. 59, N 6. - С. 743-746.
32. Yamada K. Working mechanism of poly-beta-naphthalene sul-fonate and polycarboxylate superplasticizers types from point of cement paste characteristics. /K. Yamada, S. Ogawa, S. Hanahara // ACI SP-145. P. 367-382.
33. Yamada K. Combined effect of cement characteristics on the perfomance of superplasticizers. An investigation in real cement plants. / K. Yamada, C-B. Kim, K. Ichitsubo, M. Ichikawa // Proceedings of 8-th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete. Suppl. volume. P. 159-174.
34. Regnaud L. Changes in cement paste and mortar fluidity after mixing induced dy PCP: a parametric study. / L. Regnaud, A. Nonat, S. Pourchet et al. // SP-239. P. 389-407.
35. Баженов Ю. М. Технология бетона / Ю. М. Баженов // М.: Высш. школа, 1987. – 449 с.
36. Возможности улучшения зернового состава заполнителей для бетона / [Дудко А. А., Коротков Ю. В., Колокольникова Е. И., Троицкий В. В.] – Транспортное строительство. – 1982. – №1 – С. 23 – 24.
37. Колокольников В. С. Технология бетонных и железобетонных изделий/ В. С. Колокольников – М.: Высш. школа, 1970. – 392 с.
38. Овчар В. П. Мелкозернистый бетон на мелких песках, обогащенный каменным отсевом / В. П. Овчар, Л. Ф. Носиченко // Исследование и применение мелкозернистых бетонов./ Труды НИИЖБ, вып.35. М.: Стройиздат, 1978. – 145 с.
39. Солодкий С.Й., Гуняк О. М., Марків Т. Є. Тріщиностійкість модифікованих високоміцних бетонів// Автомобільні дороги і дорожнє будівництво : науково-технічний збірник. – 2016. – Т.98. – С. 247–255.
40. Духовний І. З. Застосування місцевих кам'яних матеріалів при будівництві автомобільних доріг України / І. З. Духовний // Автошляховик України - 1996. - №1. – С. 29 – 32.
41. Автомобильные дороги: СНиП 3.06.03 – 85 [Действующий от 1986 – 01 – 01]: ГОССТРОЙ СССР
42. Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги, вулиці та залізничні переїзди. Вимоги до експлуатаційного стану: ДСТУ 3587–97 [Чинний від 1998–01–01]. – К.: Держстандарт України

43. Применение рециклируемых материалов в дорожном строительстве США и Европы / БИНТИ, №1(7). – 2002. – С. 16 – 18.
44. Карабан Г. Л. / Использование отсевов дробления гранитного щеня при борьбе со скользкостью / Г. Л. Карабан, Н. В. Борисюк // Автомобильные дороги. – 1994. – №10-11– С. 13 – 14.
45. Чемерис Н. М. Композиционные строительные материалы на основе термопластичных полимерных связующих веществ. 1. Композиционный материал с древесным наполнителем / Н. М. Чемерис, Б. Н. Салин, Н. П. Мусько // Известия Высших учебных заведений. Строительство – 1994. – №12.– С. 80 – 82.
46. Меркин А. П. Композиционные ПВХ-олигомерные материалы, имитирующие природный камень // А. П. Меркин, Л.Э. Вительс, С. А. Юрманов // Строительные материалы. – 1990. – №8 – С.16–17.
47. Холопова Л. М. Способы утилизации отходов добычи и обработки декоративного камня / Л. М. Холопова, Е.Ф. Каменюк. – Л.:ЛДНТП. – 1982. – С.32.
48. Новости строительного комплекса. Производство облицовочного пенобетона // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI. – 2003. – №10. – С. 2 – 5.
49. Савилова Г.Н. “Теплый Дом” – основные аспекты качества системы теплоизоляции // строительные материалы. – 2003.- №4. – С. 40-42.
50. Отечественные строительные материалы – 2003 // Строительные материалы. - № 4. – 2003. – С. 50–51.
51. Строительный форум в Тюмени // Строительные материалы. – 2002. – С. 44–47.
52. Ястребова Н. Б. Разрушение защитно-декоративных покрытий фасадов зданий в современных условиях // Строительные материалы, оборудование технологии XXI. – 2003. – №2. – С. 48 – 49.
53. Казарян Ж. А. Заливные полы // Строительные материалы. – 2000. – №3. – С. 44–47.
54. Beschichtungsmasse: Заявка 10000682 Германия МПК7 С 04 В 28/02 В 14/02. Babka Hans Wili, Reichel Helmut №10000682.5.
55. Полимерные напольные покрытия для предприятий пищевой промышленности // Стройпрофиль. – 2003. - №1(23). – С. 48 – 49.

56. Наркевич Ф. Ф. К вопросу о классификации сухих строительных смесей / Ф. Ф. Наркевич, Е. И. Дяченко // Строительные материалы. – 2002. – №9. – С. 10–11.
57. Эффективность использования промышленных отходов в строительстве [под. ред. Рекитара Я. А.] – М.: Стройиздат. – 1975. – 184 с.
58. Flowable fill composition and method: Пат 5951751 США МПК6 С 04 В 28/22 Williams Devon, Eliasen Michael, Derks Robert A., Chemical Lime Comp. - № 091175850
59. Zubereitung for wandputz, insbesondere zum auftragen einer flchenbeschichtung mit rauher, einen glanzoder glitzereffekt bewirkender oberflchenbeschichtung / Заявка19624149 Германия МПК6 С 04 В 16/06/ Tesch R № 19624149.9
60. Червяков Ю. Н. Отходы промышленности – сырье для автоклавных силикатных материалов // Комплексное использование минерального сырья и попутных продуктов при производстве строительных материалов: Сб. науч. труд. Под ред. Кривенко П.В. – К.:УМК ВО. – 1990. – С – 186 – 189.
61. Галкин В. В. Трещеустойкость и прочность сталефибробетона для производства колец и труб с заменой части гранитного щеня на отходы от его дробления / В. В. Галкин, Н. Н. Черноусов // Композиционные строительные материалы. Теория и практика: Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. – Пенза. - Ч.1. 2001. – С. 51 – 53.
62. Process for producing improved concrete pavement having water permeabilite: Пат. 2107225 Канада МПК6 В 28 В11/08 Domon Shozo, Sato Road Co. Ltd.
63. Кухаренко Л. В. Серобетон на основе мясного сырья и промышленных отходов Норильского региона / Л. В. Кухаренко, Н. В. Личман, И. В. Никитин // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. – Пенза. - Ч.1. 2001. – С. 163 – 165.
64. ДСТУ БВ.2.7-210:2010. Національний стандарт України. Будівельні матеріали. Пісок із відсівів дроблення вивержених гірських порід для будівельних робіт. Технічні умови
65. Якобсон, М. Я. Бетон дорожный с использованием отсевов дробления изверженных горных пород для строительства автомобильных дорог [Текст]: дисс. канд. техн. наук / М. Я. Якобсон. – Москва, 2000. – 258 с.
66. Лазуткин А. В. Использование отсевов – важный фактор экономического роста предприятий нерудной промышленности // Строительные материалы. – 2003. – №11. – С. 6–8.

67. Teychen P. C. Cruched Rock Aggregates in Concrete “Quarry Management and Products” – May, 1978 – V. – pp. 122 - 136
68. Джигид С. Г. Использование отходов камнедробления для сборных конструкций // Бетон и железобетон. – 1987. - №7. – С. 38-39.
69. Ипполитов Е.Н. Оптимизация состава, структуры и свойств мелкозернистого бетона.: Автореф. дис.... к. т. н. М., 1980.— 20 с.
70. Дворкин Л.И., Чудновский С.М., Марчук В.М. Отсевы кварцитового песчаника – заполнитель бетона. // Строительные материалы и конструкции, №1, 1992.— С.10-11
71. Житковський В.В. Вібропресований дрібнозернистий бетон з використанням відсівів подрібнення граніту.:Автореф.дис.к.т.н., 2003. – 15с.
72. Шейкин А. М. Приминения мелких и очень мелких песков в цементном бетоне / А. М. Шейкин // Автомобильные дороги . – 1985. - №5. – С. – 12-14.
73. Левин Л. И. Применение отсевов дробления в бетонах с эффективными пластификаторами / Л. И. Левин, В. Н. Тарасова, Левина Е. И. // Малоотходная технология при производстве нерудных строительных материалов и облицовочных материалов из природного камня. Материалы семинара. – М.: МДНТП. – 1987. – С. 128 – 134.
74. Ланге Ю. Г. Технология приминения в цементобетонне песков с повышенным содержанием тонкодисперсных частиц // Автомобильные дороги. – 1995. - №12. – С. 18 – 20.
75. Кройчук Л. А. Влияние производства сухих смесей на окружающую среду / Л. А. Кройчук // Строительные материалы. – 2003. - №1. – С.32.
76. Юнг В. Н. Основы технологи в'язучих веществ / В. Н. Юнг // М.: Промстройиздат, 1951. – 355 с.
77. Пантелеев А. С. Цементы с микронаполнителями: Сб. тр. ВХО им. Д. И. Менделеева. Т. V1. - №6. – С. 362 – 367.
78. Рунова Р.Ф. Технологія модифікованих будівельних розчинів:[підруч. для студ. вищ. навч. закл.] / Р.Ф. Рунова, Ю.Л. Носовський. - К: Видавництво КНУБіА, 2007.-256 с.
79. Усов Б. А. Сухие строительные смеси на основе молотого портландцемента с кварцосодержащими микронаполнителями // Строительные материалы, оборудование, технологи XXI. – 2003. – №7. – С. 14 – 15.
80. Венюа М. Цементы и бетоны в строительстве / М Венюа. – М.: Стройиздат, 1980. – 415 с.

81. Баженов П. И. Технология автоклавных материалов / П. И. Баженов. – Л.: Стройиздат, 1978. – 378 с.
82. Дворкин Л. И. Цементные бетоны с минеральными наполнителями / Л.И. Дворкин, В.И. Соломатов, В.Н. Выровой; Под ред. Дворкина Л. И. – Киев: Будивэлник, 1991. – 136
83. Пантелеев А. С. Цементы с минеральными добавками / А. С. Пантелеев, В. Н. Колбасов //Новое в химии и технологи бетона. – М.: Стройиздат, 1971. – С. 155-164.
84. Будников П. П. О гидратации алюмосодержащих минералов портландцемента в присутствии карбонатных микронаполнителей / П. П. Будников , И. М. Колбасов, А. С. Пантелеев // Цемент. – 1961. - №1. – С. 13-16.
85. Баженов, Ю. М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю. М. Баженов, В. С. Демьянова, В. И. Калашников. – М.: Ассоциация строительных вузов. – 2006. – 368 с. ISBN: 5-93093-422-3.
86. Басин В. Е. Адгезионная прочность / В. Е. Басин. – М.:Химия, 1981. – 208 с.
87. Дворкин Л. И. Строительные минеральные вяжущие материалы / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин . – М.: Инфра-Инженерия, 2011. – 544 с.
88. Массачца Ф. Химия пуццолановых добавок и смешанных цементов // Труды шостого міжнародного конгреса по химии цемента. т. 3. – М.: Стройиздат, 1976. – С. 209 – 221.
89. Гиббс Д. Термодинамические работы. – М.: Гостехиздат. – 1950. – 492 с.
90. Полак А. Ф. Твердение мономинеральных в'язучих веществ: Вопросы теории. – М.: Стройиздат, 1966. – 208 с.
91. О механизме влияния тонкомолотих добавок на свойства цементного камня / Ф. Д. Овчаренко, В. И. Соломатов, В. М. Казанский и др. // Докл. / АН СССР. – Т. 284. - №2. – 1985. – С. 318–403.
92. Физико-химическая механика дисперсных структур / Под ред.. П. А. Ребиндера . – М.: Наука, 1966. – 400 с.
93. Сергеев А. М. Использование в строительстве отходов энергетической промышленности. – К.: Будівельник. – 1984. – 120 с.
94. Каприелов С. С. Научные основы модифицирования бетонов ультрадисперсными материалами: Диссертация д-ра техн. наук. М.: – 1995. 41 с.
95. Дворкин Л. И. Эффективные цементно-золевые бетоны / Л.И. Дворкин, О. Л. Дворкин, Ю. А. Корнейчук // Ровно. – 1998. – 195 с.

96. Дворкин Л. И. Эффект активных наполнителей в пластифицированных цементных бетонах // Изв. Вузов. Стр-во и архитектура. – 1988. - №9. – С. 53 – 57.
97. Сычев М. М. Перспеквы повышения прочности цементного камня // Цемент. – 1987. - №9. – С. 17 – 19.
98. Сватовская Л. Б. Активированное твердение цементов / Л. Б. Сватовская, М. М. Сычев – Л.: Стройиздат. – 1983. – 160 с.
99. Урьев Н. В. Высококонцентрированные дисперсные системы. – М.: Химия. – 1980. – 320 с.
100. Некоторые аспекты кластерообразования в композиционных материалах / В. И. Соломатов, Н. Н. Ракина, А. К. Далевский, Н. Л. Подемко // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. – 1986. - №3. – С. 52 – 56.
101. Соломатов В. И. Кластеры в структуре и технологи композиционных строительных материалов / В. И. Соломатов, А. Н. Борбышев, Н. П. Прошин // Изв. Вузов. Стр-во и архитектура. – 1983. - №4. – С. 56 – 61.
102. Соломатов В. И. Кластерообразование композиционных строительных материалов / В. И. Соломатов, Н. В. Выровой // Технол. Механика бетона / РПИ. – Рига. – 1985. – С. 5 – 21.
103. Соломатов В. И. Механизм образования дискретных структур при структурообразовании цементных композиций как высококонцентрированных систем / В. И. Соломатов, Н. В. Выровой, А. В. Сиренко // Материалы конф. По физико-химии получения и применения промывочных жидкостей, дисперсных систем и тампонажных растворов / ИКХХВ АН УССР. – К. – 1985. – С. 128.
104. Пинус Є. Р. Контактные слои цементного камня в бетоне и их значение // Структура, прочность и деформации бетона. – М.: Стройиздат. – 1966. – С. 290 – 294.
105. Любимова Т. Ю. Влияние кварцевого заполнителя на кинетику твердения минеральных вяжущих веществ / Т. Ю. Любимова, Н. В. Михайлов, П. А. Ребиндер // Докл. АН СССР. – Т. 162. - №1. – 1968. – 144 – 147.
106. Дворкін, Л. Й. Модифіковані золівмісні сухі будівельні суміші для мурувальних та клейових розчинів / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін Ю. В. Гарніцький НУВГП. – Рівне. – 2013. – 325 с.
107. Иванов И. А. Легкие бетоны на основе зол электростанций. – М.: Стройиздат, 1986. – 136 с.

108. Красный И. М. О механизме повышения прочности бетона при введении микронаполнителей // Бетон и железобетон. – 1987. – №5. – С. 10 – 11.
109. Зоткин А. Г. Микронаполняющий эффект минеральных добавок в бетоне / Бетон и железобетон. – 1994. – №3. – С.7–9.
110. Власов В.К. Закономерности оптимизации состава бетона с дисперсными минеральными добавками // Бетон и железобетон. -1993. -№4. -С.10-12.
111. Каприелов С. С. Общие закономерности формирования структуры цементного камня и бетона с добавкой ультрадисперсных материалов // Бетон и железобетон, – 1995. – №6. – С.16 – 20.
112. Рамачандран и др. Добавки в бетон: Справ. пособие /В.С.Рамачандран, Р.Ф.Фельдман, М.Коллепарди и др.; Под ред. В.С.Рамачандрана. -М.: Стройиздат, 1988. – С.168 – 184.
113. Roberts L.R., Grace W.R. Microsilica in concrete.1 //Mater. Sci. Concr.1. - Westerville (Ohio), 1989. – pp.197 – 222.
114. Bendz Dale P., Garfodzi Edward J. Simulation studies of the effects of mineral admixtures on the cement paste-aggregate interfacial zone //ACI Mater. J.. -1991. –V88. –№8. –pp.518 – 529.
115. Larbi J.A., Bijen J.M. The chemistry of the pore fluid of silica fume-blended cement systems //Cem. and Concr. Res. – 1990. – V20. – №4. – pp.506–516.
116. Каприелов С. С. Микрокремнезем в бетоне / С. С. Каприелов, А. В. Шейнфельд // Обзор. инфор. М.: ВНИИТПИ. – 1993. 38 с.
117. Джакупов К. К. Облицовочные материалы на основе отходов камнепиления известняка ракушечника: Автореф. диссертации канд. тех. наук. – Самара. – 1996. – 28 с.
118. Свойства бетонов с добавкой ультрадисперсных отходов ферросплавного производства / С. С. Каприелов, Н. Ю. Похлебкина и др. // Химические добавки для бетонов. М.: НИИЖБ. – 1987. – С. 34 – 38.
119. Ольгинский А. Г. Пылеватые минеральные добавки к цементным бетонам. // Строительные материалы и конструкции. – 1990. – №3. С. 18.
120. О некоторых закономерностях связи структуры и прочности бетона / В. В. Бабков, Р. И. Барангулов, А. А. Ананенко и др. // Известия вузов. Строительство и архитектура. - 1983. - №2. - С.12-20.
121. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости / В. И. Соломатов и др.// Киев: Будивельник. - 1991. - 241с.

122. Соломатов В. И. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости / В. И. Соломатов, В. Н. Выровой и др. Киев: Будивельник. - 1991. - 144 с.
123. Кукубу И. М. Зола и зольные цементы // Пятый международный конгресс по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1973. – С. 405 – 416.
124. Цилосани З. Н. Усадка и ползучесть бетона. – Тбилиси: Мицнерсба, 1979. – 228 с.
125. Шейкин А. Е. Структура и свойства цементных бетонов / А. Е. Шейкин, Ю. В. Чеховский, М. И. Бруссер. – М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.
126. Дворкин Л. И. Использование золы-уноса ТЭС для приготовления бетонов и растворов при строительстве АЭС / Л. И. Дворкин, И. Г. Пресман // Информэнерго. – М.:1987. – 52 с.
127. Смит А Э Современный подход к применению золы-уноса в бетоне // Технология товарной бетонной смеси – М.: Стройиздат. - 1981 - С 18-24.
128. Стольников В В Использование золы-уноса от сжигания пылевидного топлива на тепловых электростанциях – Л.: Энергия. – 1989. - 50 с.
129. Ковач Р Процессы гидратации и долговечности зольных цементов // Шестой Международный конгресс по химии цементов – М.: Стройиздат. – 1976. – т3. - С 91 – 102.
130. Кокубу И М Зола и зольные цементы // Пятый международный конгресс по химии цемента – М.: Стройиздат. – 1973. – С. 405 – 416.
131. Горчаков Г И. Структура и морозостойкость гидротехнического бетона с добавкой золы-уноса ТЭС / Г. И. Горчаков, А. Б. Набоков, С. Ф. Притула // Материалы конф и совещаний по гидротехнике – Л.: Энергия. - 1978 - вып 118. – С. 80 - 85.
132. Mortier de ragreage adapte aux oeuvres sculptes eu granit et mise eu oeuvre/ Заявка 2810032 Франция МПК 7 С 04 В 26/32, С 04 В 41/45 Floch Pierre, Rolland Olivier №0007491.
133. Методические рекомендации по применению и обогащению отсевов дробления и разнопрочных каменных материалов для дорожного строительства [№ 373-4д от 2.11.83]. – М. 1987. - Минтрансстрой.
134. Рамзес Б.Я, Нисневич М.Л. Контроль качества щебня, гравия и песка для строительных работ. Гоударственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам. - М- 1963. - 192.С.
135. Толкачев С. С. Таблицы межплоскостных расстояний. – Л.: Химия. – 1968. – 131 с.

136. Азаров Л. В. Методы порошка в рентгенографии / Л. В. Азаров, М. Д. Бургер // Издательство иностранной литературы. – 1961. – 363 с.
137. Михеев И. В. Рентгенографический определитель материалов. – Госгеолтехиздат. – 1957. – 750 с.
138. Бородянская М. В. Влияние глинистых примесей в песке на прочность и долговечность плотного силикатного бетона. – В кн.: Методы расчета, свойства и технологии изготовления конструкций из плотного силикатного бетона // Тез. докл. конф. По бетону и железобетону. – 1977. – С. 66-77.
139. Иванов Ф. М. Структура и свойства цементных растворов / Физико-химическая механика дисперсных структур. – М.: Наука. – 1966. – С. 339-346.
140. Иванов Ф. М. Морозостойкость бетона в мелкозернистых песках. – Строительство трубопроводов. – 1979. - № С.24-26.
141. Баженов Ю.М. Структурные характеристики бетонов / Ю.М. Баженов, Г. И. Горчаков, Л. А. Алымов //Бетон и железобетон. - №9. – 1972. – С16-17.
142. Бернштейн Ю.И. Исследование взаимодействия гидратных новообразований цементного камня с заполнителем. Дис. На соискание уч.ст. к.т.н. – М. -1971. – 145 с.
143. Книгина Г. И. Лабораторные работы по технологии строительной керамики и искусственных пористых заполнителей. М.: "Высшая школа", 1977.– 208с.
144. Фигуровский Н. А. Седиментометрический анализ. М.: Изд-во АН СССР.– 1948.– 332 с.
145. Коузов П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов.– Л.: Химия, 1987.– 264 с.
146. Радіаційний контроль будівельних матеріалів та об'єктів будівництва. ДБН В.1.4-2.01-97 [Чинний від 1998-01-01]. – Київ: Держкоммістобудування України
147. Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови: ДСТУ Б В.2.7-46:2010 [Чинний від 2011-01-09]. – Київ: Мінрегіонбуд України
148. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками: ДСТУ Б В.2.7-214:2009 [Чинний від 2009-22-12]. – Київ: Мінрегіонбуд України
149. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск: ДСТУ Б.В.2.7-187:2009 [Введ. 2009-01-12]. – Київ: Мінрегіонбуд України

150. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності: ДСТУ Б В.2.7-170:2008 [Чинний від 2009-01-01]. – Київ: Мінрегіонбуд України
151. Рекомендации по применению методов математического планирования эксперимента в технологии бетона. М., НИИЖБ Госстроя СССР. 1982, с.103.
152. Баженов Ю.М. Перспективы применения математических методов в технологии сборного железобетона / Ю.М. Баженов, В.А. Вознесенский - Москва: Стройиздат, 1974. – 192 с.
153. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. – Москва: Финансы и статистика, 1981. – 263 с.
154. Дворкін Л.Й. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, В.В. Житковський // - Рівне: НУВГП, 2011- 174 с.
155. Гранковский И.Г. Структурообразование в минеральных вяжущих системах. – Вып.118. – С. 80-85.
156. Кикас В. Х. Изменение свойств цементной пасты и мелкозернистого бетона в зависимости от состава сланцезольного портландцемента и рас хода добавки С-3 / В. Х. Кикас, Р. Х. Пунтес //Тт./Таллинский политех. Ин-т. – Таллин, 1984. - № 573. – С11-26.
157. Рояк С. М. Специальные цементы / С. М. Рояк, Г. С. Рояк //Учеб. Пос. Для вузов. – 2-е узд., перер. И доп. – М.: Стройиздат, 1983. – 279 с.
158. Хигерович М.И., Меркин А.П. Физико-химические и физические методы исследования строительных материалов. М.: Высшая школа, 1968.–191 с.
159. Дворкин Л. И. Оптимальное проектирование составов бетонов. – Львов : Вища шк, 1989. – 160 с.
160. Дворкін Л.Й. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони: монографія / Є.М. Бабич, В.В. Житковський, О.М. Бордюженко, С.В. Філіпчук, Д.В. Кочкар'юв, І.В. Ковалик, Т.В. Ковальчук, М.М. Скрипник // Рівне: НУВГП. – 2017. – 331 с.
161. Дворкін Л.Й. Ефективні технології бетонів та розчинів із застосуванням техногенної сировини: монографія / Л.Й. Дворкін, В.В. Житковський, В.В. Марчук, Ю.О. Степасюк, М.М. Скрипник// Рівне: НУВГП. – 2017. – 424 с.
162. Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Разумовський А.Р., Скрипник М.М. Оптимізація зернового складу заповнювача в бетоні підвищеної міцності на гранітному відсіві, Одеса, 2015.

163. Дворкин Л. И. Эффективные литые бетоны / В. П. Кизима – Львов : Вища шк. Изд-во при Львов, ун-те, 1986. – 144 с.
164. Горностаева Т.А. Мелкозернистые бетоны с использованием отсевого дробления щебня изверженных горных пород / Т.А. Горностаева – Москва: дис... канд. тех. наук, 2005.
165. Вознесенский В.А. Численные методы решения строительнотехнологических задач на ЭВМ. / В.А.Вознесенский, Т.В.Ляшенко, Б.Л.Огарков. – К.: Высшая школа, 1989. – 328 с.
166. Дворкін Л.Й. Проектування складів комплексних пластифікуючих добавок та бетонів з їх застосуванням/ Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Скрипник М.М.// Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. – Рівне: НУВГП. – 2016. – Вип. 34. – С. 36-45.
167. Дворкін Л.Й. Комплексні пластифікуючі добавки для бетону на основі ефірів полікарбонату/ Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Скрипник М.М.// Будівельні матеріали та вироб. – 2016. - №1. – С. 38-42.
168. Скрипник М.М. Комплексні пластифікуючі добавки на основі ефірів полікарбонату/ Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Скрипник М.М.// Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Ефективні організаційно-технічні рішення та енергозберігаючі технології в будівництві». – Харків 2016. – С. 33-35.
169. Патент №109413, С04В 103/30 (2006.01) від 25.08.2016 р. Комплексна добавка для бетону/ Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Скрипник М.М.; Заявник і патентовласник Національний університет водного господарства та природокористування.
170. Технология бетона. Учебник. Ю.М. Баженов - М.: Изд-во АСВ, 2011 - 528 с.
171. Caldarone M. A., Gruber K. A., Burg R. G.. High-reactivity metakaolin: a new generation mineral admixture // Conc. Int. – 1994. – № 11. - P. 37-40.
172. ДСТУ БВ.2.7-43. Бетони важкі. Технічні умови.
173. Дворкин Л.И. Оптимизация составов комплексных добавок/ Дворкин Л.И., Житковский В.В., Скрыпник Н.М.// Бетон и железобетон в Украине. – 2017. - №1. – С. 2-8.
174. Дворкін Л.Й. Високоміцний дрібнозернистий бетон на відсівах подрібнення граніту/ Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Скрипник М.М.// Наука та будівництво. – 2018. - №1. – С.34-42.

175. Скрипник М.М. Комплексні пластифікуючі добавки на основі ефірів полікарбонатів/ Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Скрипник М.М.// Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Ефективні організаційно-технічні рішення та енергозберігаючі технології в будівництві». – Харків 2016. – С. 33-35.
176. Дворкін Л.Й. Оптимізація зернового складу заповнювача бетону підвищеної міцності на гранітному відсіві/ Л.Й. Дворкін, В.В. Житковський, А.Р. Разумовський, М.М. Скрипник // вісник. – Одеса: ОДАБА. – 2015. – С. 66-71.
177. Зайченко Н.М. Высокопрочные тонкозернистые бетоны с комплексно модифицированной микроструктурой/ Н.М. Зайченко. – [монографія]. Макеєвка: ДонНАСА, 2009. – 207 с.
178. Ольгинский А.Г. Особенности контактообразования в цементных бетонах с минеральным микронаполнителем / А.Г. Ольгинский // Вісник Донбаської державної академії будівництва та архітектури. – 2004. – Вип. 2004-1(43), Т. 1. – С. 134-140.
179. Ерохина Л.А., Цибенко М.Н. Об использовании отсеков дробления горной породы в бетонах. В кн.: Трубопроводы сжиженного природного газа, материалы и конструкции для их устройства. Сб. трудов ВНИИСТ - М.: ВНИИСТ. - 1985. - С.90-95.
180. Takemura K. Some Properties of Concrete Using Crushed Stone Pust as Fine Aggregate. The Cement Association of Japan. 13-th General Meeting Technical Session. Tokyo, 1976, YI Review, p.95-97.
181. Шейкин А.Е., Добшиц Л.М. Цементные бетоны высокой морозостойкости. Ленинград: Стойиздат, 1989.–127 с.
182. Дворкин Л.И. Метод оптимизации составов фибробетонов/ Дворкин Л.И., Бордюженко О.М., Скрыпник Н.М.// Технологии бетонов. – Москва, 2019. – № 3-4. – С. 40-44.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Генеральний директор

ППФ «Торгбуд сервіс»



А.М. Власюк

2019 р.

АКТ

впровадження технології виготовлення високоміцного дрібнозернистого бетону з використанням відсівів подрібнення граніту.

Акт засвідчує те, що на підприємстві ППФ «Торгбуд сервіс» з 2018 р. впроваджена технологія виготовлення високоміцного дрібнозернистого бетону з використанням в якості заповнювача гранітних відсівів згідно рекомендації за рецептурою розробленою в дисертаційній роботі «Високоміцний дрібнозернистий бетон із застосуванням відсівів каменеподрібнення» аспіранта кафедри ТБВіМ Національного університету водного господарства та природокористування Скрипника Миколи Михайловича. При наявності в відсівах до 18% високодисперсної фракції граніту якість бетону відповідає встановленим вимогам ДСТУ БВ.2.7-176:2008 «Суміші бетонні та бетон. Загальні технічні умови».

Як сировинні матеріали були використані:

- Портландцемент – ПЦ-ІІ/А-Ш-500 «Волинь-Цемент» філія ПРАТ «Дікергофф Цемент Україна»
- Відсів каменеподрібнення - гранітних відсівів ККНК «Технобуд» з $M_{кр}=3,02$ та вмістом частинок $<0,16$ мм 17,8%.
- Суперпластифікатор – комплексна добавка-суперпластифікатор яка була розроблена у дисертаційній роботі та згідно патенту на корисну панель №109413 від 28.08.2016 р.

Склад запропонованої бетонної суміші з рухомістю Р3 (ОК =10...15 см) наведений в табл. 1.

Таблиця 1 – Склад запропонованої бетонної суміші

№	Компоненти	Типовий склад, кг/м ³	Запропонований склад, кг/м ³
1	Цемент ПЦ-III/A-III-500	460	480
2	Пісок	630	-
3	Гранітний відсів	-	1760
4	Щебінь	1150	-
5	Суперпластифікатор	1,8	-
6	Комплексна добавка-суперпластифікатор	-	2,0

В процесі виготовлення бетонної суміші періодично відбирались зразки-кубики розміром 10×10×10 см та визначали фізико-механічні властивості бетону згідно ДСТУ БВ.2.7-176:2008 «Суміші бетонні та бетон. Загальні технічні умови». Випробування проводились в лабораторії будівельних матеріалів та виробів Національного університету водного господарства та природокористування атестат акредитації ДП "Рівнестандартметрологія" № РТ-0141/2015 від 23.12.2015 р.

Результати випробувань наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати випробування зразків бетону

Дата виготовлення	Вік зразків, діб	№ зразків	Розміри, см			Маса, т, г	Руйнівне навантаження Р, кН	Густина ρ, кг/м ³	Міцність при стиску f _{cm} , МПа	Середнє значення, f _{cm} , МПа
			a	b	h					
09.04.2018	28	1	10	10	9,7	2310	581	2381	59,9	58,4
	28	2	10	10	9,6	2288	546	2383	56,9	
23.04.2018	28	1	10	10	10,1	2355	555	2332	55,0	55,5
	28	2	10	10	10	2368	561	2368	56,1	
17.06.2018	28	1	10	10	10	2368	565	2368	56,5	55,9
	28	2	10	10	9,9	2347	548	2371	55,4	
01.07.2018	28	1	10	10,1	10,1	2398	571	2351	56,0	57,3
	28	2	10	10	10	2366	587	2366	58,7	
18.08.2018	28	1	10	10	9,9	2360	591	2384	59,7	58,8
	28	2	10	10	10	2351	580	2351	58,0	
20.08.2018	28	1	10	10	9,8	2341	538	2389	54,9	55,6
	28	2	10	10	9,9	2345	558	2369	56,4	
03.09.2018	28	1	10	10	10	2370	544	2370	54,4	54,8
	28	2	10	10	10	2365	551	2365	55,1	
28.09.2018	28	1	10	10	9,9	2352	561	2376	56,7	55,4
	28	2	10	10	9,8	2322	530	2369	54,1	
08.10.2018	28	1	10	10	9,9	2359	594	2383	60,0	56,3
	28	2	10	10	9,9	2322	520	2345	52,5	
11.10.2018	28	1	10	10	10,1	2370	560	2347	55,4	55,4
	28	2	10	10	10	2344	553	2344	55,3	

	Середнє арифметичне	56,3
	Клас бетону	C32/40
	Коефіцієнт варіації	3,6%

Висновок: Використання відсівів дозволило підприємству замінити кондиційні заповнювачі бетону — гранітний щебінь і середньо- або крупнозернистий пісок, а також отримувати економію до 285,4 грн. на 1 м³ бетону. Загальний економічний ефект від впровадження склав близько 1840 тис. грн.

Головний технолог
ППФ «Торгбуд сервіс»



Д.С. Савич

Аспірант



М.М. Скрипник

ДОДАТОК Б

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Генеральний директор

ПСП «Архітектур-сервіс»

А.М. Власюк

2019 р.



РОЗРАХУНОК

Очікуваного економічного ефекту від впровадження у виробництво високоміцного бетону з використанням відсівів подрібнення граніту

Очікуваний економічний ефект розраховували згідно рекомендацій, що розроблені у дисертаційній роботі Скрипника М.М. Рецептатура та вартість бетонної суміші із використанням відсівів каменеподрібнення були прийняті та розраховані на 1 м³ бетонної суміші та наведені в табл.1.

Таблиця 1 – Розрахункова вартість матеріалів для виготовлення бетонної суміші

№	Компоненти	Ціна за 1 кг/грн	Типова рецептатура		Запропонована рецептатура	
			Витрата на 1 м ³	Вартість 1 м ³ , грн	Витрата на 1 м ³	Вартість 1 м ³ , грн
1	Цемент ПЦ-ІІ/А-ІІІ-500	2,6	460	1196	480	1248
2	Пісок	0,3	630	189	-	-
3	Гранітний відсів	0,05	-	-	1760	88
4	Щебінь	0,3	1150	345	-	-
5	Суперпластифікатор	25	1,8	45	-	-
6	Комплексна добавка-суперпластифікатор	160	-	-	2,4	153,6
Разом				1775		1489,6

Очікуваний розрахунковий економічний ефект від впровадження технології виробництва високоміцних бетонів із використанням відсівів каменеподрібнення у порівнянні із типовими складами становить 285,4 грн/м³

ДОДАТОК В

**Акт**

впровадження технології виготовлення високоміцного дрібнозернистого бетону з використанням відсівів подрібнення граніту.

Акт засвідчує те, що на підприємстві ПП «Славутський БРЗ» з 2018 р. впроваджена технологія виготовлення високоміцного дрібнозернистого бетону з використанням в якості заповнювача гранітних відсівів згідно рекомендації за рецептурою розробленою в дисертаційній роботі «Високоміцний дрібнозернистий бетон із застосуванням відсівів каменеподрібнення» аспіранта кафедри ТБВіМ Національного університету водного господарства та природокористування Скрипника Миколи Михайловича. При наявності в відсівах до 18% високодисперсної фракції граніту якість бетону відповідає встановленим вимогам ДСТУ БВ.2.7-176:2008 «Суміші бетонні та бетон. Загальні технічні умови».

Як сировинні матеріали були використані:

- Портландцемент – ПЦ-П/А-Ш-500 «Волинь-Цемент» філія ПРАТ «Дікергофф Цемент Україна»
- Відсів каменеподрібнення - гранітних відсівів ККНК «Технобуд» з $M_{кр}=3,02$ та вмістом частинок $<0,16$ мм 17,8%.
- Суперпластифікатор – комплексна добавка-суперпластифікатор яка була розроблена у дисертаційній роботі та згідно патенту на корисну панель №109413 від 28.08.2016 р.

Склад запропонованої бетонної суміші з рухомістю РЗ (ОК =10...15 см) наведений в табл. 1.

Таблиця 1 – Склад запропонованої бетонної суміші

№	Компоненти	Типовий склад, кг/м ³	Запропонований склад, кг/м ³
1	Цемент ПЦ-П/А-Ш-500	445	480
2	Пісок	590	-
3	Гранітний відсів	-	1760
4	Щебінь	1200	-
5	Суперпластифікатор	2,1	-
6	Комплексна добавка-суперпластифікатор	-	2,4

В процесі виготовлення бетонної суміші періодично відбирались зразки-кубики розміром 10×10×10 см та визначали фізико-механічні властивості бетону згідно ДСТУ БВ.2.7-176:2008 «Суміші бетонні та бетон. Загальні технічні умови». Випробування проводились в лабораторії будівельних матеріалів та виробів Національного університету водного господарства та природокористування атестат акредитації ДП "Рівнестандартметрологія" № РТ-0141/2015 від 23.12.2015 р.

Результати випробувань наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати випробування зразків бетону

Дата виготовлення	Вік зразків, діб	№ зразків	Розміри, см			Маса, т, г	Руйнівне навантаження Р, кН	Густина ρ, кг/м ³	Міцність при стиску f _{cm} , МПа	Середнє значення, f _{cm} , МПа
			a	b	h					
11.05.2018	28	1	10	10	9,9	2348	565	2372	57,1	58,7
	28	2	10	10	9,8	2330	591	2378	60,3	
28.05.2018	28	1	10	10	9,9	2371	578	2395	58,4	56,8
	28	2	10	10	10	2368	552	2368	55,2	
14.06.2018	28	1	10	10	10,1	2380	571	2356	56,5	56,9
	28	2	10	10	9,9	2360	566	2384	57,2	
21.06.2018	28	1	10	10,1	10	2390	580	2366	57,4	56,9
	28	2	10	10	10	2366	563	2366	56,3	
10.08.2018	28	1	10	10	10	2378	569	2378	56,9	57,6
	28	2	10	10	10,1	2391	588	2367	58,2	
17.08.2018	28	1	10	10	9,9	2364	554	2388	56,0	57,7
	28	2	10	10	9,9	2354	588	2378	59,4	
20.09.2018	28	1	10	10	10,1	2395	581	2371	57,5	56,9
	28	2	10	10	10	2365	562	2365	56,2	
26.09.2018	28	1	10	10	9,9	2364	566	2388	57,2	55,7
	28	2	10	10	10	2359	542	2359	54,2	
05.10.2018	28	1	10	10	9,9	2378	541	2402	54,6	56,4
	28	2	10	10	10,1	2395	588	2371	58,2	
12.10.2018	28	1	10	10	9,8	2355	554	2403	56,5	57,7
	28	2	10	10	9,9	2361	582	2385	58,8	

Середнє арифметичне	57,1
Клас бетону	C32/40
Коефіцієнт варіації	2,7%

Висновок: Використання відсівів дозволило підприємству замінити кондиційні заповнювачі бетону — гранітний щебінь і середньо- або крупнозернистий пісок, а також отримувати економію до 268,4 грн. на 1 м³ бетону. Загальний економічний ефект від впровадження склав близько 920 тис. грн.

Гол. інженер
аспірант



О.І. Метельський
М.М. Скрипник

ДОДАТОК Г



РОЗРАХУНОК

Очікуваного економічного ефекту від впровадження у виробництво високоміцного бетону з використанням відсівів подрібнення граніту

Очікуваний економічний ефект розраховували згідно рекомендацій, що розроблені у дисертаційній роботі Скрипника М.М. Рецептатура та вартість бетонної суміші із використанням відсівів каменеподрібнення були прийняті та розраховані на 1 м^3 бетонної суміші та наведені в табл.1.

Таблиця 1 – Розрахункова вартість матеріалів для виготовлення бетонної суміші

№	Компоненти	Ціна за 1кг/грн	Типова рецептатура		Запропонована рецептатура	
			Витрата на 1 м^3	Вартість 1 м^3 , грн	Витрата на 1 м^3	Вартість 1 м^3 , грн
1	Цемент ПЦ-ІІ/А-ІІІ-500	2,6	445	1196	480	1248
2	Пісок	0,2	590	189	-	-
3	Гранітний відсів	0,05	-	-	1760	88
4	Щебінь	0,35	1200	345	-	-
5	Суперпластифікатор	30	2,1	45	-	-
6	Комплексна добавка-суперпластифікатор	160	-	-	2,4	153,6
Разом				1758		1489,6

Очікуваний розрахунковий економічний ефект від впровадження технології виробництва високоміцних бетонів із використанням відсівів каменеподрібнення у порівнянні із типовими складами становить $268,4\text{ грн/м}^3$

ДОДАТОК Д

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

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

2. Дворкін Л.Й. Ефективні технології бетонів та розчинів із застосуванням техногенної сировини: монографія / Л.Й. Дворкін, В.В. Житковський, В.В. Марчук, Ю.О. Степасюк, М.М. Скрипник// Рівне: НУВГП. – 2017. – 424 с.

Статті у наукових фахових виданнях України:

3. Дворкін Л.Й. Оптимізація зернового складу заповнювача бетони підвищеної міцності на гранітному відсіві/ Л.Й. Дворкін, В.В. Житковський, А.Р. Разумовський, М.М. Скрипник // Вісник. ОДАБА – Одеса: ОДАБА. – 2015. – С. 66-71.

4. Дворкін Л.Й. Комплексні пластифікуючі добавки для бетону на основі ефірів полікарбонату/ Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Скрипник М.М.// Будівельні матеріали та вироб. – 2016. - №1. – С. 38-42.

5. Дворкін Л.Й. Проектування складів комплексних пластифікуючих добавок та бетонів з їх застосуванням/ Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Скрипник М.М.// Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. – Рівне: НУВГП. – 2016. – Вип. 34. – С. 36-45.

6. Дворкін Л.Й. Ефективність бетонів на вітчизняному суперпластифікаторі/ Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Скрипник М.М., Ковальчук Т.В.// Будівництво України. – 2017. - №4. – С. 10-13.

Статті у наукових періодичних виданнях іноземних держав:

7. Дворкин Л.И. Метод оптимизации составов фибробетонов/ Дворкин Л.И., Бордюженко О.М., Скрыпник Н.М.// Технологии бетонов. – Москва, 2019. – № 3-4. – С. 40-44.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Дворкін Л.Й. Високоміцний дрібнозернистий бетон на відсівах подрібнення граніту/ Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Скрипник М.М.// Наука та будівництво. – 2018. - №1. – С.34-42.

9. Дворкин Л.И. Оптимизация составов комплексных добавок/ Дворкин Л.И., Житковский В.В., Скрыпник Н.М.// Бетон и железобетон в Украине. – 2017. - №1. – С. 2-8.

10. Скрипник М.М. Важкий бетон із використанням кам'яних відсівів/ Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Скрипник М.М.// Матеріали X Міжнародної науково-технічної Web-конференції «Композиційні матеріали». – Київ 2017. – С 18-23.

11. Скрипник М.М. Комплексні пластифікуючі добавки на основі ефірів полікарбонату/ Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Скрипник М.М.// Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Ефективні організаційно-технічні рішення та енергозберігаючі технології в будівництві». – Харків 2016. – С. 33-35.

Патент:

12. Патент №109413, С04В 103/30 (2006.01) від 25.08.2016 р. Комплексна добавка для бетону/ Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Скрипник М.М.; Заявник і патентовласник Національний університет водного господарства та природокористування.

ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні положення дисертаційної роботи та її результати доповідались і обговорювались на конференціях:

– VI Міжнародна науково-практична конференція «Ефективні організаційно-технологічні рішення та енергозберігаючі технології в будівництві», Харківський національний університет будівництва та архітектури. (Харків 2016);

– X Міжнародна науково-технічна Web-конференція «Композиційні матеріали», Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ 2017);

– I Міжнародна науково-практична конференції «Інноваційні технології в архітектурі і дизайні», Харківський національний університет будівництва та архітектури. Харків 2017;

– науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Національного університету водного господарства та природокористування (Рівне, 2015-2018 рр.).