

Український державний університет науки і технологій
ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Смирнов Антон Сергійович

УДК 691.32.004.56-033.5

ДИСЕРТАЦІЯ
БЕТОНИ З ВИКОРИСТАННЯМ КРУПНОГО ЗАПОВНЮВАЧА
РЕЦИКЛІНГОВОГО ПОХОДЖЕННЯ

192 «Будівництво та цивільна інженерія»

19 «Архітектура та будівництво»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

 А. С. Смирнов

Науковий керівник (консультант) Савицький Микола Васильович, доктор
технічних наук, професор

Дніпро - 2024

АНОТАЦІЯ

Смирнов А. С. Бетони з використанням крупного заповнювача рециклінгового походження. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» (19 – «Архітектура та будівництво»). – Навчально науковий інститут «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Українського державного університету науки і технологій, м. Дніпро, 2024.

Дана дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми одержання бетонів класів міцності С12/15, С16/20, С20/25 з крупним заповнювачем рециклінгового походження.

В умовах великої кількості руйнувань, спричинених військовими діями, існує необхідність в повторному застосуванні значних обсягів будівельних відходів після відповідної переробки. Серед загального масиву відходів демонтажу суттєву частку складає бетонний брухт, який після подрібнення та фракціонування можливо застосовувати як заповнювач для бетону. Таким чином, постає питання врахування його особливостей при розрахунку і виборі складу бетонів з заданими властивостями.

В першому розділі виконано аналіз джерел утворення бетонних та залізобетонних відходів. За результатами вивчення існуючих в Україні нормативно-технічних та декларативних документів встановлено, що під час демонтажу окремих будівельних конструкцій, знесення будівель і споруд, нового будівництва проєктні та будівельно-монтажні компанії мають здійснювати заходи, направлені на максимальне повторне застосування будівельних відходів, за необхідності після відповідної переробки. Розглянуто світовий досвід дослідження властивостей та застосування рециклінгових заповнювачів з 1970-х років ХХ століття.

На основі аналізу даних з літературних джерел визначені особливості рециклінгових крупних заповнювачів (РКЗ), а також характерні властивості бетонів з РКЗ. Встановлено, що в цілому фізико-механічні та експлуатаційні властивості РКЗ та бетону з РКЗ є дещо нижчими в порівнянні з натуральними заповнювачами (НЗ) та бетонами на НЗ. Але в залежності від вмісту РКЗ, методів подрібнення, якості сортування і фракціонування можливо досягти задані або з незначними погіршеннями властивості бетону з РКЗ. В той же час вартість такого бетону суттєво нижча порівняно з бетонами на натуральних заповнювачах.

РКЗ отримується шляхом подрібнення та переробки використаного бетону. Відповідно, РКЗ складається з двох головних фаз – натурального заповнювача та залишкового розчину. Таким чином, бетон з РКЗ є більш складною системою через наявність додаткових фаз – залишкового розчину та міжфазної контактної зони (МКЗ) між ним і натуральним заповнювачем, – які і визначають особливості РКЗ і бетонів з РКЗ. Проаналізовані існуючі методи розрахунку складів бетону з РКЗ. Виявлено, що такі методи на даний момент носять більше теоретичний характер і є досить трудомісткими та потребують значних витрат часу.

Розглянуто традиційний в Україні розрахунково-експериментальний метод підбору складу важкого бетону, покладений в основу національних стандартів. Встановлено, що існуючі підходи не дозволяють врахувати особливості РКЗ та закономірності формування структури бетону з РКЗ. На підставі цього висунута наукова гіпотеза про можливість врахування особливостей РКЗ при розрахунку і виборі складу бетону шляхом введення експериментально визначених поправок на походження і фізико-механічні властивості РКЗ. Також в розділі встановлені обмеження, прийняті в даній роботі, щодо отримання важких бетонів з РКЗ для певного виду конструкцій, що працюють на стиск та згин.

В другому розділі наведені характеристики застосованих під час дослідження місцевих матеріалів, а також описані методики

експериментальних досліджень властивостей РКЗ та бетону з РКЗ. Наведено зерновий склад натуральних заповнювачів, визначено хімічний та мінералогічний склади портландцементу ПЦ II/Б-Ш-400 (СЕМ II/В-S 32,5 N) виробництва Heidelbergcement, м. Кривий Ріг та нормальна густина цементного тіста. Встановлено, що зерновий склад НЗ в його природному стані не відповідає вимогам національних стандартів, що потребує його корекції. Розраховані склади бетонів, зразки з яких підлягали наступному подрібненню, та описані метод, засоби, обладнання, що застосовувалися для подрібнення.

В третьому розділі представлені результати фізико-механічних випробувань РКЗ, отриманих після подрібнення зразків бетону у віці 28 діб, 90 діб та 180 діб. Встановлено, що зерновий склад утворених після подрібнення сумішей фракцій не відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-75-98 через надмірний обсяг фракцій 10...20 мм та 0...5 мм. В той же час зерновий склад крупних фракцій, що і є РКЗ, в цілому відповідає вимогам нормативної документації. При вмісті крупних фракцій (>5 мм) в сумішах 82,9...84,9% вміст кожної фракції в РКЗ складає: 0,8...5,7% (20...25 мм), 63,3...70,1% (10...20 мм), 28,9...31,2% (5...10 мм).

Встановлено, що головним фактором, що має визначальний вплив на властивості РКЗ, є наявність залишкового розчину на зернах щебня. Його масовий вміст зростає разом зі зменшенням крупності фракцій, що призводить до зменшення насипної та середньої густини РКЗ. Насипна густина РКЗ фракцій 5...10 мм становила 1,05...1,1 г/см³, фракцій 10...20 мм – 1,2...1,27 г/см³. Середня густина зерен: фракцій 10...20 мм – 2,44...2,55 г/см³, фракцій 5...10 мм – 2,29...2,38 г/см³. Міцність за показником дробильності також зменшується разом із зменшенням розміру зерен: з 11,6...17,4% у фракціях 10...20 мм до 15,6...21,0% у фракціях 5...10 мм. За рахунок наявності пористого залишкового розчину водопотреба РКЗ в 7,8...8,7 разів вища за водопотребу НЗ.

Враховуючи виявлені закономірності у властивостях РКЗ, розроблені рекомендації щодо формування раціонального зернового складу РКЗ, які полягають у досягненні найбільшої насипної густини та найбільш щільного пакування зерен. Експериментально встановлено, що разом зі зменшенням в РКЗ вмісту фракції 5...10 мм за масою до мінімально допустимого на рівні 20% згідно з ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013 досягається найбільша насипна густина з найменшою порожнистістю. На основі цих рекомендацій підібрані три суміші РКЗ, які відрізнялися міцністю та складом бетону-джерела.

В четвертому розділі експериментально встановлені фізико-механічні властивості бетонів з РКЗ. На основі аналізу традиційного розрахунково-експериментального методу було зроблено припущення про те, що врахувати особливості РКЗ (наявність залишкового розчину та МКЗ, менші густина зерен, насипна густина та міцність, підвищені пористість та лещадність) можливо шляхом введення поправок до коефіцієнта якості заповнювачів A , який впливає на водо-цементне співвідношення, та до загальної витрати води. Експериментальне визначення зазначених поправок виконувалось, виходячи з умов рівномірності бетонів та рівнорухливості бетонних сумішей на НЗ та РКЗ. З цією метою був запланований двофакторний експеримент. В якості факторів, що варіюються, виступали цементно-водне співвідношення (Ц/В) та витрата води в бетонних сумішах на РКЗ. За результатами експерименту отримані рівняння регресії першого порядку, які встановлювали залежність рухливості бетонних сумішей з РКЗ та міцність бетонів з РКЗ від факторів, що варіювалися.

Для отримання проектних значень рухливості та міцності був розрахований та підібраний склад бетону класу С20/25 з рухливістю бетонної суміші з ОК=7 см. При цьому для забезпечення ідентичності зернового складу НЗ з отриманими сумішами РКЗ здійснювалось коригування вмісту в НЗ фракції 5...10 мм до рівня 20%. Отриманий склад бетону на НЗ прийнято як базовий для аналогічних складів з РКЗ на нижніх рівнях варіювання

факторів. На інших рівнях варіювання склад бетонів з РКЗ визначався лише інтервалами варіювання факторів.

Експеримент виконувався для кожної суміші РКЗ окремо. З запроєктованих складів бетону для кожної точки плану експерименту виготовлені по 3 зразки бетону з РКЗ. Для кожної бетонної суміші перед формуванням визначалась густина та рухливість за розпливом конуса. Для сумішей з витратою води на верхньому рівні варіювання розплив конуса становив 15,2...17,7 см, що відповідало ОК=8...10 см; з витратою води на нижньому рівні варіювання розплив конуса становив 10,8...12,4 см, що відповідало ОК=5,5...6 см. Густини бетонних сумішей становили 2,33...2,41 г/см³ незалежно від суміші РКЗ. Отримані густини виявились вищими за розрахункові. Очевидно в процесі замішування сумішей в змішувачі відбулося додаткове руйнування слабких зерен РКЗ, що разом з механічним впливом під час механічного ущільнення суміші та вібраційним впливом сприяло збільшенню щільності пакування зерен РКЗ.

Результати визначення рухливості бетонних сумішей очікувано корелювали з витратою води. В результаті розв'язку отриманих за результатами визначення рухливості бетонних сумішей рівнянь регресії, встановлено, що поправка на витрату води для забезпечення рівнорухливості бетонної суміші з РКЗ становить 1,4...1,6% від масового вмісту РКЗ.

Через 28 діб зразки-куби з бетону з РКЗ, що витримувались в нормальних термовологісних умовах, підлягали випробуванню на міцність на стиск. Визначалась також густина бетону, яка склала 2,2...2,33 г/см³. Отримані густини бетону корелювались з Ц/В та витратою води: найбільша густина у зразків з найбільшим Ц/В та найменшою витратою води.

За результатами визначення міцності бетону з РКЗ встановлено наступне. Очікувано зразки з більшим Ц/В мали більшу міцність бетону: 29,74...32,45 МПа в зразках бетону з Ц/В на верхньому рівні варіювання; 24,14...26,77 МПа в зразках бетону з Ц/В на нижньому рівні варіювання. За однакового Ц/В міцність бетону зразків з меншою витратою води виявилась

більшою, ніж у зразках бетону з більшим вмістом води. Крім цього отримані міцності бетону зразків з РКЗ на нижньому рівні варіювання факторів, що відповідало складу цільового бетону на НЗ, навіть перевищували значення міцності бетону на НЗ. Цей ефект спостерігався незалежно від складу сумішей РКЗ, з яких виготовлялися зразки. Таким чином, були встановлені закономірності формування структури бетону з РКЗ. Враховуючи пряму залежність між Ц/В та міцністю бетону, встановлено, що реальне Ц/В в сумішах з меншою кількістю води виявилось більшим від розрахункового. Очевидно, такий ефект пов'язаний з наявністю в РКЗ пористого залишкового розчину, з яким вода замішування миттєво взаємодіяла, заповнивши його пори, і, таким чином, підвищуючи Ц/В в контактних зонах між РКЗ та матрицею нового розчину.

Для розрахунку поправки на якість заповнювача розрахункове Ц/В було відкориговане шляхом зменшення витрати води на величину експериментально визначеної поправки на витрату води. Розв'язавши отримані рівняння регресії відносно Ц/В та використовуючи формулу Болоемея одержана величина поправки до коефіцієнта якості заповнювачів $\Delta A = -0,05$.

У п'ятому розділі представлені результати впровадження результатів дослідження під час виробництва бетону з РКЗ для влаштування підлоги в одному зі складських приміщень в м. Дніпрі ТОВ «ДНІПРО ЗБК». Наведена послідовність розрахунку складу бетону з РКЗ згідно з удосконаленим методом. Розрахований економічний ефект від заміщення НЗ на РКЗ складає 9,6% для бетону класу С12/15; 7,2% для бетону класу С16/20; 7,4% та 6,9% для бетону класу С20/25 в залежності від марки цементу в бетоні на НЗ. Зменшення емісії CO₂ у випадку застосування РКЗ складає 11% під час виготовлення бетону класу С16/20; 6,4% під час виготовлення бетону класу міцності С20/25 (за умови використання цементу марки М500, порівняно з бетоном на НЗ на цементі марки М500); 26,6% під час виготовлення бетону

класу міцності C20/25 (за умови використання цементу марки М500, порівняно з бетоном на НЗ на цементі марки М400).

Ключові слова: бетон, бетонні відходи, випробування, водопотреба, екологічний ефект, економічний ефект, зерновий склад, міцність, насипна густина, рециклінговий крупний заповнювач, розрахунок складу бетону, рухливість бетонної суміші, середня густина

ABSTRACT

Smyrnov A. Concrete with the use of coarse aggregate of recycling origin. – Qualifying scientific paper as a manuscript.

The thesis for PhD degree in specialty 192 «Construction and civil engineering» (19 – «Architecture and construction») – Educational Scientific Institute «Prydniprovskya State Academy of Civil Engineering and Architecture» of the Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, 2024.

This dissertation work is devoted to solving the important scientific and technical problem of obtaining concrete of strength classes C12/15, C16/20, C20/25 with coarse aggregates of recycling origin.

In the conditions of a large amount of destruction caused by military actions there is a need to reuse significant volumes of construction waste after appropriate processing. Among the total mass of demolition waste a significant share is concrete scrap, which after grinding and fractionation can be used as coarse aggregate for concrete. Thus the question arises of taking into account the features of that aggregate when mix designing and choosing the composition of concrete with given properties.

In the first chapter the sources of concrete and reinforced concrete waste have been analyzed. Based on the study of existing regulatory and technical and declarative documents in Ukraine it has been established that during the dismantling of individual building structures, demolition of buildings and structures, new construction design and construction companies are required to

implement measures aimed at maximizing the reuse of construction waste, after appropriate processing if necessary. The global experience of researching the properties and applications of recycled aggregates since the 1970s has been considered.

Based on the analysis of data from literary sources the peculiarities of recycled concrete aggregates (RCA) and the characteristic properties of concrete with RCA have been determined. It has been established that overall, the physical, mechanical, and operational properties of RCA and concrete with RCA are somewhat inferior compared to natural aggregates (NA) and concrete with NA. However, depending on the content of RCA, grinding methods, quality and thoroughness of sorting and fractionation of RCA, it is possible to achieve the specified properties of concrete with RCA, sometimes with slight deterioration. At the same time the cost of such concrete is significantly lower compared to concrete with NA.

RCA is obtained by crushing and processing of used concrete. Accordingly, RCA consists of two main phases – natural aggregate and residual mortar. Therefore, concrete with RCA is a more complex system due to the presence of additional phases – residual mortar and the interfacial transition zone (ITZ) between it and the NA. These phases define the characteristics of RCA and concrete with RCA. Existing methods of mix design of concrete with RCA have been analyzed. It has been found that these methods currently tend to be more theoretical and are quite time-consuming.

The common in Ukraine calculation-experimental method of mix design of heavy concrete, which is the basis of national standards, has been reviewed. It has been determined that existing approaches do not adequately account for the peculiarities of RCA and the regularities of the formation of concrete structure with RCA. Based on this, a scientific hypothesis has been proposed regarding the possibility of incorporating the features of RCA when mix designing and choosing the composition of concrete by introducing some experimentally determined adjustments that account for the origin and physical and mechanical properties of

RCA. Also, the limitations adopted in this work have been established in the chapter regarding the production of heavy concrete with RCA for some types of structures operating in compression and bending.

In the second chapter, characteristics of the local materials used during the research are given, along with a description of methods for experimental investigations into the properties of RCA and concrete containing RCA. The grain composition of natural aggregates is given, the chemical and mineralogical composition of Portland cement PC II/B-Sh-400 (CEM II/B-S 32.5 N) produced by Heidelbergcement, Kryvyi Rih, and the normal density of cement dough are determined. It has been determined that the grain composition of NA in its natural state does not meet the requirements of national standards, necessitating corrections. The compositions of the concretes, the samples of which were to be crushed, were designed, and the method, tools and equipment used for crushing were described.

The third chapter presents the results of physical and mechanical tests of RCA obtained after crushing concrete samples aged 28 days, 90 days and 180 days. It has been established that the grain composition of fractions (fine and coarse) formed after grinding does not meet the requirements of DSTU B V.2.7-75-98 due to the excessive volume of fractions 10...20 mm and 0...5 mm. At the same time the grain composition of coarse fractions, which is actually RCA, generally meets the requirements of regulatory documentation. With a content of coarse fractions (>5 mm) in mixtures ranging from 82.9% to 84.9%, the content of each coarse fraction solely in RCA is as follows: 0.8% to 5.7% for 20-25 mm, 63.3% to 70.1% for 10-20 mm, and 28.9% to 31.2% for 5-10 mm.

It has been established that the main factor significantly influencing the properties of RCA is the presence of residual mortar on the crushed stone grains. Its mass content increases as the particle size decreases, leading to a decrease in bulk density and specific density of RCA grains. The bulk density of fractions 5-10 mm ranged from 1.05 to 1.1 g/cm³, while for fractions 10-20 mm it ranged from 1.2 to 1.27 g/cm³. The specific density of grains was 2.44 to 2.55 g/cm³ for

fractions 10-20 mm and 2.29 to 2.38 g/cm³ for fractions 5-10 mm. The strength, as indicated by the crushing index, also decreases with a reduction in grain size from 11.6% to 17.4% in fractions 10-20 mm to 15.6% to 21.0% in fractions 5-10 mm. Due to the presence of porous residual mortar the water demand of RCA is 7.8 to 8.7 times higher than that of NA.

Taking into account the identified regularities in the properties of RCA, recommendations have been developed for forming a rational grain composition of RCA, which consists in achieving the highest bulk density and densest grain packing. Experimental findings indicate that reducing the mass content of the 5...10 mm fraction in RCA to a minimum permissible level of 20% according to DSTU-N B.V.2.7-299:2013 results in the highest bulk density with the lowest void content. Based on these recommendations three RCA mixtures were selected differing in strength and composition of the source concrete.

In the fourth chapter the physical and mechanical properties of concrete with RCA are experimentally determined. Based on analysis of the traditional calculation-experimental mix design method for heavy concrete assumptions were made that taking into account the features of RCA (presence of residual solution and ITZ, reduced specific and bulk densities and strength, increased porosity and content of flat particles) was possible by introducing adjustments to the quality coefficient of aggregates A, which affects the water-cement ratio, and to the total water consumption. The experimental determination of the mentioned adjustments was carried out based on the conditions of equal compressive strength of concrete and workability of concrete mixtures on NA and RCA. For this purpose a factorial experiment with two factors was planned. The variables were the cement-water ratio (C/W) and water consumption in concrete mixtures with RCA. According to the results of the experiment, first-order regression equations were obtained, which established the dependence of the workability of concrete mixtures with RCA and the compressive strength of concrete with RCA on variables.

To obtain the design values of workability and strength the mixture of concrete class C20/25 was designed and selected with the Slump value of the

concrete mixture 7 cm. Moreover, to ensure the identity of the grain composition of the NA with the obtained RCA mixtures the content of the NA fraction of 5...10 mm was adjusted to the level of 20%. The obtained composition of concrete with NA has been intended as a base for similar compositions with RCA at the lower levels for factors. At other levels the composition of concrete with RCA was determined only by the differences of factors.

The experiment was performed for each RCA mixture separately. For each point of the experimental plan 3 samples of concrete with RCA were made from the designed concrete mixes. For each concrete mixture the density and workability (slump cone spread) were determined before pouring into the molds. For mixes with water consumption at the upper level of factor the slump cone spread ranged from 15.2 to 17.7 cm, corresponding to a slump value of 8 to 10 cm. For mixes with water consumption at the lower level of factor the slump cone spread ranged from 10.8 to 12.4 cm, corresponding to a slump value of 5.5 to 6 cm. The densities of the concrete mixes ranged from 2.33 to 2.41 g/cm³ regardless of the RCA mixture. The obtained densities turned out to be higher than the calculated ones. It is evident that during the mixing process in the mixer there was additional breakdown of weak RCA grains. This, along with the mechanical compaction during the compaction process and the vibrational influence, contributed to an increase in the packing density of RCA grains.

The results of determining the workability of concrete mixtures were found to correlate as expected with water consumption. As a result of solving the regression equations derived from the results of determining the workability of concrete mixtures it was established that the water content adjustment required to achieve appropriate workability of concrete mixes with RCA is 1.4% to 1.6% of the mass content of RCA.

After 28 days the concrete cube samples containing RCA, which had hardened under normal thermo-humid conditions, underwent compressive strength testing. Also the density of the concrete was determined to range from 2.2 to 2.33 g/cm³. These densities were found to correlate with the W/C ratio and water

content, with higher densities observed in samples with higher W/C ratio and lower water content.

According to the results of compressive strength testing of concrete with RCA the following was established. As expected, samples with a higher C/W ratio exhibited greater strength of concrete: 29.74 to 32.45 MPa in samples of concrete with a C/W ratio at the upper level of factor; 24.14 to 26.77 MPa in samples of concrete with C/W ratio at the lower level of factor. Among samples with the same C/W ratio those with lower water content showed higher strength of concrete compared to those with higher water content. Additionally, the obtained strength of samples of concrete with RCA at the lower level of factors, which corresponded to the composition of the target concrete with NA, even exceeded the value of the strength of the concrete with NA. This effect was observed regardless of the composition of RCA mixtures used to prepare the samples. Thus, the regularities of the formation of the structure of concrete with RCA have been established. Considering the direct relationship between C/W ratio and concrete strength, it was found that the real C/W ratio in mixes with a smaller amount of water turned out to be greater than the calculated one. Obviously, this effect is related to the presence of a porous residual mortar in RCA, which instantly interacted with water during mixing, filling its pores and thereby increasing the effective W/C ratio in the contact zones between RCA and the matrix of the new mortar.

For the calculation of the adjustment for the quality of the aggregate, the estimated C/W ratio was adjusted by reducing the water consumption by the value of the experimentally determined adjustment for the water content. Solving the obtained regression equations relative to C/W ratio and using the Bolomey formula, the value of the adjustment to the quality coefficient of aggregates $\Delta A = -0.05$ was obtained.

The fifth chapter presents the results of the implementation of the research results during the production of concrete from RCA for laying the floor in one of the warehouses in the city of Dnipro by «DNIPRO ZBK LLC». The sequence of mix design of concrete with RCA according to the improved method is given. The

calculated economic effect of replacing NA with RCA is 9.6% for concrete of class C12/15; 7.2% for concrete of class C16/20; 7.4% and 6.9% for concrete of class C20/25, depending on the cement type in concrete with NA. The reduction of CO₂ emissions in case of using RCA is 11% during the production of concrete of class C16/20; 6.4% during the production of concrete of class C20/25 (provided that cement 42.5 R is used, as compared to concrete on NA using cement 42.5 R); 26.6% during the production of concrete of class C20/25 (provided that cement 42.5 R is used, compared to concrete on NA using cement 32.5 R).

Key words: concrete, concrete waste, tests, water consumption, ecological effect, economic effect, grain composition, strength, bulk density, recycling coarse aggregate, mix design of concrete, workability of concrete, specific density

ЗМІСТ

ВСТУП	18
РОЗДІЛ 1. ОСОБЛИВОСТІ ЗАПОВНЮВАЧІВ З ПЕРЕРОБЛЕНИХ БУДІВЕЛЬНИХ ВІДХОДІВ	24
1.1. Поточний стан у сфері управління будівельними відходами в Україні	25
1.2. Світовий досвід використання подрібненого бетону в якості заповнювачів для нового бетону	31
1.3. Особливості заповнювачів з подрібненого бетонного брухту	33
1.4. Вплив методів подрібнення на властивості РКЗ	42
1.5. Розрахунково-експериментальний метод розрахунку складу бетону та можливість його застосування для розрахунку складу бетону з РКЗ	44
1.6. Теоретичні передумови та обмеження умов дослідження	54
РОЗДІЛ 2. ЗАСТОСОВАНІ МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	56
2.1. Властивості застосованих матеріалів	56
2.2. Виготовлення зразків бетону-джерела та їх подрібнення	64
2.3. Фізико-механічні методи досліджень	67
РОЗДІЛ 3. ВЛАСТИВОСТІ КРУПНОГО ЗАПОВНЮВАЧА РЕЦИКЛІНГОВОГО ПОХОДЖЕННЯ	72
3.1. Випробування зразків бетону-джерела	72
3.2. Випробування сумішей РКЗ, утворених після подрібнення	72
3.3. Визначення середньої густини зерен, насипної густини, порожнистості, лещадності та дробильності РКЗ	81
3.4. Виготовлення сумішей рециклінгового крупного заповнювача	85
Висновки за розділом 3	87
РОЗДІЛ 4. БЕТОН З ВИКОРИСТАННЯМ РЕЦИКЛІНГОВОГО КРУПНОГО ЗАПОВНЮВАЧА	90
4.1. Математичне планування експерименту	90
4.2. Розрахунок складу бетонної суміші на натуральному заповнювачі	92

4.3. Розрахунок складів бетонної суміші на РКЗ	99
4.4. Виготовлення зразків-кубів з бетонних сумішей на НЗ та РКЗ, визначення рухливості та густини бетонних сумішей	106
4.5. Статистична обробка результатів визначення рухливості суміші	109
4.6. Розрахунок поправки на витрату води на РКЗ	114
4.7. Фізико-механічні випробування зразків з бетону на НЗ та РКЗ	115
4.8. Статистична обробка результатів визначення міцності бетону з РКЗ	126
4.9. Розрахунок поправки коефіцієнта А на походження крупного заповнювача	129
Висновки за розділом 4	132
РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ КРУПНОГО ЗАПОВНЮВАЧА РЕЦИКЛІНГОВОГО ПОХОДЖЕННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВАЖКИХ БЕТОНІВ	134
5.1. Виробнича апробація результатів дослідження	134
5.2. Оцінка економічного ефекту	139
5.3. Оцінка екологічної ефективності	144
5.4. Впровадження результатів дослідження в освітній процес в Українському державному університеті науки і технологій, м. Дніпро	158
Висновки за розділом 5	159
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	160
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	164
ДОДАТКИ	177

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

КМУ	– Кабінет міністрів України
МКЗ, ITZ	– міжфазна контактна зона
НГЦТ	– нормальна густина цементного тіста
НЗ, NA	– натуральний заповнювач
ОК	– осадка конуса бетонної суміші
ПГП, GWP	– потенціал глобального потепління
ПДАБА	– Придніпровська державна академія будівництва та архітектури
ПДВ	– податок на додану вартість
ПФЕ	– повний факторний експеримент
РК	– розплив конуса
РКЗ, RCA	– рециклінговий крупний заповнювача
УДУНТ	– Український державний університет науки і технологій
Ц/В (В/Ц)	– цементно-водне (водо-цементне) співвідношення

ВСТУП

Актуальність теми. Згідно з результатами проведених досліджень сума прямих збитків житловій та нежитловій інфраструктурі України в результаті військових дій склала понад \$150 млрд. З 2022 р. в Україні введені нормативно-правові документи, які регламентують етапи демонтажу зруйнованих об'єктів, переробки та утилізації будівельних відходів з урахуванням їх повторного використання.

Також для України актуальним є питання загального рівня фізичного зносу будівель і споруд в промисловому і в житлово-цивільному секторах. Розвиток будівництва сприяє зростанню об'ємів знесення старих будівель і споруд, що, в свою чергу, спричиняє появу великої кількості будівельних відходів.

Зазвичай відходи від руйнувань і демонтажу будівель і споруд вивозяться на полігони з метою захоронення без будь-якої переробки.

У 2017 р. КМУ схвалено Національну стратегію управління відходами в Україні до 2030 р., згідно з якою передбачається здійснення заходів щодо модернізації матеріально-технічної бази суб'єктів господарювання з перероблення та утилізації відходів, в тому числі будівельних.

Станом на сьогодні в Україні широко не застосовуються технології переробки (рециклінгу) відходів будівництва. Найпоширенішими перешкодами переробці та повторному використанню будівельних відходів є недостатня впевненість у якості матеріалів та досить висока вартість технологій з переробки. До того ж родовища природної сировини ще далекі від вичерпання, а потужності з її видобутку та виробництва традиційних матеріалів є достатньо розвиненими.

З іншого боку, незважаючи на високу енергоємність виробництва, бетон залишається найпоширенішим будівельним матеріалом. Для його виготовлення використовуються викопні природні ресурси – щебінь та пісок. Враховуючи наявність в бетонних відходах натурального щебня постає питання щодо можливості застосування подрібненого будівельного брухту і

під час нового будівництва. Найбільш очевидним є варіант використання подрібнених бетонних відходів в якості крупного заповнювача рециклінгового походження для виробництва нових бетонів. Світовий досвід використання таких заповнювачів свідчить про перспективність такого напрямку.

Запропоновані в літературних джерелах підходи щодо врахування особливостей рециклінгових заповнювачів під час розрахунку складів важких бетонів є трудомісткими та тривалими в часі. В умовах великої кількості руйнувань в Україні внаслідок військових дій існує потреба в удосконаленні існуючого методу, який дозволить на основі визначених характеристик крупного заповнювача рециклінгового походження, розрахувати склад важкого бетону з заданими характеристиками.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася відповідно до науково-дослідної тематики кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій Придніпровської державної академії будівництва та архітектури (ПДАБА) у рамках держбюджетних науково-дослідних робіт «Виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку "Технічні науки" Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» (державний реєстраційний номер 0123U105370, рік виконання 2023, рівень участі дисертанта – виконавець) та «Індустріальні архітектурно-конструктивно-технологічні системи будівель з інтегрованими укриттями для відбудови соціальної інфраструктури України за технологіями рециклінгу та розподіленої енергетики» (державний реєстраційний номер 0124U000543, рік виконання 2024, рівень участі дисертанта – виконавець).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є науково-методичне обґрунтування застосування крупних заповнювачів, отриманих в результаті переробки бетонних відходів будівництва після демонтажу бетонних та залізобетонних конструкцій, розробка методу проектування складу бетону в частині використання крупних заповнювачів рециклінгового походження (РКЗ) з урахуванням виявлених закономірностей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

– виконати аналіз існуючих досліджень щодо особливостей крупних заповнювачів рециклінгового походження та їх впливу на властивості бетону з РКЗ;

– встановити особливості застосування існуючого розрахунково-експериментального методу проектування і підбору складу важкого бетону з урахуванням властивостей РКЗ;

– дослідити властивості крупного заповнювача, отриманого в результаті подрібнення бетонного брухту, визначити вплив характеристик бетону-джерела – міцності, віку, складу – на характеристики РКЗ з нього;

– на основі отриманих характеристик РКЗ розробити рекомендації щодо формування готової до використання суміші заповнювачів;

– експериментально визначити фізико-механічні властивості бетону з крупним заповнювачем рециклінгового походження;

– удосконалити метод розрахунку складу бетону класу міцності до С20/25 в частині врахування особливостей рециклінгових заповнювачів та закономірностей формування структури бетону з РКЗ;

– виконати оцінку економічного та екологічного ефектів від застосування рециклінгових заповнювачів.

Об'єкт дослідження – бетон з використанням крупного заповнювача рециклінгового походження.

Предмет дослідження – закономірності процесів формування фізико-механічних та експлуатаційних властивостей бетону з крупним заповнювачем рециклінгового походження.

Методи дослідження. Експериментальні методи фізико-механічних випробувань заповнювачів та бетону за стандартними методиками; розрахунково-експериментальний метод розрахунку складу бетонної суміші.

Наукова новизна одержаних результатів:

- результати експериментальних досліджень фізико-механічних властивостей крупного заповнювача рециклінгового походження, отриманого після подрібнення бетону на місцевих матеріалах;
- встановлені закономірності формування структури бетону з крупним заповнювачем рециклінгового походження;
- на основі експериментальних даних щодо властивостей бетонних сумішей та бетонів з РКЗ удосконалений метод розрахунку складу бетону, в якому запропоновано новий підхід, згідно з яким врахована можливість застосування в бетонах крупного заповнювача рециклінгового походження, його особливостей та закономірностей формування структури бетону з РКЗ;
- експериментально підтверджена можливість застосування крупного заповнювача рециклінгового походження у важких бетонах класів міцності до С20/25 для певного виду конструкцій за рахунок якісного фракціонування, перемішування, формування та достовірного визначення фактичних характеристик РКЗ.

Практичне значення одержаних результатів:

- запропоновані рекомендації щодо формування раціонального зернового складу РКЗ безпосередньо в умовах майданчиків знесення будівель і споруд;
- запропонована методика розрахунку складу бетону з РКЗ класів міцності до С20/25 для певного виду конструкцій, визначено поправки для визначення водо-цементного співвідношення та витрат води, які враховують особливості РКЗ;
- виконано апробацію результатів дослідження при проектуванні складу бетону для влаштування підлоги в одному з приміщень в процесі нового будівництва складу резервного палива по вул. Байкальській, 9Г в м. Дніпрі компанією ТОВ «ДНІПРО ЗБК»; результати випробування контрольних зразків бетону з РКЗ підтверджують коректність запропонованого методу;

– розраховані економічний та екологічний ефекти від застосування РКЗ як заміну НЗ в бетонах класів міцності С12\15, С16/20, С20/25.

Особистий внесок здобувача. Всі експериментальні дослідження, виконані під час підготовки дисертації, отримання та обробка результатів, розрахунки виконані здобувачем особисто. В роботах, що опубліковані у співавторстві здобувачу належить (згідно з Додатком А):

– аналіз існуючих досліджень, визначення особливостей заповнювачів рециклінгового походження [1, 2, 5];

– підбір складу суміші крупних заповнювачів рециклінгового походження з урахуванням їх особливостей [3];

– оцінка можливості практичного застосування крупних заповнювачів рециклінгового походження [3, 6, 7];

– проведення експериментальних досліджень та визначення властивостей крупних заповнювачів рециклінгового походження, розробка рекомендацій щодо формування готових до застосування сумішей РКЗ [4, 8].

Апробація результатів дослідження. Основні результати роботи доповідались на III науково-практичній конференції, присвяченій 35-й річниці аварії на Чорнобильській АЕС «Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції» (22-23 квітня 2021 року, Київський національний університет будівництва та архітектури), XIX міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології у будівництві, цивільній інженерії та архітектурі» (19–22 вересня 2021 р., Чернігів, Україна), Всеукраїнському науково-практичному форумі «ПЕРЕМОЖЕМО – ВІДБУДУЄМО!» (29–30 червня 2022 р. м. Дніпро), науково-практичній конференції «Просування енергоефективності та підготовки фахівців для відбудови України» (13 березня 2024 р., м. Дніпро, Україна), наукових семінарах кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій ПДАБА.

Публікації. За темою дисертації у фахових виданнях України

опубліковані 4 статті. Крім цього 5 публікацій в матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій, в т.ч. 1 публікація англійською мовою.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу та п'яти розділів. Повний обсяг дисертації складає 182 сторінок та включає в себе 55 таблиць, 49 рисунків, список використаних джерел із 118 найменуваннями на 13 сторінках та 3 додатки.

РОЗДІЛ 1. ОСОБЛИВОСТІ ЗАПОВНЮВАЧІВ З ПЕРЕРОБЛЕНИХ БУДІВЕЛЬНИХ ВІДХОДІВ

На даний момент бетон залишається найпоширенішим будівельним матеріалом з тенденцією до зростання його використання [35]. Традиційно для його виготовлення в якості заповнювачів використовуються викопні природні ресурси – щебінь та пісок, частка яких у важкому бетоні сягає 80% [2, 86]. Відповідно вплив характеристик і властивостей заповнювачів є суттєвим на властивості як бетонної суміші, так і готового бетону в проєктному віці. Крупний заповнювач (щебінь, гравій), створюючи фактично каркас бетону, зменшує усадку і повзучість бетону, збільшує модуль пружності. Суміш дрібного та крупного заповнювачів дозволяє суттєво скоротити витрати в'язучих, вартості яких є найбільшими в сумарній вартості бетону.

Виробництво природних заповнювачів складається з трьох основних етапів – видобуток, подрібнення, сортування. Видобуток сировини здійснюється у розвіданих кар'єрах шляхом вибурювання та підриву вибуховою речовиною. Таким чином відбувається первинне подрібнення. Після цього гірська порода доставляється на підприємства з подрібнення, де за допомогою дробарок різних типів відбувається остаточне подрібнення до визначеного розміру. Останній етап в виробничому ланцюгу – розділення (сортування) отриманої суміші на фракції шляхом просіювання на грохотах. Після просіювання порода потрібної фракції доставляється споживачу. Як видно, між першим і другим етапом та на етапі доставки до загальних витрат на виробництво додаються витрати на транспортування.

Разом зі зростанням рівня урбанізації і, як наслідок цього, об'ємів будівництва в світі зростає і попит на бетон та його складові. З екологічної точки зору ріст виробництва бетону супроводжується значними викидами CO₂ [116]. Крім того видобуток природної сировини впливає на довкілля: руйнування середовища проживання багатьох видів фауни, вирубка лісів, ерозія верхніх шарів ґрунтів тощо.

З іншого боку розвиток будівництва сприяє зростанню об'ємів знесення старих будівель і споруд, що, в свою чергу, спричиняє появу великої кількості будівельних відходів [33]. За даними «Протоколу ЄС з поводження з відходами будівництва та знесення будівель» [62, 61] будівельні відходи складають третину всіх відходів.

Пом'якшення цього негативного впливу, а також зменшення витрат на виробництво, можна досягти, використовуючи сировину, що утворюється після переробки будівельних відходів. В даній роботі розглядаються можливість і особливості застосування крупного заповнювача рециклінгового походження (РКЗ), отриманого в результаті подрібнення бетонного брухту.

1.1. Поточний стан у сфері управління будівельними відходами в Україні

В квітні 2022-го року Міністерство розвитку громад та територій України заявило про те, що Мінрегіон спільно з Міндовкіллям та Конфедерацією будівельників України розробляють механізми утилізації та повторного використання будівельних відходів, що утворились внаслідок масових руйнувань інфраструктури, з метою не допущення екологічного лиха [63]. Мова йде про мільйони тон будівельного сміття [33].

В тому ж 2022 р. КМУ введений в дію Порядок [28], згідно з положеннями якого документація з демонтажу має розроблятися з урахуванням максимальної переробки або утилізації відходів демонтажу.

Згідно з результатами дослідження Київської школи економіки [27] станом на червень 2023 р. загальна сума прямих задокументованих збитків житловій та нежитловій інфраструктурі в результаті військових дій склала понад \$150,5 млрд (рис. 1.1). В кількісному вимірі серед іншого це становить:

– близько 167,2 тис. будівель (147,8 тис. приватних, 19,1 тис. багатоквартирних, 0,35 тис. гуртожитків);

- 630 зруйнованих чи пошкоджених адміністративних будівель;
- 718 зруйнованих чи пошкоджених амбулаторій та лікарень (без урахування приватних закладів);
- щонайменше 997 зруйнованих та 2380 пошкоджених об'єктів освітньої та наукової інфраструктури;
- пошкоджено або зруйновано щонайменше 348 релігійних об'єктів, 705 будинків культури, 82 музеї, 157 готелів та 8 спортивних стадіонів;
- суттєві пошкодження або руйнування зазнали щонайменше 2,9 тис. торговельних точок, 27 торгових центрів;
- сумарна ємність зруйнованих та пошкоджених зерносховищ складає 11,4 млн. т.;
- зруйновані 344 мостів і мостових переходів, 126 залізничних вокзалів і станцій, інфраструктура 19 аеродромів.

Прямі збитки від руйнувань та пошкоджень за секторами, \$ млрд

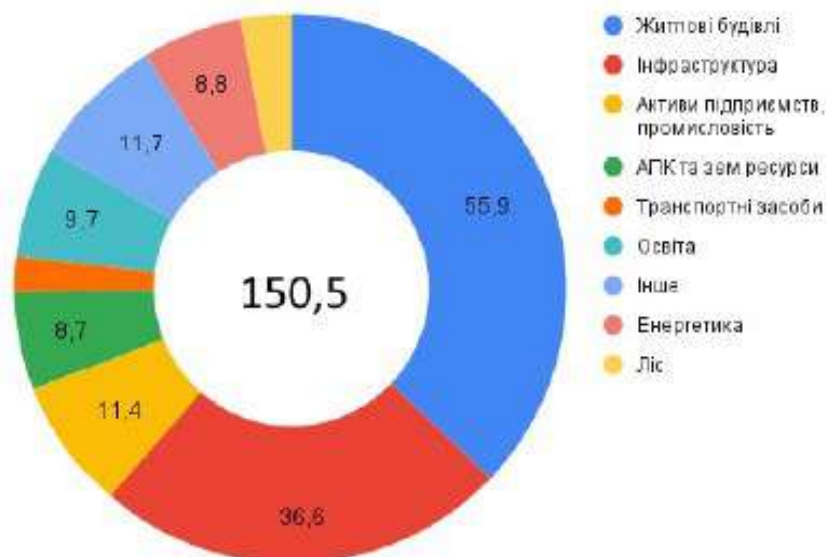


Рисунок 1.1. Діаграма прямих збитків від руйнувань та пошкоджень внаслідок воєнних дій (лютий 2022 р. – червень 2023 р) [27]

І навіть такі цифри є заниженими – фінальну оцінку обсягів руйнувань можна зробити лише після завершення бойових дій на території України (рис. 1.2, рис. 1.3).



Рисунок 1.2. Зруйнована внаслідок ракетного обстрілу сходові клітина
взуттєвої фабрики в м. Дніпро



Рисунок 1.3. Суттєво пошкоджені внаслідок влучання ракети каркас,
покриття та стінове огороження цеху одного з підприємств в
Дніпропетровській області

Але проблема будівельних відходів для України існувала і до лютого 2022 р. Наприкінці липня 2021 року уряд України затвердив Оновлений національний визначений внесок України до Паризької Угоди [41], згідно з яким актуальна кліматична мета України – скоротити до 2030 року викиди парникових газів до рівня 35% порівняно з 1990 роком.

В Україні суттєвою проблемою для оцінки поточної ситуації щодо переробки будівельних відходів є невелика кількість статистичної інформації. З тих даних, що вдалося отримати автором, можливо встановити лише приблизний обсяг будівельного лому, отриманого в результаті знесення окремих будівель. Так, наприклад, після демонтажу п'ятиповерхової «хрущовки» на чотири під'їзди утворюється близько 4,5-5 тис. т. відходів, з них 52% бетон та залізобетон, 32% кам'яні стінові матеріали [29]. За даними, наведеними в [26], щорічно в Києві на полігони вивозиться близько 300 тис. т. тільки бетонних та залізобетонних відходів. В найближчі роки обсяги будівельних відходів можуть сягнути 15-20 млн. т. на рік, з них 75-80% – бетонний (залізобетонний лом) та цегляний бій [41].

За результатами аналізу результатів 127 державних закупівель на електронному майданчику Prozorro, що були завершені та з переможцями яких були укладені угоди, встановлено, що в період 2017-2021 рр. двома департаментами м. Дніпра (благоустрою та капітального будівництва) вивезено близько 120 тис. т. будівельних відходів на загальну суму 8,5 млн грн (рис. 1.4). При цьому угодами між замовниками та надавачами послуг не були передбачені роботи з сортування та переробки відходів, а лише вивезення та захоронення на полігонах [33]. Існують розрахунки, що за поточної динаміки виведення об'єктів з експлуатації наявні полігони для будівельних відходів вичерпають себе в найближче десятиліття. Наприклад, однією з причин відмови від знесення старих «хрущовок» в м. Київ стала проблема нестачі місць захоронення будівельних відходів від знесення будівель [41].

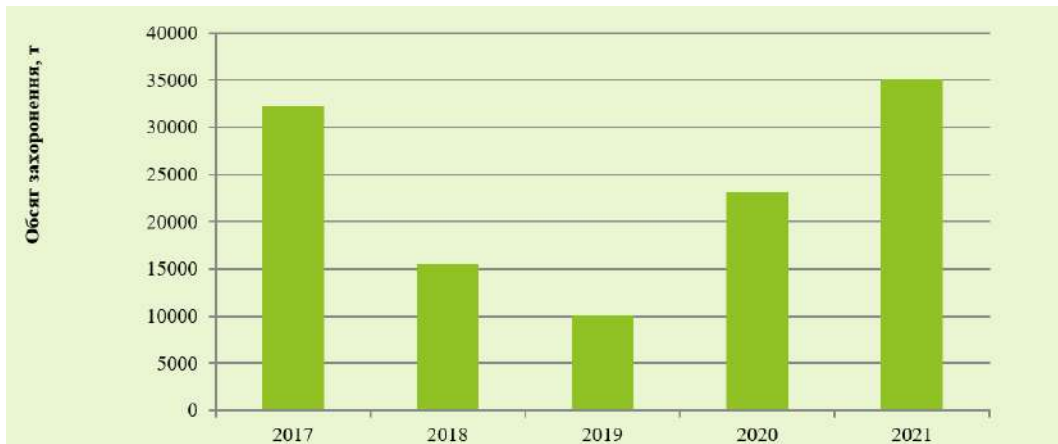


Рисунок 1.4. Обсяг захоронення відходів в 2017-2021 рр. Департаментами благоустрою та капітального будівництва в м. Дніпро (за даними Prozorro)

В місцях щільної міської забудови зведені до середини ХХ ст. будівлі, що не представляють історичної або архітектурної цінності, підлягають знесенню (рис. 1.5). На їх місці зводяться більш технологічні та сучасні будівлі, в основному більшої поверховості.



Рисунок 1.5. Демонтовані конструкції пального фундаменту в місці нової забудови, вул. 93-ї Холодноярської бригади, м. Дніпро

На сьогодні в Україні існує тенденція до скорочення життєвого циклу будівель і споруд промислового та цивільного призначення в умовах постійного росту ризиків функціонування виробництв, що викликані

відсутністю своєчасних ремонтів, відмовами, техногенними та антропогенними впливами, фізичним та моральним зносом. Сучасний стан економіки України та загальний рівень глобалізації у світі призводить до оптимізації виробництв, яка найчастіше полягає у закритті, виведенні з експлуатації та ліквідації основних фондів (рис. 1.6). Як наслідок, у складі життєвого циклу об'єктів виникає потреба в організації нового етапу, пов'язаного з демонтажем будівель і споруд. У комплекс задач, які необхідно вирішити на цьому етапі, входить розбирання (знесення, руйнування) об'єкта, сортування та переробка відходів, їх повторне застосування [41]. Різноманіття зазначених задач, очевидно, створює привабливість для інвестицій, які, в свою чергу, сприятимуть прискореному розвитку нової високо-технологічної галузі у сфері будівництва.



Рисунок 1.6. Будівля, що з 2010 року визнана аварійною та не експлуатується, підлягає списанню та демонтажу, ПрАТ «ДКХЗ», м. Кам'янське

У 2017 р. КМУ схвалено Національну стратегію управління відходами в Україні до 2030 р. На третьому етапі її реалізації (2024-2030 р.р.) передбачається здійснення заходів щодо модернізації матеріально-технічної бази суб'єктів господарювання з перероблення та утилізації відходів. Спеціальними заходами у сфері будівельно-ремонтних відходів є прийняття

нормативно-правових актів для стимулювання перероблення відходів, створення ефективної інфраструктури поводження з будівельними відходами шляхом забезпечення функціонування стаціонарних та мобільних потужностей для переробки відходів, включення планів управління відходами до проєктно-кошторисної документації [31]. Таким чином, застосування матеріалів з утилізованих будівельних відходів дозволить вирішити нагальні та майбутні економічні, юридичні та екологічні проблеми під час будівництва [33].

Найбільш ефективною виглядає технологія, згідно з якою готовий до використання РКЗ отримується на місці демонтажних робіт з подальшим використанням його при заводському виробництві бетону та залізобетонних конструкцій [6].

1.2. Світовий досвід використання подрібненого бетону в якості заповнювачів для нового бетону

Перші дослідження щодо застосування заповнювачів з бетонного брухту для виготовлення бетону в Європі (в Нідерландах) та Сполучених Штатах були проведені ще у 1977 р. В наступному десятилітті їх перші результати вже були застосовані у пілотних проєктах. Частина стін нового шлюзу Берендрехт у Бельгії була виконана з бетону, в якому в якості крупного заповнювача був використаний подрібнений бетон стін старого шлюзу (1988 р.) [33]. Під час випробувань була досягнута міцність на стиск 40 Н/мм^2 . Також позитивні результати показало використання рециклінгового щебня у внутрішніх стінових панелях декількох будинків в м. Амерсфоорт, Нідерланди, 1986 р. [51].

В подальшому рецикльований бетон регулярно застосовувався в конструкціях тротуарів, велосипедних доріжок та шосейних доріг Європи та США.

Після перших успіхів у застосуванні переробленого бетону з'явилась потреба у розробці стандартів та специфікацій, які б урегулювали можливість

його використання у конструкційних бетонах. Перші спроби розробити спеціальні рекомендації щодо застосування перероблених заповнювачів були здійснені у Данії та Нідерландах в кінці 80-х років минулого століття [33].

Станом на 2015 р. згідно з даними Європейської комісії рівень переробки будівельних відходів в країнах ЄС коливається від 0% (Греція) до майже 100% в Нідерландах та Люксембурзі. В Канаді станом на 2002 р. 73% (майже 4 млн. т.) бетонного брухту застосовувалось повторно [99]. В абсолютних цифрах щорічно повторній переробці піддаються близько 250 млн. т. бетонних та залізобетонних відходів в Євросоюзі, 300 млн. т. в США, 60 млн. т. в Японії [41].

На даний момент в країнах ЄС, Британії, США та Японії визначені області застосування рециклінгового крупного заповнювача: крупний заповнювач у бетонах 5-20 МПа при виробництві бетонних і залізобетонних виробів та крупний заповнювач у бетонах міцністю до 30 МПа при змішуванні з природним щебнем [33].

Заповнювачі з подрібненого бетону вже зараз включені у специфікації та стандарти на заповнювачі в США (з 1982 р.), Японії (1991), Великій Британії (1985), Данії (1990), Нідерландах (1995) та Канаді (1993) [70].

Федеральне управління шосейних доріг США для отримання високоякісного бетону на перероблених заповнювачах надає наступні рекомендації [114]:

- рециклінговий заповнювач не повинен містити ґрунт, асфальт та сталь. Сумарна частка натурального заповнювача та залишкового розчину має складати більше 90%;

- не можна застосовувати РКЗ з бетону конструкцій, що застосовувались в будівлях з агресивними умовами експлуатації;

- абсорбційна здатність РКЗ не повинна перевищувати 10%.

За даними ряду американських фірм, при одержанні щебня з бетону витрата палива в 8 разів менше, ніж при його видобутку в природних умовах,

а собівартість бетону на рециклінговому щебні може бути нижчою на величину до 25% [29]. Середня дистанція доставки викопних заповнювачів в США складає 80÷112 км, тоді як відстані доставки рециклінгових заповнювачів можуть бути нижчими на величину до 80% [44].

За даними компанії «ERC-TECH a.s.», Прага (Чеська Республіка), яка спеціалізується на виготовленні бетону з перероблених відходів, щорічно у світі утворюється близько 7 млрд т відходів будівництва та знесення, з них майже 2,8 млрд т є біонерозкладними (бетон, цегла, скло, сталь тощо). І лише 419 млн т будівельного сміття після відповідної переробки повторно застосовуються у будівельному виробництві [60].

Однак ряд перешкод до цього дня не дозволяють масово застосовувати рециклінговий щебінь для виготовлення конструкційних бетонів. Серед них [43]:

- відсутність однозначних технічних специфікацій та стандартів з чіткими вказівками щодо обмежень у застосуванні та нейтралізації недоліків РКЗ;
- відсутність стандартів щодо контролю за характеристиками та якістю як самого заповнювача, так і готового бетону;
- відносна дешевизна та великі розвідані запаси натурального щебня;
- відсутність юридичних та економічних стимулів.

1.3. Особливості заповнювачів з подрібненого бетонного брухту

За результатами досліджень Т. Хансена [70, 71], Z. Guo та ін. [69], S. Ismail та ін. [75], T. Ozbakkaloglu та ін. [97], Д. Педро та ін. [100], М. де Олівейри та Е. Васкез [53], М. Limbachiya та ін. [80], J. Gómez-Soberón [68], R. Sato та ін. [107] механічні властивості бетону з РКЗ можуть бути гіршими, аналогічними або кращими за бетони з природними заповнювачами в залежності від умов. Під час зазначених вище досліджень варіювалися такі параметри, як вміст РКЗ, наявність та вміст дрібної (піщаної) фракції з

подрібненого брухту, В/Ц, вміст цементуючих домішок, властивості бетону-джерела, вологість РКЗ, кількість стадій подрібнення, наявність хімічних добавок.

Для даного В/Ц та при ідентичному вмісті складових механічні властивості бетону з РКЗ є гіршими у порівнянні з бетоном на НЗ [103, 80, 112]. Відповідно міцність бетону зі 100% вмістом РКЗ в загальному випадку є нижчою порівняно з міцністю традиційного бетону [71, 112, 111, 98, 107]. Але у випадку часткового заміщення НЗ на РКЗ (20...30%) суттєвого погіршення властивостей не спостерігається [80, 50, 58]. А за умови $V/C=f(K_{РКЗ})$, де $K_{РКЗ}$ – вміст РКЗ в загальному об'ємі крупного заповнювача, можна досягнути міцність рівну або навіть вище, ніж міцність бетону на НЗ [80].

Встановлено, що через наявність менш жорсткого розчину, що приклеєний до натурального щебня, модуль пружності бетону з РКЗ завжди нижчий, а усадка і повзучість завжди вищі, ніж в бетоні з НЗ [53, 80, 82, 45, 107].

В роботах [94, 107] встановлена лінійна залежність між Ц/В і міцністю бетону з РКЗ. У зв'язку з великим водопоглинанням РКЗ Фумото і Ямада [67] запропонували додавати кількість води, що поглинута РКЗ, до загальної водопотреби бетонної суміші. За результатами їх дослідження встановлена лінійна залежність між Ц/В і міцностями на стиск і розтяг в діапазоні міцностей 30...70 МПа (в даному випадку «В» - загальна водопотреба суміші, що включає водопоглинання заповнювачів). Але такий підхід не є унікальним і адаптованим лише для бетонів на РКЗ. Врахування водопотреби будь-яких заповнювачів під час розрахунку складу бетону запропоновані в Україні як в навчальних посібниках [8], так і в нормативній документації [21]. І навпаки, якщо не враховувати поглинання води заповнювачами у випадку застосування 100% заміщення НЗ на РКЗ легкоукладальність суміші зменшується на 15...20% [112]. Рівень водопоглинання РКЗ складає 3,5...9,2%, тоді як в НЗ 0,5...5% [83].

В роботах [95, 96] вивчались міцність на згин та модуль пружності в міжфазній контактній зоні (МКЗ) між РКЗ та матрицею розчину (варіювались В/Ц, час замішування та умови тверднення). Встановлено, що більша величина В/Ц призводить до утворення на поверхні РКЗ товстої водяної плівки, як наслідок, формується пориста та слабка МКЗ. З іншого боку в результаті збільшення терміну замішування бетонної суміші міцність МКЗ збільшується, зерна цементу навколо РКЗ ущільнюються і утворюють менш пористу МКЗ. Водночас тверднення за умов високої відносної вологості (90%) призводить до поліпшення механічних властивостей МКЗ.

Щодо застосування дрібних фракцій подрібненого бетонного брухту в якості дрібного заповнювача не існує єдиної думки. Очевидно, що у фракціях менше 5 мм переважатиме вміст розчинової фази. Отже, пористість і адсорбтивні властивості такого дрібного заповнювача є більшими. Згідно з дослідженням Фінського дослідно-технічного центру [79] в залишковому розчині накопичуються хлориди і сульфати, а збільшення його вмісту в суміші заповнювачів сприяє підвищенню карбонізації. Проте в [109] стверджується, що зі збільшенням в бетоні вмісту рециклінгових заповнювачів (а отже, і залишкового розчину), глибина карбонізації зменшується.

В роботах [84, 56, 48] зазначається, що заміщення 20% піску на подрібнений дрібний заповнювач суттєво не впливає на міцність бетону. Dhir та ін. в [56] дослідили вплив дрібного заповнювача з подрібненого бетону на міцність. Виготовлялись та випробувались зразки з трьох сумішей: на натуральних заповнювачах, 100% РКЗ та натуральний пісок, 100% РКЗ та 50% дрібного заповнювача з відходів і 50% природного піску. Зниження міцності бетону з РКЗ та натуральним піском порівняно з бетоном на природних заповнювачах знаходилось в межах 6...18%. При заміщенні 50% натурального піску отримана міцність на 15...20% нижче.

Бетон є неоднорідним композитним матеріалом, механічні властивості якого визначаються взаємодією його складових. В загальному випадку

заповнювачі займають 60-80% загального об'єму бетону і значна частина цього об'єму – це крупний заповнювач. В мезоскопічній моделі бетон з натуральним заповнювачем представлений у вигляді двофазної системи, що складається з крупного заповнювача та матриці розчину, які зв'язані шаром МКЗ по межі крупного заповнювача. РКЗ отримується шляхом подрібнення та переробки використаного бетону. Таким чином, перероблений заповнювач складається з двох головних фаз – натурального заповнювача (*original virgin aggregate*) та залишкового розчину (*residual mortar* або *adhered mortar*). Відповідно бетон з РКЗ є більш складною системою [33] через наявність додаткових фаз (залишкового розчину та граничної зони між ним і натуральним заповнювачем) та однієї видозміненої (МКЗ між новим розчином та РКЗ) (рис. 1.7).

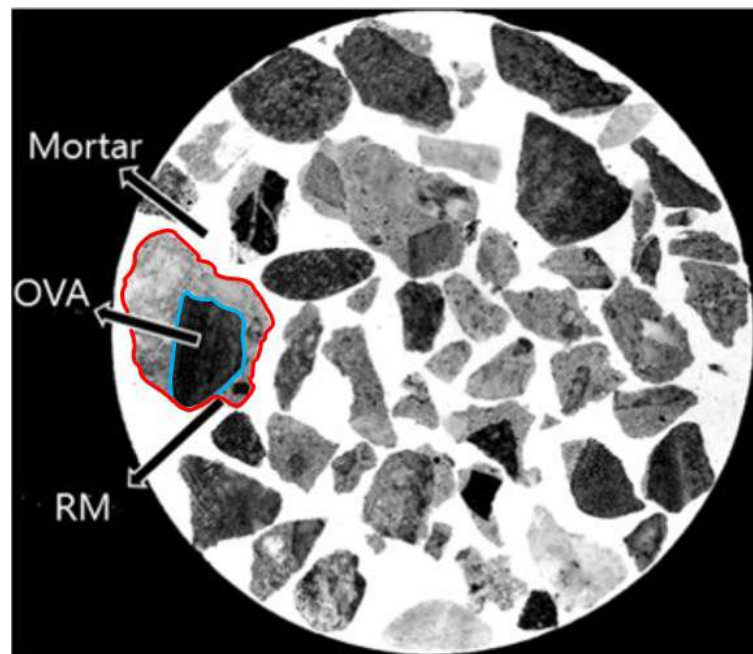


Рисунок 1.7. Мезоскопічна модель бетону з РКЗ [118]: OVA – натуральний заповнювач; RM – залишковий розчин; Mortar – новий розчин; червона лінія – МКЗ між РКЗ та новим розчином; синя лінія – МКЗ між натуральним заповнювачем та залишковим розчином.

За результатами аналізу міцності [48, 117, 113, 106] встановлена залежність механічних характеристик бетону з рециклінговим заповнювачем від характеристик бетону, який піддавався подрібненню для отримання РКЗ. Зазначається, що на властивості бетону з РКЗ мають вплив В/Ц, міцність та тип заповнювачів бетону-джерела. В [55] стверджується, що РКЗ, отриманий з високоякісного бетону не потребує додаткових процедур з підвищення якості.

Для досягнення максимальної міцності бетону з РКЗ В/Ц нового розчину має бути рівним або меншим В/Ц залишкового розчину. Іншими словами міцність нового розчину має бути вище міцності залишкового розчину [70, 71]. В роботі [105] для вивчення цього питання застосовувався РКЗ з різними міцностями та вмістом залишкового розчину та варіювалося В/Ц нового розчину. Результати показали, що міцність бетону з РКЗ залежить від якості МКЗ між РКЗ та новим розчином у випадку, коли МКЗ між натуральним заповнювачем та залишковим розчином вище. І навпаки, за умови кращої якості МКЗ між новим розчином і РКЗ визначальною для міцності бетону була якість МКЗ між залишковим розчином і натуральним щебнем. Очевидно, що якість перехідної зони всередині РКЗ можливо оцінити лише у випадку випробування бетону-джерела на міцність до його подрібнення.

МКЗ є з'єднувальною ланкою між розчином та зернами крупного заповнювача і фактично визначає міцність бетону, тобто руйнування МКЗ може призвести до руйнування бетону під дією напружень, що суттєво менші, ніж міцності заповнювача або матриці розчину. Навіть якщо кожна складова має високу міцність, міцність бетону може бути низькою через розірвані зв'язки в МКЗ (наявність порожнин, мікротріщин). Крім того на кінцях тріщин можуть виникати концентратори напружень [102].

Але бетон-джерело важко піддається контролю. Зазвичай одразу після подрібнення та сортування будівельних відходів бетонні брили різного походження складуються та відправляються на подальше подрібнення разом. З цієї причини порівняння та оцінка результатів досліджень різних вчених з

різних країн та періодів суттєво ускладнюється, оскільки очевидно, що в кожному досліді подрібнювався бетон з невизначеними походженням, складом, міцністю тощо. Більше того, в більшості досліджень подрібнений бетон виготовлявся в лабораторних умовах і підлягав твердненню протягом відомого проміжку часу. В промислових умовах навіть у випадку сталого технологічного процесу подрібнення і сортування неможливо забезпечити у великій кількості виробництво РКЗ заданої якості через різноманіття походження брухту, що поставляється на підприємства і підлягає подрібненню.

В цьому контексті більш важливим є не контроль властивостей бетону-джерела, а ретельне подрібнення, фракціонування та визначення достовірних характеристик щебеню, що утворився з подрібненого бетонного брухту.

Так, Батлер і Машаду у 2005 р. [50] та де Бріто і Сілва у 2015 р. [108] дійшли висновків, що за умови використання якісного та добре відсортованого переробленого заповнювача в бетонах нормальної міцності (з В/Ц від 0,45 до 0,5 та $f_c \approx 31$ МПа) суттєві погіршення характеристик бетону не спостерігаються. До цього ж висновку щодо позитивного впливу якісного фракціонування та сортування заповнювача приходять і Річардсон та ін. [104]. В їх дослідженні у 2009 р. зменшення міцності бетону з невідсортованим РКЗ сягає 53% порівняно з традиційним бетоном. Проте критерії якісного сортування в зазначених роботах не наведені. В цьому контексті необхідно зазначити, що в українському стандарті на проектування складу важкого бетону [21] під час розрахунку В/Ц (Ц/В) важкого бетону застосовується коефіцієнт A , який враховує якість заповнювачів, при цьому критерії віднесення заповнювачів до тієї чи іншої категорії якості також не наведені.

В 2013 р. Губерт Чанг та ін. з Університету Колумбії, м. Нью-Йорк, в своїй роботі [52] вивчали можливість виготовлення високоміцного бетону з заповнювача низької міцності. Отримання бетону-джерела поганої якості досягалося покроковим збільшенням водо-цементно співвідношення як за

рахунок збільшення частки води, так і за рахунок зменшення вмісту цементу. Аналіз результатів випробувань зразків на стиск показав, що вплив В/Ц бетону-джерела на міцність бетону з РКЗ виявився не суттєвим. Таким чином за результатами дослідження авторами зроблені висновки про те, що якість РКЗ не є настільки важливою, як В/Ц в бетоні з РКЗ. Автори стверджують, що більш високе В/Ц бетону з РКЗ необхідно через більшу пористість залишкового розчину порівняно з натуральним заповнювачем. Внаслідок абсорбції, яка у РКЗ в 3-4 рази вища, надлишкова вода поглинається РКЗ, що в свою чергу призводить до погіршення легкоукладальності бетонної суміші.

Наявність більш пористої складової в крупному заповнювачі – залишкового розчину – сприяє збільшенню абсорбційної властивості заповнювача, що, в свою чергу, вимагає збільшення водо-цементного співвідношення в бетоні з таким заповнювачем або використання добавок. Очевидно, що з цієї точки зору вологість РКЗ є важливим параметром, який впливає на властивості бетонної суміші і готового бетону. Оптимальний вологісний стан пористих заповнювачів – заповнені водою внутрішні пори та суха поверхня. Merlet та Remienta в роботі [84] змогли покращити механічні властивості бетону з РКЗ, попередньо просочивши РКЗ 30% води замішування. Але згідно з [102] перенасиченість пор залишкового розчину водою може призвести до її витікання в матрицю розчин, таким чином, локально збільшуючи В/Ц в МКЗ між РКЗ та новим розчином та знижуючи загальну міцність бетону.

Виявлено, що в довготривалому вимірі пористість рециклінгового заповнювача знижується швидше, ніж в натурального заповнювача. В період від 28 днів до 5 років можливе зниження пористості на 45%, тоді як для бетону з натуральним заповнювачем величина зменшення складає близько 7%. Це пов'язано з ефектом самоцементування (догідратацією) старого розчину та його взаємодією з новою цементною пастою [78].

Крім цього, наявність залишкового розчину позитивно впливає на повзучість та усадку бетонних сумішей з РКЗ. Фатіфазль та ін. у своїх

роботах [64, 65] дійшли висновків, що за правильного розрахунку складу бетону з РКЗ можна навіть зменшити повзучість та ймовірність виникнення усадочних тріщин.

Ігнатович та інші у своїй роботі [74] досліджували роботу залізобетонних балок на зсув з використанням 50% та 100% РКЗ. Отримані результати показали однакову поведінку з балками на натуральному заповнювачі за однакового протизсувного армування.

В дослідженні [82] на основі вивчення та аналізу 393 наукових праць, опублікованих з 1977 р., були зроблені висновки, що використання РКЗ в бетоні знижує його модуль пружності. Рівень зниження залежить від вмісту РКЗ (в середньому на 16% при 100% вмісту РКЗ) та його властивостей, а також від В/Ц.

Отримані результати добре корелюють з результатами Адамса та ін. в манускрипті [76]. В цій роботі автори запропонували алгоритм побудови двовимірної моделі випадкових систем заповнювачів з урахуванням морфологічних характеристик частинок РКЗ. Дана модель дозволила врахувати складність, неоднорідність та геометричну недосконалість РКЗ і, таким чином, максимально наблизитись до реальної структури бетону з РКЗ. Для вивчення механічних властивостей бетону з РКЗ були згенеровані 12 чисельних моделей, що відрізнялися формою, максимальним розміром заповнювача, вмістом залишкового розчину, та відношенням сумарної площі перерізу РКЗ до площі перерізу моделі. Вказані моделі піддавались одновісьовому стисненню, яке моделювалось шляхом покрокового прикладання деформацій до верхніх вузлів елементів сітки бетонного перерізу з кроком 10 мкм до моменту руйнування системи. Найвищий модуль пружності був отриманий для моделі з найбільшою крупністю фракції РКЗ, в перерізі якої площа заповнювача була максимально зайнята натуральним заповнювачем. І навпаки, найменший модуль пружності був отриманий для моделі з найвищим рівнем вмісту залишкового розчину.

У звітах Фінського дослідно-технічного центру [79] та Бюро рекультивачії Міністерства внутрішніх справ США [81] за результатами декількох десятків досліджень з 2002 р. по 2017 р. узагальнені особливості РКЗ та бетонів з їх використанням:

- водопоглинання в загальному випадку у 4-10 разів вище, ніж в бетонах на натуральних заповнювачах. Це пов'язано з наявністю в заповнювачі більш пористого залишкового розчину;

- використання рециклінгових дрібних заповнювачів є небажаними;

- суттєвий вплив на механічні характеристики бетонів з РКЗ має вміст залишкового розчину та наявність міжфазної контактної зони між цементною пастою та залишковим розчином;

- заміна 20-30% натурального заповнювача добре переробленим та відсортованим РКЗ не призводить до суттєвого зменшення міцності на стиск;

- модуль пружності бетонів з РКЗ зменшується разом зі збільшенням частки РКЗ;

- за однакового В/Ц проникність хлоридів та карбонізація в бетонах з РКЗ вищі;

- отримати морозостійкий бетон з РКЗ можливо лише за умови, що РКЗ походить з морозостійкого бетону.

В цілому застосування переробки бетонного брухту в нових матеріалах та конструкціях має наступні суттєві переваги:

- застосування більш дешевого заповнювача в конструкціях з відсутніми високими вимогами до якості заповнювачів;

- скорочення потреби в полігонах для захоронення будівельного сміття;

- скорочення потреби у використанні землі під влаштування кар'єрів;

- збереження існуючих джерел натуральних заповнювачів;

- збереження енергії завдяки скороченню потреби в транспортуванні матеріалів, зменшення навантаження на дороги;

- суттєва економія при зведенні якісних конструкцій.

Проте виникає проблема коректного розрахунку складу бетону. Наявність залишкового розчину в РКЗ не дозволяє ним нехтувати під час проєктування та прогнозування властивостей бетонної суміші та готового бетону. Для врахування впливу менш жорсткого залишкового розчину на характеристики РКЗ та бетону з РКЗ в роботі [54] запропонований метод визначення вмісту залишкового розчину. Суть методу зводиться до відділення залишкового розчину від натурального щебеню шляхом комбінованої дії декількох циклів заморожування та відтанення зразків РКЗ та просочування їх в розчині сульфату натрію. Отримавши вміст залишкового розчину та визначивши густину натурального щебня в РКЗ, можна отримати фактичну середню густину зерен РКЗ. Крім цього авторами запропоновано розглядати РКЗ у складі бетонної суміші пофазно, тобто вважати натуральний щебінь у складі РКЗ крупним заповнювачем, а залишковий розчин – частиною всієї матриці розчину нового бетону. Такий підхід є досить трудомістким, але дозволяє врахувати особливості РКЗ під час проєктування складу бетону. Необхідно зазначити, що тривалість випробування складала 7 діб [32].

Ці ж автори запропонували й інший метод визначення вмісту залишкового розчину, заснований на комп'ютерній обробці та аналізі серій контрастних зображень спилів зразків бетону з РКЗ на білому цементі з подальшим аналізом зображень [48]. Більш сучасний метод, заснований на побудові 3D-моделі РКЗ за технологією рентгенівської комп'ютерної томографії, запропонований в [72].

1.4. Вплив методів подрібнення на властивості РКЗ

Як зазначалося раніше, через гірші фізичні властивості розчину порівняно з натуральним щебнем, високий вміст залишкового розчину призводить до зниження якості РКЗ і відповідно бетону з нього. Тому будь-яка спроба зменшити його вміст призведе до покращення характеристик РКЗ. Очевидно, що вміст залишкового розчину визначається на етапі подрібнення.

Тобто фактично під час подрібнення визначаються такі характеристики РКЗ як водопоглинання, насипна та середня густина зерен, модуль пружності [101].

В дослідженні [85] вивчались мікроструктурні зміни кожної фази РКЗ, що відбувались під час подрібнення. Процес подрібнення включав в себе крупне подрібнення в щоківій та роторній дробарках з подальшим подвійним дрібним подрібненням (до 30 мм) матеріалу на механічному подрібнювальному обладнанні для мінімізації вмісту залишкового розчину. В результаті цього двоетапного процесу зафіксоване значне зменшення ступеня розтріскування частинок природного заповнювача в РКЗ. Пошкодження залишкового розчину та МКЗ також були незначними.

Де Бріто та ін. з Університету Лісабона в 2015 р. досліджували вплив методів подрібнення відходів виробництва збірного залізобетону на характеристики бетону з РКЗ [101]. Було розглянуто два методи подрібнення:

- первинне подрібнення щоківими дробарками;
- первинне подрібнення щоківими дробарками з подальшим подрібненням із застосуванням молоткових дробарок.

За результатами дослідження встановлено, що у випадку застосування лише первинного подрібнення щоківими дробарками частки мають більш пряму та кутасту форму, що сприяє збільшенню В/Ц. А із застосуванням подвійного подрібнення механічні характеристики переробленого заповнювача є кращими.

На думку авторів процес подрібнення не має суттєвого впливу на модуль пружності бетону з РКЗ, оскільки модуль пружності визначається лише жорсткістю заповнювачів, яка не змінюється під час подрібнення. Ці висновки в деякій мірі протирічать висновкам Адамса та ін., викладеним у [76]. Як зазначалося вище, за даними Адамса модуль пружності обернено пропорційний вмісту залишкового розчину, який саме і визначається методом подрібнення.

Подвійне подрібнення дозволяє знизити пористість РКЗ і, таким чином, зменшити абсорбтивні властивості зерен, як капілярні, так і під час занурення. Також пористість РКЗ прямим чином впливає на швидкість карбонізації та проникнення хлоридів [57].

І навіть після додаткового подрібнення чи здійснення інших заходів щодо зменшення вмісту залишкового розчину, він залишається на зернах крупного заповнювача. А отже, його властивості необхідно враховувати під час розрахунку складу бетону з використанням РКЗ.

1.5. Розрахунково-експериментальний метод розрахунку складу бетону та можливість його застосування для розрахунку складу бетону з РКЗ

В Україні питання раціонального розрахунку складу важких бетонів з заданими характеристиками та властивостями досліджували Вознесенський В. А., Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Рунова Р. Ф., Кривенко П. В., Плугін А. А., Дібров Г. Д., Нікіфоров О. П., Пунагін В. М., Саницький М. А., Сторожук М. А., Гоц В. І., Файнер М. Ш., Шмигальський В. Н., Глуховський В. Д., Пахомов В. А., Шейніч Л. О. та ін. В їх роботах аналізувались теоретичні та експериментальні дані зарубіжних дослідників, пропонувались власні підходи та розробки, встановлювались граничні обмеження. Але найбільш розповсюдженим залишається розрахунково-експериментальний метод розрахунку складу важкого бетону різних класів міцності та з іншими властивостями, який покладений в основу національних стандартів [14] та [21].

На основі зазначеного методу можливе вирішення одно-, дво- та багатопараметричних задач [8, 7].

Для однопараметричних задач кількісно задається лише один цільовий параметр, зазвичай міцність. Для всіх інших параметрів вказуються тільки якісні вимоги. Багатопараметричні задачі в основному виникають в процесі

розрахунку складів спеціальних бетонів: гідротехнічного, сульфатостійкого, дорожнього тощо.

Найбільш розповсюдженими є двопараметричні задачі, під час розв'язання яких задаються міцністю бетону при стиску f_{cm} та показником легкоукладальності бетонної суміші (ОК або Ж).

Суть методу полягає в тому, що об'єм всієї суміші рівний сумі об'ємів компонентів цієї суміші. Оскільки розрахунок складу ведеться на 1 м^3 суміші, то цю умову можна представити як:

$$V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n = 1, \quad (1.1)$$

де V_i – об'єм i -го компоненту бетонної суміші.

В такому випадку задача розрахунку складу бетонної суміші зводиться до визначення вмісту $n-1$ компонентів [8].

Важливим чинником, що впливає на точність розрахунку, є відповідність складових бетонної суміші встановленим вимогам, а також достовірне визначення їх кількісних характеристик. Нормативні вимоги до якості компонентів та до методів визначення їх властивостей наведені в розділі 6 [21].

В загальному випадку послідовність визначення складу бетону наведена нижче.

1.5.1. Визначення водо-цементного (цементно-водного) співвідношення

У випадку, коли одним із заданих параметрів є міцність, або інша властивість, однозначно пов'язана з міцністю, на першому кроці визначається В/Ц (Ц/В). За умови проєктування бетону в умовах нормального тверднення, без мінеральних та інших добавок застосовуються наступні формули:

$$\begin{aligned} \text{при } \text{В/Ц} \geq 0,4 \quad \text{В/Ц} &= \frac{AR_{\text{ц}}}{f_{cm} + 0,5AR_{\text{ц}}} \\ \text{при } \text{В/Ц} < 0,4 \quad \text{В/Ц} &= \frac{A_1R_{\text{ц}}}{f_{cm} - 0,5A_1R_{\text{ц}}} \end{aligned} \quad (1.2)$$

де A, A_1 – коефіцієнти, що визначаються якістю заповнювачів;

R_y – активність цементу, МПа;

f_{cm} – середня міцність бетону для даного класу, МПа;

V та C – масові витрати відповідно води та цементу.

В розділі 8 [21] пропонується приймати коефіцієнт A (A_1) за наступними показниками якості заповнювачів: високоякісні, рядові або зниженої якості. Але при цьому критерії віднесення заповнювачів до будь-якої з груп не наведені. В цьому ж стандарті в розділі 10 можливе визначення коефіцієнта A (A_1) в залежності від чистоти заповнювачів з наступним його коригуванням шляхом додавання алгебраїчної суми поправок. Вказані поправки базуються на показниках, що наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1.

Поправки коефіцієнта A (A_1)

Показник для визначення поправок	Поправка
За рухомістю (жорсткістю бетонної суміші (ОК або Ж))	$\pm \Delta A_1$
За модулем крупності піску M_k	$\pm \Delta A_2$
За НГЦТ	$\pm \Delta A_3$
За найбільшою крупністю щебня	$\pm \Delta A_4$
За цементно-водним співвідношенням	$-\Delta A_5$
За відношенням міцності кам'яної породи до міцності бетону	$-\Delta A_6$

Тобто в загальному випадку:

$$A = A_0 + \sum \Delta A_i, \quad (1.3)$$

де A_0 – базове значення коефіцієнту A (A_1) за табл. 10.1 [21] в залежності від вмісту глини, пилу та мулу в заповнювачах.

Для визначення відповідних поправок застосовується графік, наведений на рис. 1.8.

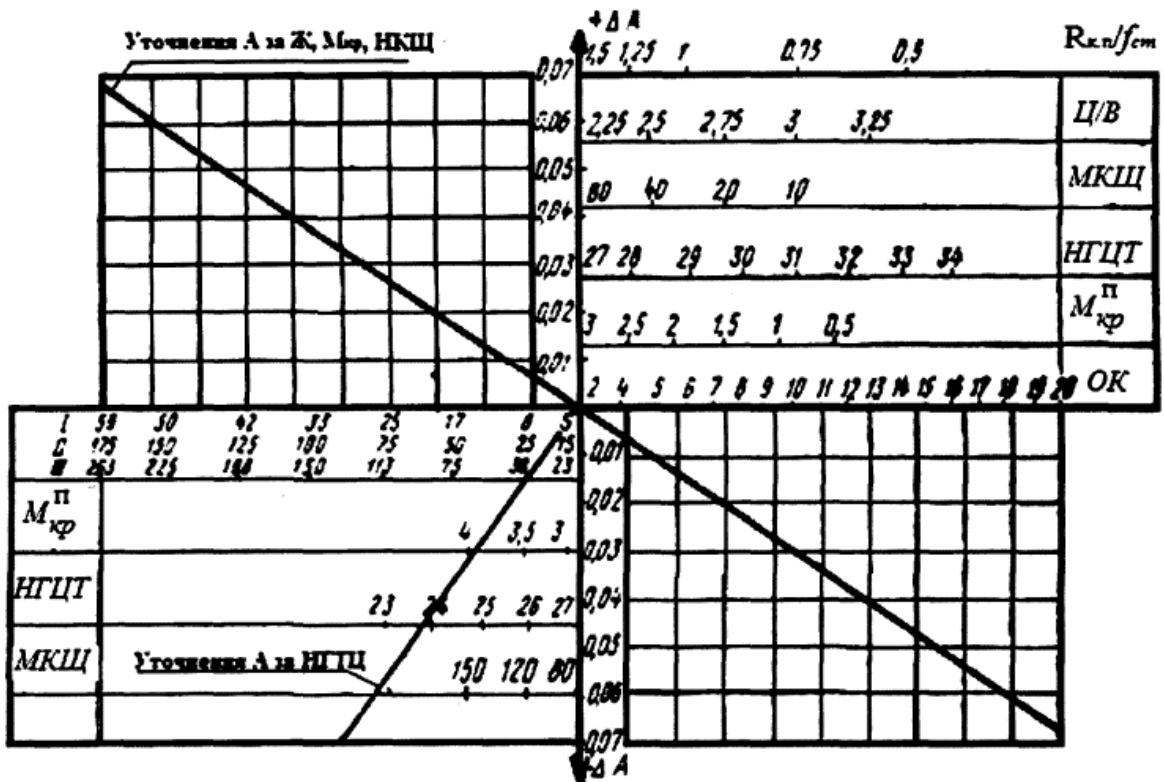


Рисунок 1.8. Графік для уточнення коефіцієнту А (A_1) згідно з [21]

Як зазначалось в п. 1.3, наявність РКЗ зазвичай призводить до погіршення міцнісних характеристик бетону. Враховуючи, що існує пряма залежність між Ц/В та міцністю бетону, очевидно, що при розрахунку В/Ц (Ц/В) необхідно враховувати факт наявності в бетонній суміші РКЗ. Доцільно припустити, що оскільки A (A_1) визначається якістю заповнювачів, В/Ц (Ц/В) бетону з РКЗ має враховувати деяку поправку на наявність РКЗ. В цьому контексті недоцільно застосовувати поправку $-A_6$ (за відношенням міцності крупного заповнювача до міцності бетону, див. табл. 1.1), оскільки міцність РКЗ фактично і є однією з характерних властивостей РКЗ.

1.5.2. Визначення водопотреби бетонної суміші

Водопотреба однозначно пов'язана з другим параметром двопараметричної задачі – легкоукладальністю (консистенцією) бетонної суміші.

В загальному випадку мінімальна водопотреба бетонної суміші складається з води на замішування цементу та водопотреби заповнювачів.

Дворкін Л. Й. та ін. в роботах [8, 4] наводять декілька емпіричних залежностей для визначення водопотреби бетонної суміші, які були виведені в різні часи. Більшість з наведених формул або мають суттєві обмеження (наприклад, вузький діапазон ОК), або передбачають наявність параметрів, значення яких на етапі розрахунку складу бетонної суміші встановити важко або неможливо (фактично пропонується застосовувати метод послідовних наближень).

Найбільш точними та зручними у використанні вбачаються дві залежності, які можливо застосовувати в широких діапазонах вхідних параметрів:

$$V_0 = 60 + 4OK + 0,07S_{щ} + 5V_{п} + 1,5HГЦТ \quad (1.4)$$

$$V_0 = 179 - 0,8D_{щ} + 6,4OK + 0,0029D_{щ}^2 - 0,14OK^2 \quad (1.5)$$

де $S_{щ}$ – питома поверхня крупного заповнювача, m^2/m^3 ;

$V_{п}$ – водопотреба дрібного заповнювача;

$D_{щ}$ – найбільша крупність щебня, мм.

Дворкін Л. Й. вважає, що застосування формули (1.4) є невиправданим через наявність різних параметрів, що характеризують водопотребу дрібного та крупного заповнювачів [4]. В той же час в формулі (1.5) відсутні параметри, які могли б характеризувати походження крупного заповнювача (тобто, в даному контексті, особливостей РКЗ).

Але в цих же роботах [8, 4], а також в [21] надані ряд поправок, якими необхідно уточнити водопотребу бетонної суміші V_0 . Показники для визначення цих поправок наведені в табл. 1.2, діапазони значень поправок – в табл. 10.4 [21].

Таблиця 1.2.

Поправки до витрати води

Показник для визначення поправок	Поправка
За походженням щебня	ΔV_1

Продовження таблиці 1.2

Показник для визначення поправок	Поправка
За формою зерен	ΔB_2
За модулем крупності піску	ΔB_3
За шорсткістю заповнювачів	ΔB_4
За НГЦТ	ΔB_5
За витратою цементу	ΔB_6
За наявністю промитих заповнювачів	ΔB_7
За вмістом в щебні мулу та пилу більше, ніж 1%, і часток, менше ніж 5 мм, більше ніж 5%	ΔB_8
За вмістом в піску мулу та пилу більше, ніж 3%	ΔB_9

Отже, для розрахунку водопотреби бетонної суміші з РКЗ доцільно застосовувати формулу (1.5), та уточнювати її шляхом застосування деякої поправки ΔB_1 , яка характеризує саме РКЗ.

Тобто остаточно водопотреба бетонної суміші визначається за формулою:

$$B = B_0 + \sum \Delta B_i, \quad (1.6)$$

де $\sum \Delta B_i$ – алгебраїчна сума поправок до витрат води

Визначивши витрату води та B/C витрата цементу C , кг визначається за формулою:

$$C = \frac{B}{B/C} \quad (1.7)$$

Після визначення витрат цементу C та води B для звичайної чотирикомпонентної бетонної суміші визначаються абсолютні об'єми цементного тіста $V_{ц.т.}$ та заповнювачів V_a :

$$V_{ц.т.} = B + \frac{C}{\rho_c} \quad (1.8)$$

$$V_a = 1000 - V_{ц.т.} \quad (1.9)$$

1.5.3. Визначення вмісту заповнювачів

Як зазначалося в п. 1.3 єдиної думки щодо застосування подрібненого бетонного брухту в якості дрібного заповнювача не існує. В рамках даної роботи для виготовлення бетону з використанням продуктів рециклінгу будівельних відходів застосовувався традиційний пісок в якості дрібного заповнювача та РКЗ в якості крупного заповнювача.

На масовий вміст заповнювачів в бетонній суміші впливає їх зерновий склад і порожнистість (яка в свою чергу залежить від насипної густини та середньої густини зерен). Для забезпечення мінімальної витрати цементу необхідно забезпечити мінімальну порожнистість (максимальну щільність упаковки зерен заповнювачів) при найменшій площі поверхні заповнювачів [4]. З цією метою більшість фахівців віддають перевагу безперервному зерновому складу заповнювачів – тобто розмір кожної наступної фракції має бути в два рази більший за попередній. Такий підхід дозволяє зменшити об'єм дрібних фракцій і, як наслідок, кількість цементного тіста, необхідного на обмазку поверхні зерен заповнювачів.

Фуллером [66] та Гуммелем [73] запропоновані залежності для визначення оптимального зернового складу заповнювачів, але для їх застосування необхідно забезпечення умови рівності густин кожної фракції.

Зазвичай оптимальне співвідношення між фракціями встановлюють або за рекомендаціями, наведеними в нормативній або довідковій літературі, або визначають дослідним шляхом на основі підбору комбінацій, що забезпечують найбільшу насипну густину і мінімальну порожнистість.

На величини порожнистості та питомої площі поверхні заповнювачів, крім зернового складу, впливає також співвідношення в бетонній суміші крупного та дрібного заповнювачів. Один з підходів для визначення вмісту одного з видів заповнювачів заснований на визначенні об'ємної частки дрібного заповнювача в суміші заповнювачів:

$$r = \frac{\Pi/\rho_3^{\text{ДЗ}}}{\Pi/\rho_3^{\text{ДЗ}} + \text{Щ}/\rho_3^{\text{КЗ}}}, \quad (1.10)$$

де Π , Щ – масові витрати відповідно піску та щебня;

$\rho_3^{\text{КЗ}}, \rho_3^{\text{ДЗ}}$ – середні густини зерен відповідно крупного та дрібного заповнювачів.

Для натуральних заповнювачів зазвичай $\rho_3^{\text{КЗ}} \approx \rho_3^{\text{ДЗ}}$, тоді формулу (1.10) можна представити як:

$$r = \frac{\Pi}{\Pi + \text{Щ}}, \quad (1.11)$$

Але у випадку застосування РКЗ через наявність залишкового розчину очевидно, що $\rho_3^{\text{КЗ}} \neq \rho_3^{\text{ДЗ}}$. Тоді необхідне застосування саме співвідношення (1.10).

Дворкін Л. Й. в [8] пропонує рекомендовані орієнтовні значення частки дрібного заповнювача r в залежності від витрати цементу, максимальної крупності зерен крупного заповнювача, модуля крупності піску та виду крупного заповнювача (щебінь або гравій). Виникає питання щодо справедливості застосування цих емпіричних значень у випадку застосування РКЗ.

Іншим підходом до розв'язання задачі визначення вмісту заповнювачів є використання коефіцієнту розсуву зерен крупного заповнювача цементно-піщаним розчином α . Такий підхід виходить з допущення, що цементно-піщаний розчин заповнює порожнини крупного заповнювача, а також деяким чином розсуває його зерна для забезпечення повної обмазки їх поверхонь:

$$\frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{\text{В}}{\rho_{\text{в}}} + \frac{\Pi}{\rho_3^{\text{ДЗ}}} = \alpha V_{\text{п}}^{\text{КЗ}} \frac{\text{Щ}}{\rho_{\text{н}}^{\text{КЗ}}}, \quad (1.12)$$

де $\rho_{\text{ц}}, \rho_{\text{в}}$ – густина цементу та води відповідно;

$\rho_{\text{н}}^{\text{КЗ}}$ – насипна густина крупного заповнювача;

$V_{\text{п}}^{\text{КЗ}}$ – порожнистість крупного заповнювача.

Якщо для чотирикомпонентної бетонної суміші рівняння (1.1) представити у вигляді:

$$\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{В}{\rho_{в}} + \frac{П}{\rho_{з}^{ДЗ}} + \frac{Щ}{\rho_{з}^{КЗ}} = 1000, \quad (1.13)$$

і після цього розв'язати систему рівнянь (1.12) та (1.13), то витрата крупного заповнювача становить:

$$Щ = \frac{\rho_{н}^{КЗ} \cdot 1000}{1 + V_{п}^{КЗ}(\alpha - 1)} \quad (1.14)$$

В національному стандарті [21] для визначення коефіцієнта α бетонних сумішей для звичайних конструкцій запропонована номограма в залежності від порожнистостей дрібного та крупного заповнювачів (рис. 1.9).

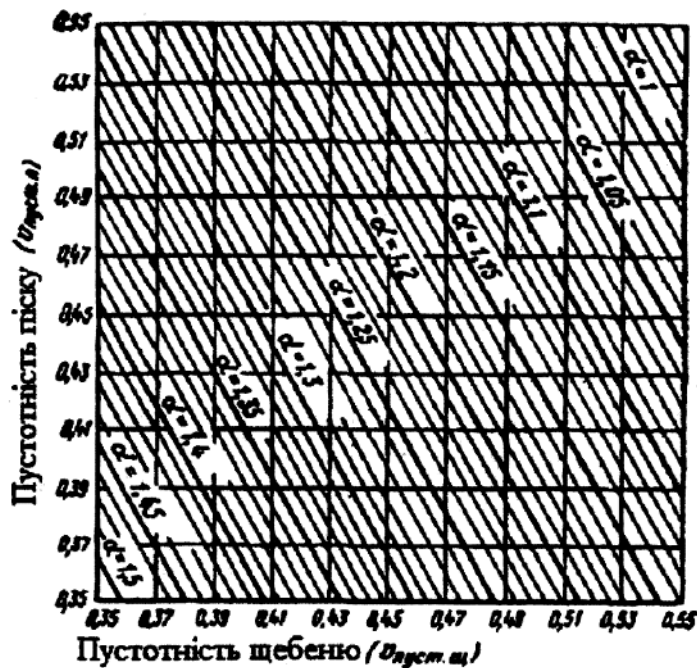
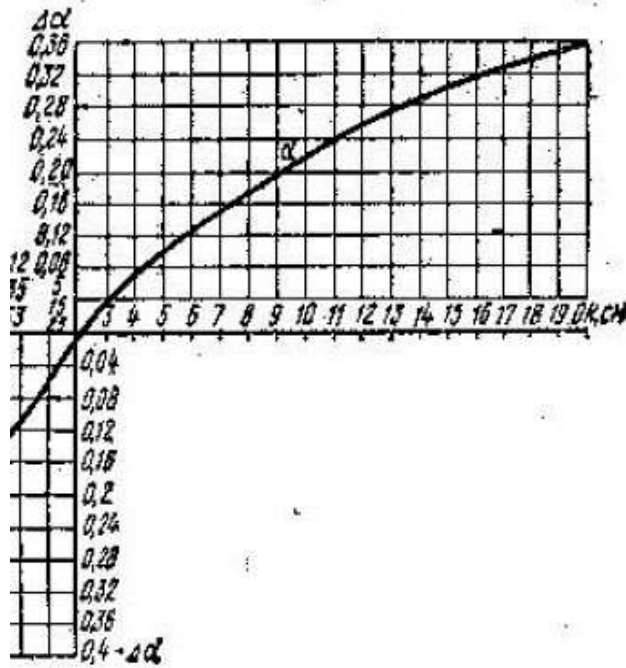
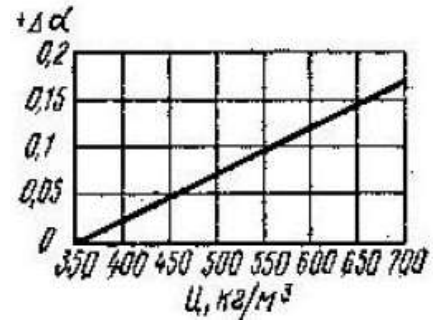


Рисунок 1.9. Номограма для визначення коефіцієнта α

Номограма на рис. 1.9 наведена для рухливості бетонної суміші 2 см, жорсткості 5 с та витраті цементу 350 кг на 1 м³ бетонної суміші. За інших консистенції та вмісту цементу вносяться відповідні поправки, які можна визначити за графіками на рис. 1.10.



а



б

Рисунок 1.10. Графіки для уточнення коефіцієнту α : а – в залежності від рухливості бетонної суміші; б – при витраті цементу більше, ніж 350 кг/м^3

Тоді з урахуванням поправок формула (1.14) прийме вигляд:

$$\text{Щ} = \frac{\rho_{\text{н}}^{\text{КЗ}} \cdot 1000}{1 + V_{\text{н}}^{\text{КЗ}}(\alpha + \Delta\alpha_{\text{OK}} + \Delta\alpha_{\text{Ц}} - 1)}, \quad (1.15)$$

де $\Delta\alpha_{\text{OK}}$ – поправка згідно з рис. 1.10, а;

$\Delta\alpha_{\text{Ц}}$ – поправка згідно з рис. 1.10, б.

У випадку застосування РКЗ в якості крупного заповнювача більш доцільно застосовувати саме коефіцієнт розсуву зерен, оскільки для його визначення та подальшого визначення вмісту крупного заповнювача Щ використовуються безпосередні характеристики РКЗ, які з високою достовірністю можна визначити для кожної конкретної суміші РКЗ під час випробувань крупного заповнювача.

Отже, на даному етапі вирішена задача щодо визначення вмісту трьох компонентів чотирикомпонентної суміші. Тоді вміст останньої складової – дрібного заповнювача – визначається наступним чином:

$$\Pi = \left(V_a - \frac{\text{Щ}}{\rho_{\text{щ}}} \right) \rho_{\text{з}}^{\text{ДЗ}} \quad (1.16)$$

1.5.4. Визначення розрахункової густини бетонної суміші та абсолютного об'єму матеріалів

Розрахункова середня густина бетонної суміші $\rho_{\text{б.с.}}^{\text{T}}$, кг/м³, та абсолютний об'єм матеріалів $V_{\text{м}}$, л, визначаються відповідно за формулами (1.17) та (1.18):

$$\rho_{\text{б.с.}}^{\text{T}} = \text{В} + \text{Ц} + \text{П} + \text{Щ} \quad (1.17)$$

$$V_{\text{м}} = \text{В} + \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{\text{П}}{\rho_{\text{з}}^{\text{ДЗ}}} + \frac{\text{Щ}}{\rho_{\text{щ}}} \quad (1.18)$$

Після цього виконується пробний заміс та за необхідності розрахунковий склад бетонної суміші коригується для досягнення заданих характеристик бетонної суміші та готового бетону.

1.6. Теоретичні передумови та обмеження умов дослідження

Очевидно, що для визначення складу бетону критично важливо отримати достовірні характеристики його компонентів. У випадку застосування РКЗ через його неоднорідність це завдання ускладнюється. Запропоновані методи визначення вмісту залишкового розчину, які дозволяють в результаті отримати досить точні характеристики обох фаз РКЗ, є дуже трудомісткими і потребують наявності стаціонарних випробувальних лабораторій. В умовах великої кількості руйнувань в Україні в результаті військових дій, коли вже під час розбору завалів необхідно в стислі терміни здійснити сортування відходів, визначити методи їх переробки та можливі шляхи повторного застосування, тривалі лабораторні випробування є недоцільними. Відповідно існує необхідність в удосконаленні існуючих в Україні методів розрахунку складів важких бетонів в частині можливості застосування крупного заповнювача з бетонного брухту.

Очевидно, що цей удосконалений метод має враховувати особливості РКЗ. В розглянутому в п. 1.5 традиційному розрахунково-експериментальному методі походження та характеристики крупного заповнювача враховуються під час розрахунку В/Ц (Ц/В), водопотреби та вмісту безпосередньо крупного заповнювача. І якщо вміст щебня визначається на основі фактичних його фізико-механічних характеристик, які можна визначити прямими методами, то на В/Ц (Ц/В) та витрату води походження та особливості крупного заповнювача впливають опосередковано через емпірично встановлені поправки.

Як зазначено вище? застосування РКЗ в бетоні в загальному випадку призводить до погіршення його міцнісних та експлуатаційних характеристик. Доцільно припустити, що компенсувати цей негативний вплив РКЗ можливо шляхом введення додаткових поправок на походження РКЗ: для визначення Ц/В поправка ΔA_i до коефіцієнта якості заповнювачів; та поправка ΔB_i до загальної водопотреби бетонної суміші. Визначити ці поправки можна з умов рівномірності бетонів та рівнорухливості бетонних сумішей на НЗ та РКЗ.

Необхідно зазначити, що для досягнення мети даної роботи передбачається отримати суміші РКЗ, готові до застосування в бетонах класів міцності до С20/25 як на бетонному виробництві, так і безпосередньо на будівельному майданчику. Додаткова обробка та підготовка РКЗ, а також використання активних добавок та пластифікаторів не передбачаються.

Інше обмеження виходить з ідеї, наведеної у [79], про те, що отримати морозостійкий бетон з РКЗ можливо лише за умови, що РКЗ походить з морозостійкого бетону. Враховуючи, що в реальних умовах зазвичай морозостійкість бетону перед демонтажем не визначається, визначити марку за морозостійкістю бетону-джерела складно. В даній роботі очікується отримати важкий бетон з РКЗ, морозостійкість якого не нормується, тобто для внутрішніх конструкцій.

РОЗДІЛ 2. ЗАСТОСОВАНІ МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Як відомо, механічні властивості бетону, як неоднорідного матеріалу, визначаються взаємодією його складових. А отже, властивості компонентів бетонної суміші мають безпосередній вплив на характеристики затверділого бетону.

Перш ніж сировина та матеріали можуть бути застосовані в якості компоненту бетонної суміші вони мають задовольняти певним механічним та експлуатаційним вимогам.

В процесі даного дослідження використовувалися місцеві матеріали.

2.1. Властивості застосованих матеріалів

2.1.1. Цемент

В якості в'язучого, як при виготовленні бетону-джерела, так і бетону з РКЗ, застосовувався портландцемент ПЦ II/Б-Ш-400 за ДСТУ Б В.2.7-46:2010 (СЕМ II/B-S 32,5 N за ДСТУ Б EN 197-1) в мішках по 25 кг виробництва Heidelbergcement, м. Кривий Ріг з наступними фізико-механічними характеристиками:

- дійсна густина $\rho_{ц}=3,1$ г/см³;
- насипна густина $\rho_{н.ц.}=1,2$ г/см³;
- активність $R_{ц}=40$ МПа.

Хімічний та мінералогічний склади клінкеру наведені в табл. 2.1 та 2.2.

Таблиця 2.1.

Хімічний склад клінкеру ПЦ II/Б-Ш-400, м. Кривий Ріг

Оксиди	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃
Вміст, %	63,65	20,77	4,86	3,66	2,27	0,72

Таблиця 2.2.

Мінералогічний склад клінкеру ПЦ ІІ/Б-Ш-400, м. Кривий Ріг

Мінерал	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Вміст, %	60,32	14,0	6,66	11,13

Важливою характеристикою цементу, яка впливає і на В/Ц, і на водопотребу бетонної суміші, є нормальна густина цементного тіста (НГЦТ). НГЦТ визначалась за допомогою приладу Віка з товкачиком за методикою, наведеною у [11]. В результаті випробування отримана консистенція цементного тіста, що відповідає НГЦТ 26%.

2.1.2. Дрібний заповнювач

В якості дрібного заповнювача застосований пісок з одного з кар'єрів в Дніпропетровській області.

Випробування піску виконувались у відповідності до [16]. Під час випробувань визначалися зерновий склад, модуль крупності, дійсна і насипна густини, вміст пилоподібних і глинистих часток. Для висушування проб до постійної маси застосовувалась електрична шафа з температурою 105...110 °С.

Визначення водопотреби піску виконувалось за методикою, наведеною у додатку Г [21]. В якості еталону застосований стандартний кварцовий пісок, що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-189 з водопотребою 4%.

Для визначення зернового складу піску застосований стандартний набір металевих сит з квадратними (до 1,25 мм) та круглими (2,5 мм і більше) отворами.

За результатами просіювання проби піску крізь сита з діаметрами отворів 10 мм та 5 мм зерна більше 10 мм не виявлені, вміст зерен розміром 5...10 мм не перевищує 0,13%, що відповідає вимогам [17].

Результати визначення зернового складу проби піску, що пройшла крізь сито 5 мм представлені в табл. 2.3 та у вигляді кривої просіювання (рис. 2.1).

Таблиця 2.3.

Результат визначення зернового складу піску

Найменування залишку	Залишки на ситах, % за масою					Прохід крізь сито з сіткою №016, % за масою
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	
Частковий, a_i	0,37	0,98	4,61	29,54	57,09	7,41
Повний, A_i	0,37	1,35	5,96	35,5	92,59	-

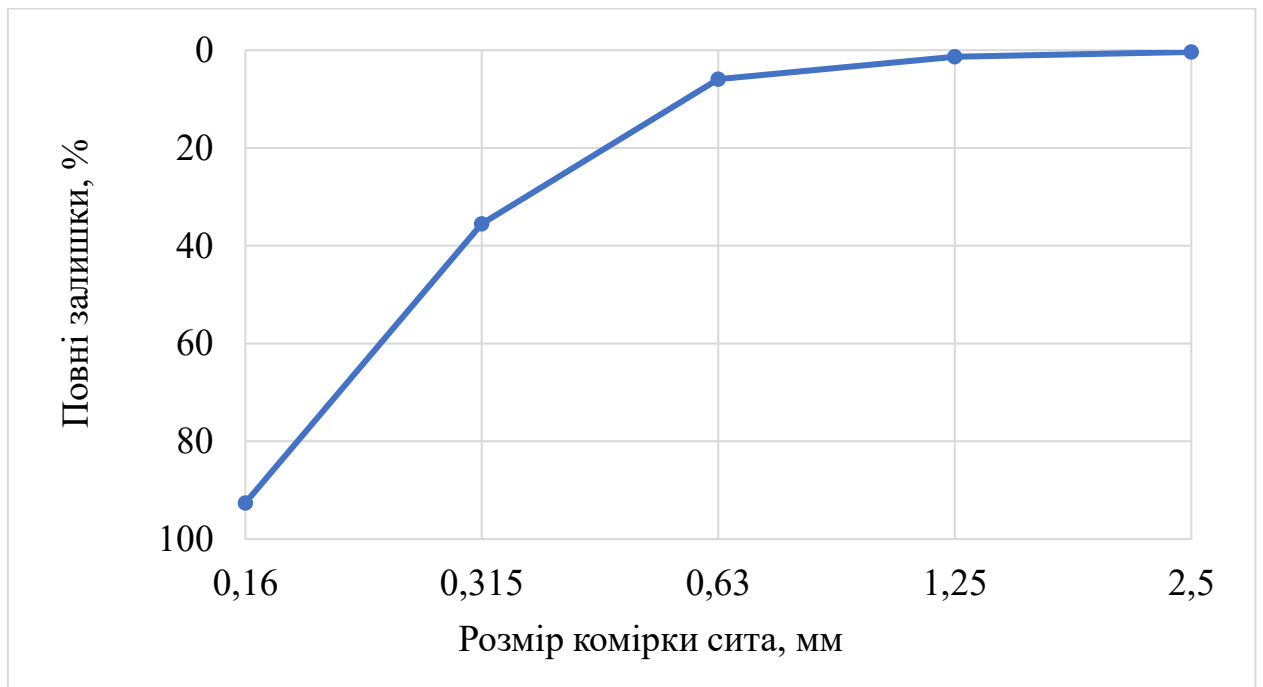


Рисунок 2.1.Крива просіювання проби піску

Отримавши значення повних залишків на ситах визначаємо модуль крупності піску:

$$M_k = \frac{\sum A_i}{100} = \frac{0,37 + 1,35 + 5,96 + 35,5 + 92,59}{100} = 1,36$$

За отриманим значенням модуля крупності застосований пісок відноситься до групи дуже дрібних. Дрібні піски характеризуються більшою питомою площею поверхні, що призводить до підвищеної водопотреби.

Визначення дійсної густини виконувалось прискореним методом згідно з [16] за допомогою приладу Ле-Шательє. Для визначення насипної густини застосовувався мірний циліндр місткістю 1 л. Вимірювання виконувались по два рази, кожного разу на новій порції піску.

За отриманими значеннями насипної та дійсної густин піску визначалась порожнистість за формулою:

$$V_{\Pi}^{ДЗ} = \left(1 - \frac{\rho_{\text{н}}^{ДЗ}}{\rho_{\text{з}}^{ДЗ}}\right) \cdot 100 \quad (2.1)$$

Вміст пилюватих та глинистих часток визначався методом відмулювання.

Результати випробувань піску (крім зернового складу) наведені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4.

Результати випробувань дрібного заповнювача

Найменування параметру	Позначення	Одиниця вимірювання	Значення
Насипна густина	$\rho_{\text{н}}^{ДЗ}$	г/см ³	1,54
Дійсна густина	$\rho_{\text{з}}^{ДЗ}$	г/см ³	2,56
Порожнистість	$V_{\Pi}^{ДЗ}$	%	39,8
Вміст пилюватих та глинистих часток	$P_{\text{відм}}^{ДЗ}$	%	1,3
Водопотреба	B_{Π}^{\square}	%	5,5

2.1.3. Натуральний крупний заповнювач

В якості НЗ застосовувався щебінь Рибальського кар'єра (с. Любимівка, Дніпропетровська область).

Під час розрахунку вмісту компонентів бетону необхідно враховувати такі параметри крупних заповнювачів як зерновий склад, насипна густина, середня густина зерен, порожнистість, міцність, вологість, водопотреба. Зазначені властивості визначають масовий вміст компонентів бетонної суміші, а також впливають на її характеристики (водо-цементне співвідношення, консистенцію, густину тощо) [21].

Зерновий склад визначався згідно з п. 4.3 [18]. Для розсіювання застосовувався стандартний набір сит з круглими отворами. Результати ситового аналізу представлені у табличній (табл. 2.5) та графічній (у вигляді кривої на стандартному графіку, рис. 2.2) формі. Визначений зерновий склад не є оптимальним (графік повних залишків знаходиться поза зоною оптимальних значень), він перенасичений крупними фракціями.

Таблиця 2.5.

Результати ситового аналізу натурального заповнювача

Найменування залишку	Залишки на ситах, % за масою				Прохід крізь сито №5, % за масою
	25	20	10	5	
Частковий, a_i	0	6,6	78,5	13,0	1,9
Повний, A_i	0	6,6	85,1	98,1	-

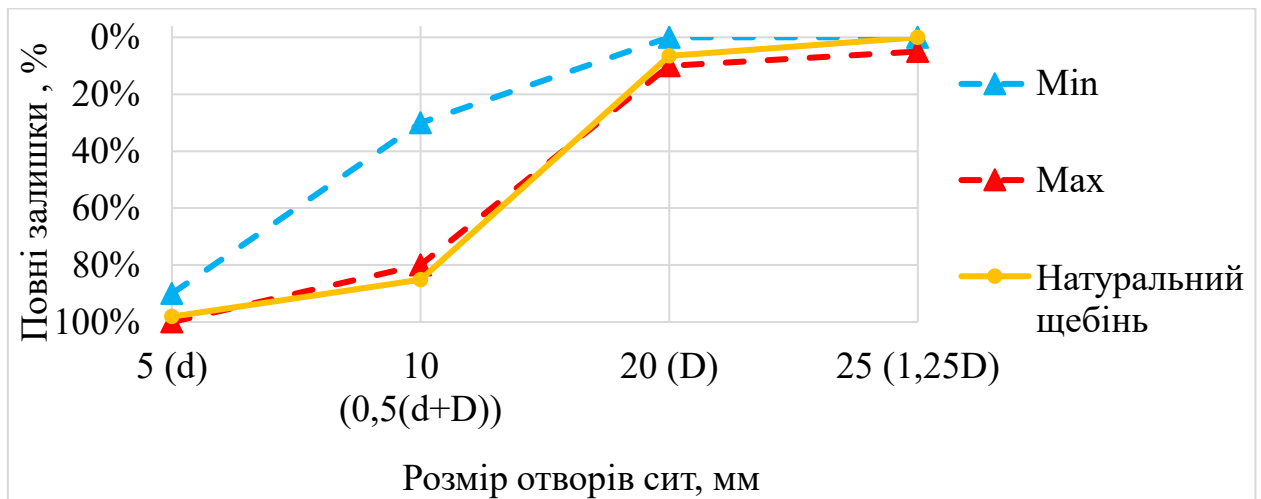


Рисунок 2.2. Крива розсіювання крупного НЗ на стандартному графіку

Для виготовлення бетону-джерела застосований НЗ в своєму природному зерновому складі.

Насипна густина, середня густина зерен, порожнистість, вміст пілуватих та глинистих часток, вологість, міцність за дробильністю визначались у відповідності до [18].

Насипна густина $\rho_n^{\text{НЗ}}$ висушених до постійних мас проб сумішей фракцій НЗ визначалася за допомогою мірних циліндрів об'ємом 10 л.

Середня густина зерен $\rho_3^{\text{НЗ}}$ визначалася за допомогою методу гідростатичного зважування після насичення проб водою протягом 2 год.

За отриманими значеннями насипної густини та середньої густини зерен НЗ визначається порожнистість за формулою:

$$V_{\Pi}^{\text{НЗ}} = \left(1 - \frac{\rho_n^{\text{НЗ}}}{\rho_3^{\text{НЗ}}}\right) \cdot 100 \quad (2.2)$$

Кількість лещадних зерен визначалася для кожної фракції у відповідності до п. 4.7 [18] за допомогою пересувного шаблону (рис. 2.3). Вміст лещадних зерен в суміші НЗ визначався як середньозважений у відповідності до вмісту фракцій за масою.



Рисунок 2.3. Шаблон для визначення вмісту зерен лещадної форми

Вміст пилюватих та глинистих часток визначався методом відмулювання.

Міцність НЗ визначалася за дробильністю при стисненні окремих фракцій проби в сталевому циліндрі (рис. 2.4). Застосований циліндр з внутрішнім діаметром 150 мм та висотою 150 мм. Стискаюче зусилля досягалося на пресі П-125 зі шкалою з максимальним зусиллям 625 кН. Для випробування в зазначеному циліндрі навантаження збільшувалось до 200 кН зі швидкістю 1-2 кН/с. Після стискання вміст циліндру просіювався через сита 1,25 мм (для фракції 5...10 мм) та 2,5 мм (для фракції 10...20 мм). За масою проходу крізь сита визначався відсоток втрати маси, який і характеризує дробильність D_r , %. Марка за дробильністю визначалась за табл. 2 [20] для інтрузивних порід.



Рисунок 2.4. Процес випробування на дробильність в циліндрі діаметром 150 мм

Визначення вологості виконувалось шляхом порівняння мас проб НЗ в природному стані та у висушеному до постійної маси.

Водопотреба натурального заповнювача визначалась за методикою, наведеною в Додатку Г [21], виходячи з рівнорухливості розчину на піску з відомою водопотребою (див. п. 2.1.2) та бетонної суміші нормальної густоти на цьому ж піску.

На водопотребу бетонної суміші на даному НЗ має вплив і вміст зерен, менших 5 мм, який визначається шляхом просіювання контрольної проби НЗ крізь відповідне сито.

Результати визначення зазначених вище характеристик наведені у табл. 2.6.

Таблиця 2.6.

Результати випробувань НЗ в природному стані

Найменування параметру	Позначення	Одиниця вимірювання	Значення
Насипна густина	$\rho_{\text{н}}^{\text{НЗ}}$	г/см ³	1,51
Середня густина зерен	$\rho_{\text{з}}^{\text{НЗ}}$	г/см ³	2,6
Порожнистість	$V_{\text{п}}^{\text{НЗ}}$	%	41,9
Лещадність	$\Pi_{\text{пл}}^{\text{НЗ}}$	%	7,9
Вміст пилюватих та глинистих часток	$\Pi_{\text{відм}}^{\text{НЗ}}$	%	0,31
Вологість	$W_{\text{щ}}^{\text{НЗ}}$	%	0,17
Дробильність	Др	%	9,2
Водопотреба	$B_{\text{щ}}^{\text{НЗ}}$	%	0,46
Кількість зерен менше 5 мм	-	%	1,4

За результатами випробувань НЗ згідно з класифікаційними ознаками, наведеними в [19] застосований щебінь відноситься до групи щільних важких, з дуже низьким вмістом пилюватих та глинистих часток, з середньою порожнистістю, дуже міцних (марка за дробильністю М1200), обкатаних.

2.2. Виготовлення зразків бетону-джерела та їх подрібнення

2.2.1. Розрахунок складу-бетону-джерела

Визначення складу бетону-джерела виконувалося розрахунково-експериментальним методом у відповідності до розділу 8 [21].

Під час розрахунку передбачалося вирішення двопараметричної задачі: досягнення заданої міцності бетону f_{cm} та заданої рухомості бетонної суміші ОК. Запроєктовані класи бетону С16/20 (склад С1), С20/25 (склад С2) та С25/30 (склад С3). Враховуючи, що передбачалось ручне замішування сумішей для зручності для всіх складів прийнята осадка конуса ОК=16...20 см.

З урахуванням зазначеного вище після усіх коригувань отримані склади бетонної суміші (на 10 л), наведені у табл. 2.7.

Таблиця 2.7.

Розрахунок складу бетону-джерела

Маркування складу	С1	С2	С3
Розрахований клас міцності	С16/20	С20/25	С25/30
Цемент, г	3430	4530	5370
Вода, г	2200	2470	2560
В/Ц	0,64	0,55	0,48
Пісок, г	4050	3730	3390
Щебінь, г	13430	12120	11520

2.2.2. Виготовлення зразків бетону-джерела

Кожного складу виготовлено по 3 серії для випробування та подрібнення у віці 28, 90 та 180 діб. Бетонна суміш виготовлялась вручну. Ущільнення суміші в формах здійснювалось на вібростолі. Бетонна суміш укладалася в металеві форми з довжиною ребра 100 мм. В кожній серії виготовлялось по 9 зразків-кубів. Після розпалублення через одну добу після формування зразки поміщались в сушильну шафу з нормальними умовами для тверднення (рис. 2.5). Для підтримання постійної вологості на днище сушильної шафи періодично доливалася водопровідна вода.



Рисунок 2.5. Зразки бетону-джерела: а – одразу після укладання суміші в форми: б – в сушильній шафі з постійними умовами

Після тверднення протягом заданого періоду отримані зразки перед випробуванням на міцність оглядалися, зважувалися, вимірювалися їх геометричні розміри (рис. 2.6).



Рисунок 2.6. Готові до випробувань та подрібнення зразки бетону-джерела

Подрібнення зразків бетону-джерела виконувалось на лабораторній щоківій дробарці зі складним обертанням (рис. 2.7, б). Принцип роботи щоківій дробарки полягає в роздавлюванні шматків між двома плоскими поверхнями.

Оскільки розмір вхідного отвору дробарки становить 70 мм, зразки, що не випробовувались на пресі, були спочатку розколоті на фрагменти з максимальним розміром 50-60 мм на пресі. Для цього зразки встановлювались на нижній плиті преса на два арматурні стержні, а руйнівне навантаження прикладалося до верхньої грані зразка також через арматурний стержень (рис. 2.7, а).



а



б

Рисунок 2.7. Засоби для подрібнення бетону: а – зразок на пресі перед розколюванням; б – лабораторна щоківій дробарка зі складним обертанням

Для подальших випробувань використовувались саме розколоті на пресі зразки, виходячи з міркування, що такий метод руйнування з точки зору впливу на структуру матеріалу найближчий до реальних методів демонтажу будівель і споруд (рис. 2.8, а, б).

В результаті подрібнення з кожного складу утворені суміші рециклінгового щебеню (рис. 2.8, в). Кожна суміш окремо розфасована в мішки і позначена наступним чином: XX/YY/K, де XX – номер складу (С1, С2, С3), YY – вік (28, 90 або 180 діб), К – ознака зразка, що підлягав розколюванню.



а

б

в

Рисунок 2.8. Зразки до і після подрібнення: а – випробуваний на міцність на пресі зразок бетону-джерела з порушеною структурою; б – розколотий на фрагменти зразок бетону-джерела без порушення структури; в – загальний вигляд суміші рециклінгового щебня одразу після подрібнення

2.3. Фізико-механічні методи досліджень

2.3.1. Фізико-механічні методи дослідження рециклінгового заповнювача

Враховуючи відсутність в Україні норм щодо випробування крупних заповнювачів, виготовлених в результаті подрібнення відходів

різноманітного походження, для дослідження властивостей РКЗ застосовані стандартні методики, які регламентують випробування натуральних заповнювачів. Відповідно після подрібнення бетону-джерела всі суміші підлягали випробуванням, аналогічним до тих, що наведені в п. 2.1.3. Для випробування на дробильність застосовувався металевий циліндр з внутрішнім діаметром 75 мм. Стиснення фракцій у циліндрі виконувалось на гідравлічному пресі типу ПСУ-10 до величини зусилля 50 кН.

Враховуючи наявність на зернах залишкового розчину, який має пористу структуру, для визначення середньої густини $\rho_3^{\text{РКЗ}}$, г/см³, використовувався метод, наведений у п. 4.16.1.3 [18]. Згідно з цим методом відібрані довільним чином і попередньо зважені зерна РКЗ занурювались на 1-2 с у розплавлений парафін і після цього охолоджувались на повітрі (рис. 2.9). Після цього зерна з парафіном зважувались і поміщались в колбу з попередньо визначеним об'ємом води в ній. Зміна об'єму води в колбі і є об'ємом зерен, покритих парафіном. Густина парафіну під час випробування приймалась 0,9 г/см³.



а



б

Рисунок 2.9. Визначення середньої густини зерен РКЗ: а – процес розплавлення парафіну; б – зерна РКЗ, покриті парафіною плівкою

2.3.2. Фізико-механічні методи дослідження бетонної суміші та бетону

Рухливість бетонної суміші на НЗ визначалась у відповідності до [9] за допомогою стандартного конуса.

Враховуючи невеликі об'єми сумішей РКЗ, в якості показника рухливості суміші обраний розплив стандартного конуса (РК), що визначався за аналогією з методикою визначення консистенції цементного тіста, наведеній у [12]. Для цього контрольна проба бетонної суміші струшувалась на струшувальному столику з частотою приблизно 1 удар в секунду протягом 30 с. Після цього за допомогою штангенциркуля вимірювався діаметр основи конуса проби в двох взаємно перпендикулярних напрямках. Для визначення кореляційної залежності між ОК за [9] та РК за [12] замішані п'ять довільних складів бетону з ОК 4...12 см і для кожного складу визначений відповідний РК. За результатами випробування побудований апроксимаційний графік та за допомогою інструментів Microsoft Excel визначене рівняння регресії, яке буде використовуватись для переходу від РК до ОК (рис. 2.10):

$$РК = 1,798 \cdot ОК + 0,7648 \quad (2.3)$$

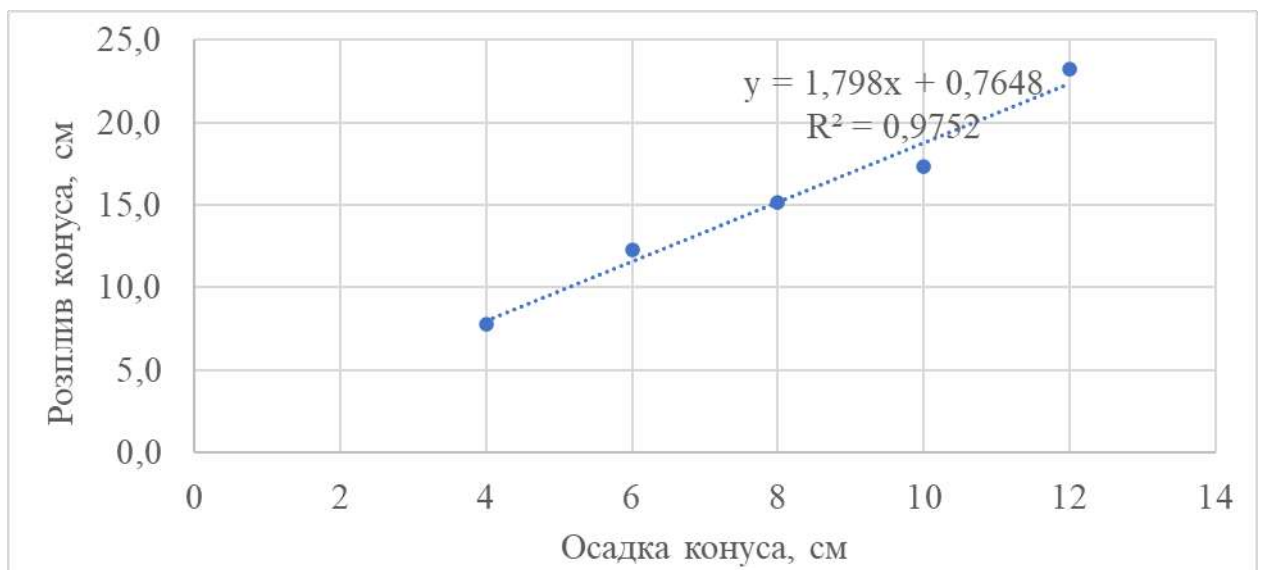


Рисунок 2.10. Залежність між РК за [12] та ОК за [9]

Густина бетонної суміші визначалася у відповідності до [9] безпосередньо в попередньо зважених формах. Зважування сумішей в формах виконувалось за допомогою електронних ваг Ohaus Defender 2000 з точністю зважування до 1 г (рис. 2.11, а).

Випробування зразків у відповідному віці на міцність на стиск виконувалось на гідравлічному пресі П-125 згідно з [13] (рис. 2.11, б). Обробка результатів та визначення міцності виконувались у відповідності до [15]. Перед випробуванням зразки-куби зважувались на електронних вагах з точністю до 1 г, а також визначались їх геометричні розміри за допомогою штангенциркуля та металевої лінійки.



а



б

Рисунок 2.11. Засоби для випробування бетонних сумішей та бетонних зразків: а – електронні ваги Ohaus Defender 2000; б – прес гідравлічний П-125

Густина бетону з РКЗ та його водопоглинання визначались згідно з [10]. Для розрахунку густини застосовувались зразки перед їх випробуванням на

стиск. Для розрахунку водопоглинання застосовувалися зразки неправильної форми, що виготовлялись із залишків бетонної суміші в стандартних формах об'ємом приблизно $800-850 \text{ см}^3$ з аналогічними умовами ущільнення та тверднення.

Глибина карбонізації бетону з РКЗ визначалась згідно з [22] на пірамідах, що утворились після руйнування зразків на пресі, через 1 місяць із застосуванням 1% спиртового розчину фенолфталеїну.

Метою даної роботи було визначення можливості виготовлення бетону з РКЗ для внутрішніх конструкцій, тому випробування на морозостійкість не виконувались.

РОЗДІЛ 3. ВЛАСТИВОСТІ КРУПНОГО ЗАПОВНЮВАЧА РЕЦИКЛІНГОВОГО ПОХОДЖЕННЯ

3.1. Випробування зразків бетону-джерела

Під час випробування зразків бетону-джерела визначались їх геометричні розміри та густина, а також міцність на стиск у віці 28, 90 та 180 діб.

Для визначення міцності випадковим чином з кожного складу бетону-джерела відібрані по 3 зразки. Результати випробування наведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1.

Результати випробувань зразків бетону-джерела

Номер складу	Вік випробування та подрібнення, діб	Середня густина, г/см ³	Середня міцність, $f_{c.cube}$, МПа	Коефіцієнт варіації, %	Міцність f_{cm} , МПа
C1	28	2,33	22,1	5,8	20,7
C2	28	2,36	30,7	3,7	28,7
C3	28	2,28	26,2	5,0	24,4
C1	90	2,38	29,4	13,0	23,0
C2	90	2,31	30,6	5,0	28,6
C3	90	2,32	36,0	8,2	32,9
C1	180	2,36	29,5	2,1	27,5
C2	180	2,32	34,8	2,8	32,5
C3	180	2,34	36,6	8,0	33,6

3.2. Випробування сумішей РКЗ, утворених після подрібнення

Як зазначено вище, РКЗ являє собою двофазну систему, яка складається з натурального заповнювача (щебня або гравія) та залишкового розчину, приклеєного до крупного заповнювача. Наявність додаткових фаз в крупному

заповнювачі збільшує неоднорідність бетонної суміші і, як наслідок, зменшують прогнозованість характеристик готового бетону. А отже, визначення фактичних характеристик щебня є важливим етапом проєктування складу бетонної суміші. Додатково за результатами дослідження необхідно визначити вплив складу, віку та міцності бетону-джерела на характеристики утвореного з нього РКЗ.

3.2.1. Визначення зернового складу

Розсіюванню підлягали суміші в тому вигляді, в якому вони були отримані після подрібнення – без розділення на дрібну (<5 мм) та крупну (>5 мм) фракцію. Кожна суміш просіювалась ручним способом.

Результати ситового аналізу представлені у табличному вигляді (табл. 3.2).

Таблиця 3.2.

Результати ситового аналізу сумішей РКЗ після подрібнення

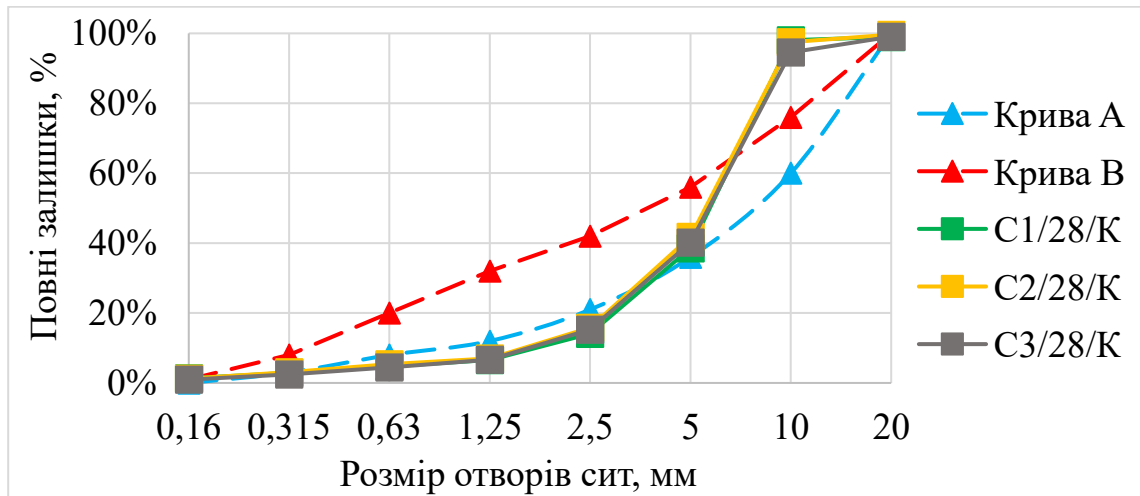
Суміш	Найменування залишку	Залишки на ситах, % за масою								
		20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	дно
С1/28/К	Частковий, a_i	0,9	59,5	24,5	7,6	1,8	1,8	1,6	1,4	1,0
	Повний, A_i	0,9	60,4	84,9	92,4	94,3	96,1	97,6	99,0	-
С2/28/К	Частковий, a_i	2,1	55,7	26,0	8,8	1,6	2,3	1,8	1,3	0,4
	Повний, A_i	2,1	57,8	83,8	92,6	94,3	96,6	98,4	99,6	-
С3/28/К	Частковий, a_i	4,4	54,4	24,9	8,6	2,2	2,0	1,5	1,0	1,0
	Повний, A_i	4,4	58,9	83,8	92,4	94,6	96,6	98,1	99,0	-
С1/90/К	Частковий, a_i	4,0	54,1	26,3	8,4	1,5	1,8	1,7	1,3	0,9
	Повний, A_i	4,0	58,1	84,4	92,7	94,2	96,1	97,8	99,1	-

Продовження таблиці 3.2

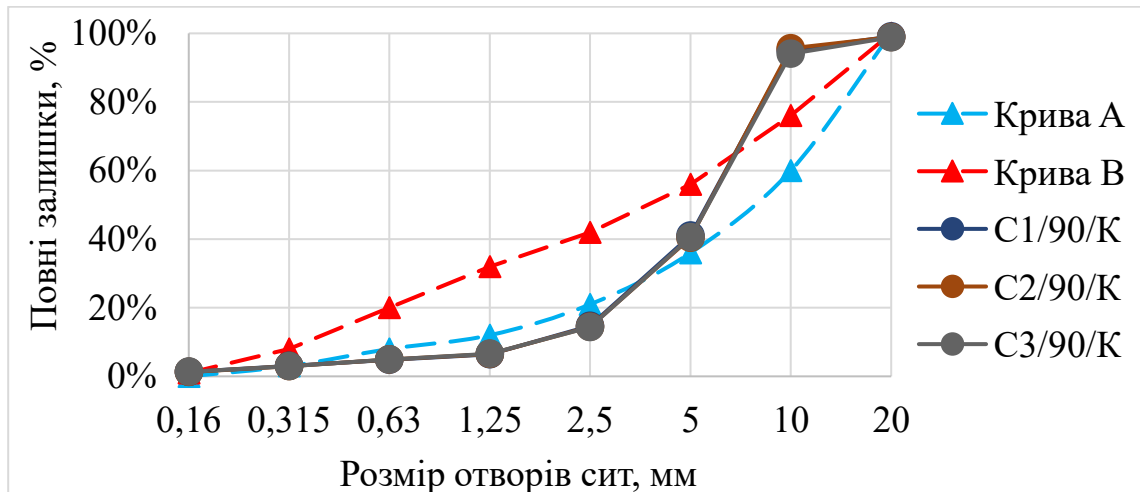
Суміш	Найменування залишку	Залишки на ситах, % за масою								
		20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	дно
С2/90/К	Частковий, a_i	3,3	55,3	26,0	7,9	1,6	2,0	1,7	1,3	1,1
	Повний, A_i	3,3	58,5	84,5	92,4	94,0	96,0	97,7	98,9	-
С3/90/К	Частковий, a_i	4,8	53,4	26,2	7,8	1,7	2,0	1,6	1,3	1,2
	Повний, A_i	4,8	58,3	84,5	92,3	93,9	95,9	97,5	98,8	-
С1/180/К	Частковий, a_i	0,7	58,6	24,4	7,9	2,4	1,9	1,8	1,3	1,0
	Повний, A_i	0,7	59,3	83,7	91,6	94,0	95,9	97,7	99,0	-
С2/180/К	Частковий, a_i	0,9	56,8	25,2	8,2	2,7	1,9	1,7	1,3	1,3
	Повний, A_i	0,9	57,7	82,9	91,0	93,8	95,7	97,4	98,7	-
С3/180/К	Частковий, a_i	0,9	57,5	24,8	8,1	2,8	1,9	1,6	1,3	1,0
	Повний, A_i	0,9	58,4	83,3	91,4	94,2	96,1	97,7	99,0	-

За результатами ситового аналізу побудовані криві розсіювання (рис. 3.1, рис. 3.2). На рис. 3.1 на кожному графіку представлені суміші різного складу, але одного віку. На рис. 3.2 на кожному графіку представлені суміші одного складу, але різного віку. Додатково для отримання області оптимальних значень на кожному графіку наведені криві А та В для максимального розміру зерен 20 мм згідно з п. 7.5 [21]. Як видно з графіків, зерновий склад сумішей дрібних та крупних фракцій, незалежно від віку і складу бетону-джерела, є майже ідентичним і при цьому не відповідає оптимальному складу згідно з [21]. Всі криві розсіювання в області дрібних фракцій знаходяться нижче кривої А, що свідчить про перенасиченість сумішей крупними зернами. Такі суміші важко піддаються обробці та мають схильність до розшарування [21]. Тобто невідсортовані суміші заповнювачів, отримані одразу після подрібнення, не можна застосовувати для виробництва нового бетону. В цілому це підтверджує результати Річардсона та ін. [104],

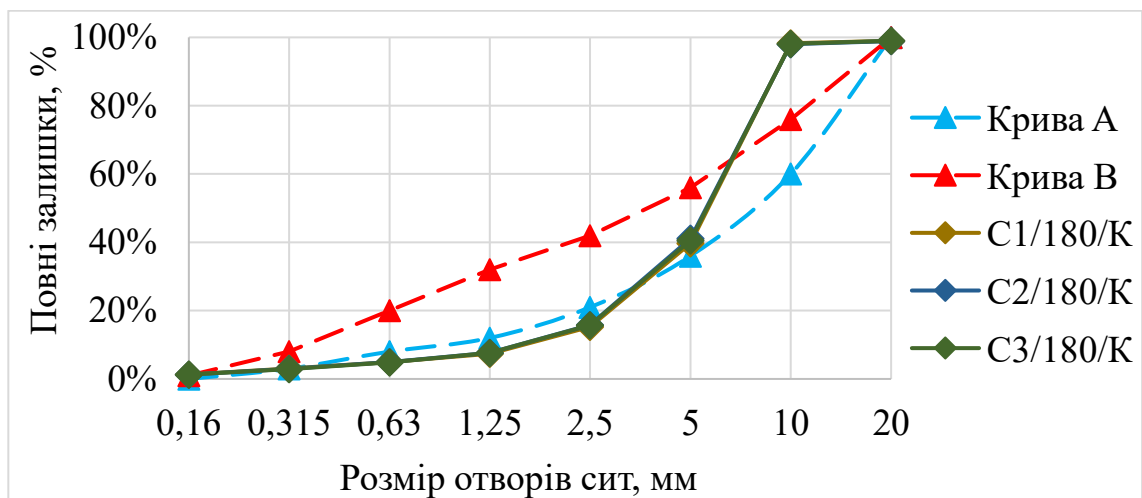
згідно з якими у випадку застосування невідсортованого заповнювача задана міцність бетону не була досягнута.



а



б



в

Рисунок 3.1. Криві розсіювання сумішей щебня після подрібнення в одному віці: а – 28 діб; б – 90 діб; в – 180 діб

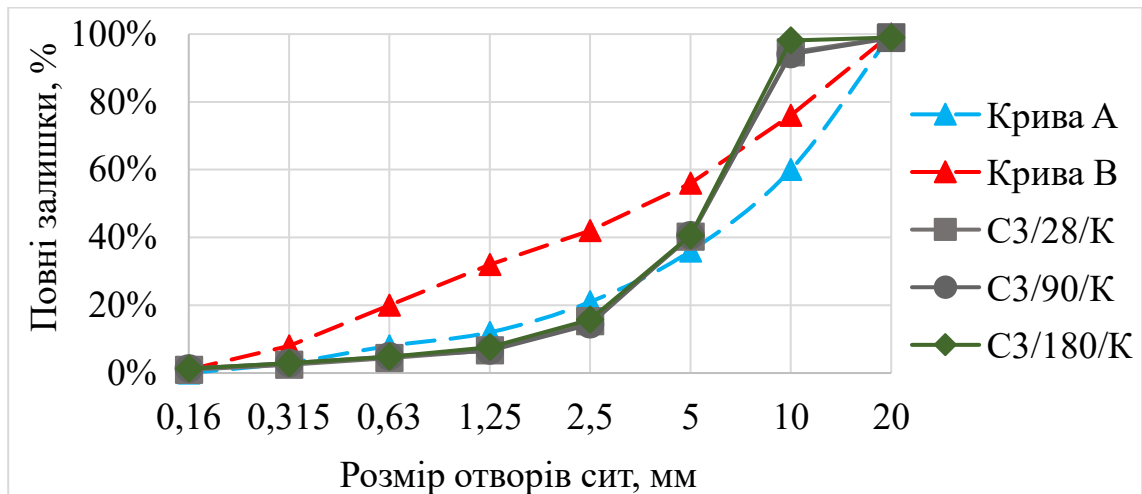
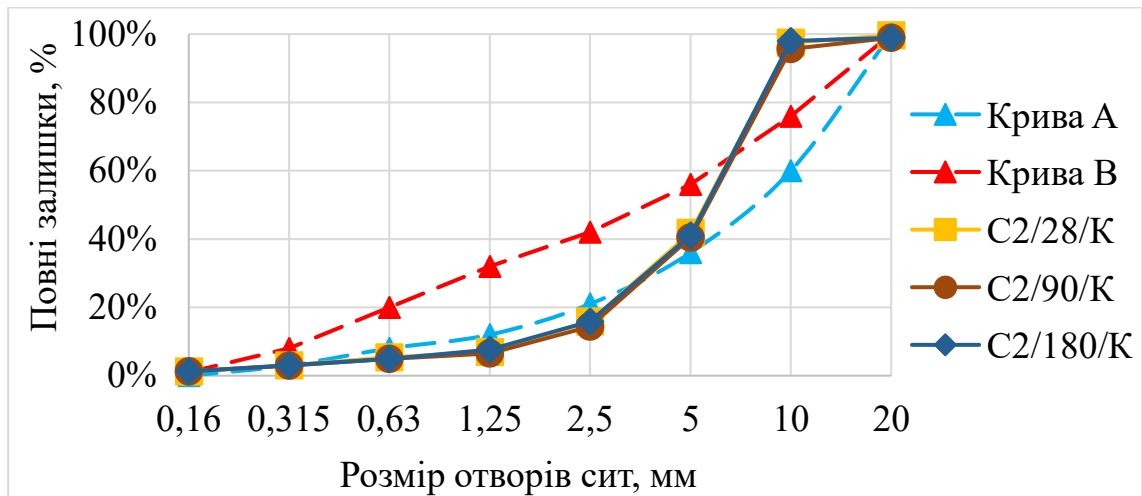
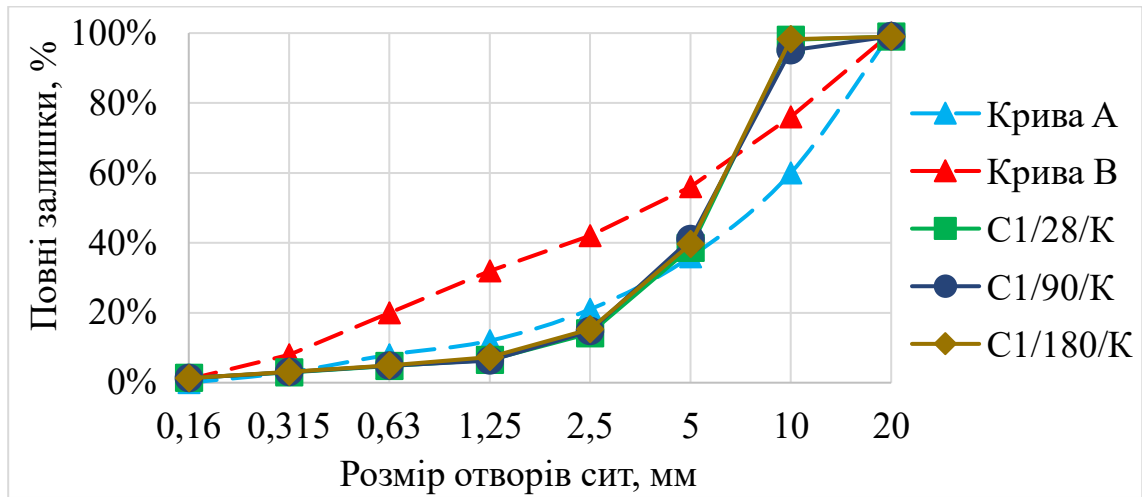


Рисунок 3.2. Криві розсіювання кожної суміші щебня після подрібнення в різному віці: а – С1; б – С2; в – С3

Для подальшого дослідження використовувались тільки суміші крупних фракцій. Результати їх ситового аналізу нанесені на стандартні графіки, запропоновані в [2], і наведені на рис. 3.3, рис. 3.4. В цілому суміші лише

крупних фракцій (тобто РКЗ) відповідають вимогам будівельних стандартів в Україні.

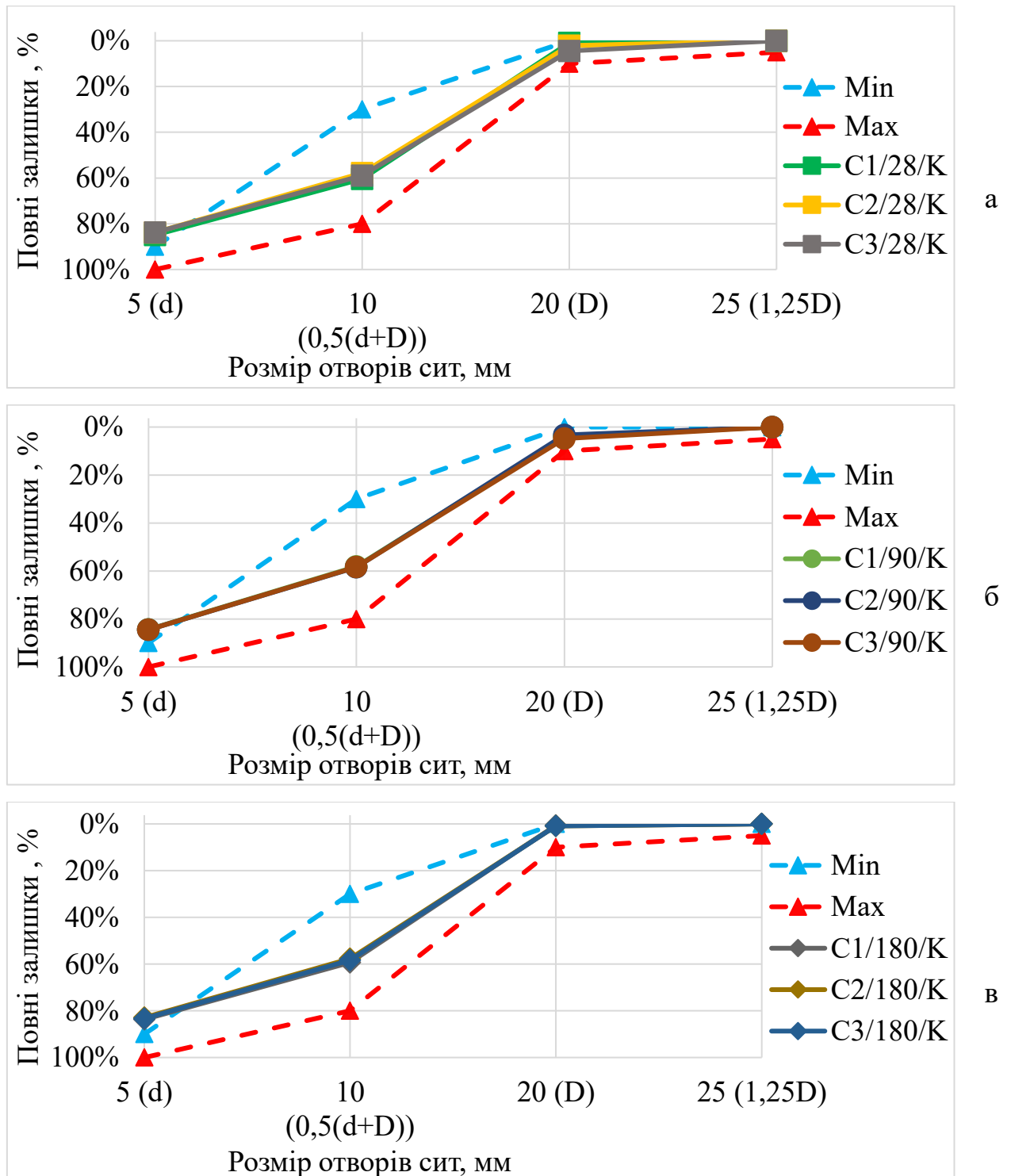


Рисунок 3.3. Криві розсіювання крупних фракцій різних сумішей на стандартному графіку в одному віці: а – 28 діб; б – 90 діб; в – 180 діб

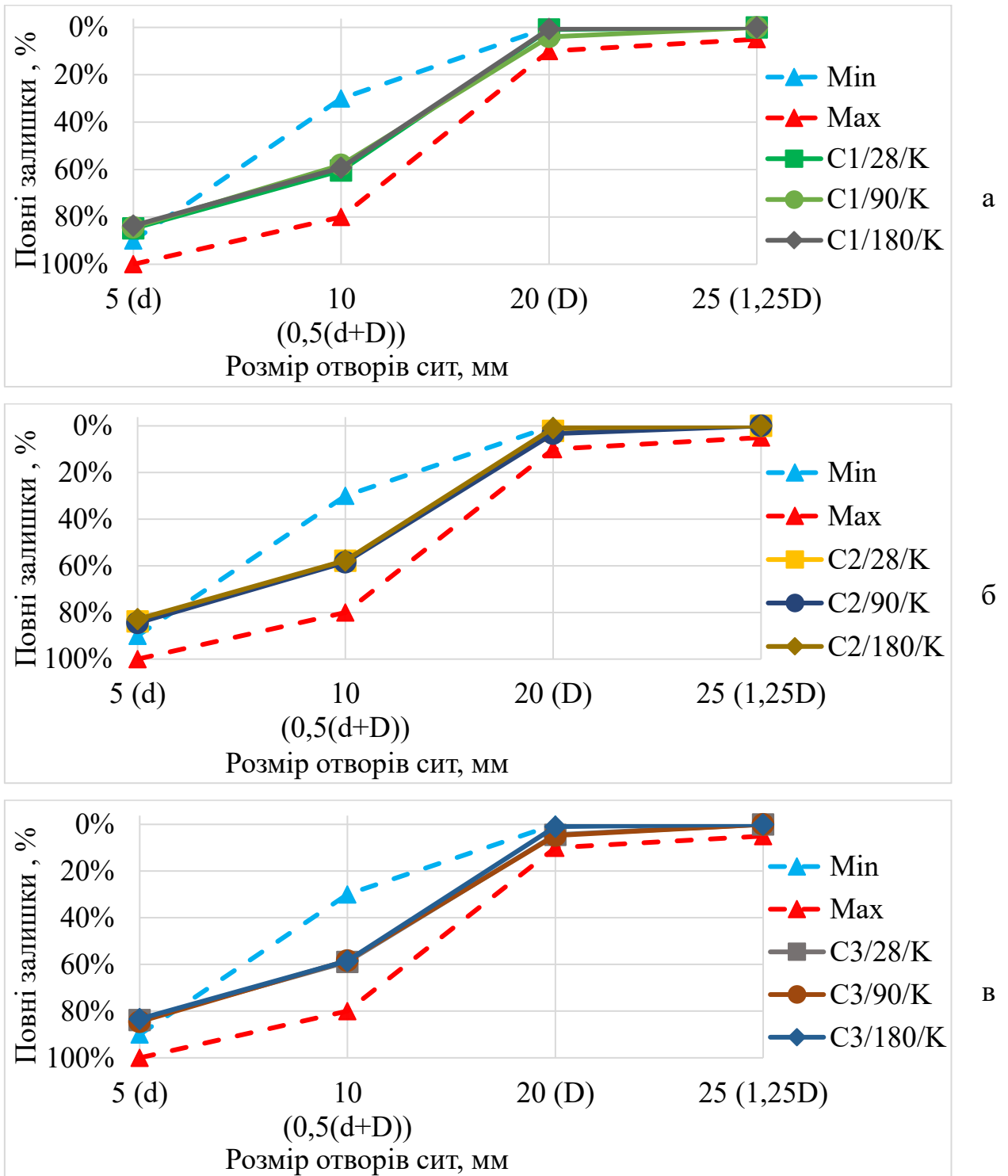


Рисунок 3.4. Криві розсіювання крупних фракцій кожної суміші на стандартному графіку в різному віці: а – С1; б – С2; в – С3

За результатами визначення зернового складу встановлено, що частка фракцій, що відповідають крупному заповнювачу (розміром >5 мм) складає 83-85%.

3.2.2. Візуальний огляд зерен РКЗ

Візуальний огляд окремих фракцій відфракціонованого рециклінгового щебня показав, що вміст залишкового розчину на зернах різних фракцій суттєво відрізняється. Майже 100% зерен фракцій 10-20 мм містять і натуральний щебінь, і залишковий розчин (рис. 3.5). В переважній більшості вміст залишкового розчину по поверхні натурального щебня менше 50% [36].



Рисунок 3.5. Загальний вигляд фракції 10-20 мм

У фракції 5-10 мм деяка кількість зерен взагалі не має натурального щебня (рис. 3.6), у великій кількості зерен вміст залишкового розчину на поверхні природного заповнювача значно перевищує 50%. Тому для визначення середньої густини зерен та насипної густини кожна фракція випробовувалась окремо.



Рисунок 3.6. Загальний вигляд фракції 5-10 мм

Загальний вигляд дрібної фракції (<5 мм) наведений на рис. 3.7.



Рисунок 3.7. Загальний вигляд фракції <5 мм

Деяка кількість зерен обох крупних фракцій виявились досить слабкими, їх руйнування можливе навіть руками. Ймовірно це пов'язано з особливостями процесу подрібнення в щоківій дробарці: під впливом стискаючих зусиль відбувається порушення структури матриці розчину, при цьому деякий час форма зберігається. Отже, при перемішуванні фракцій між собою можливе руйнування окремих зерен під дією механічних впливів з утворенням дрібної фракції.

Візуально виявлені окремі зерна з увігнутою формою, а також більша кількість, порівняно з натуральним щебнем, лещадних зерен. Наявність таких часток призводить до зниження щільності пакування зерен в суміші [36].

3.3. Визначення середньої густини зерен, насипної густини, порожнистості, лещадності та дробильності РКЗ

Насипна густина $\rho_{\text{н}}^{\text{РКЗ}}$, г/см³, визначалась згідно з п.4.17.1 [18]. Для кожної фракції кожної марки суміші виконувалось два випробування, кожного разу використовуючи нову порцію щебеню. Через обмежену кількість матеріалу для фракції 10-20 мм застосовувались мірні циліндри місткістю 2 л, для фракції 5-10 мм – 1 л.

Середня густина зерен $\rho_{\text{з}}^{\text{РКЗ}}$, г/см³, визначалася за допомогою парафінування зерен (див. п. 2.3.1).

За отриманими значеннями насипної та середньої густин за формулою (2.2) розрахована порожнистість $V_{\text{п}}^{\text{РКЗ}}$, %.

Вміст лещадних зерен визначався для кожної фракції окремо.

Результати визначення насипної густини, середньої густини зерен, порожнистості, вмісту лещадних зерен, міцності за дробильністю для кожної фракції наведені в табл. 3.3, 3.4.

Таблиця 3.3.

Результати випробувань РКЗ фракцій 5-10 мм

Суміш	Вміст фракції, %	$\rho_{\text{н}}^{\text{РКЗ}}$, г/см ³	$\rho_{\text{з}}^{\text{РКЗ}}$, г/см ³	$V_{\text{п}}^{\text{РКЗ}}$, %	$\Pi_{\text{пл}}^{\text{РКЗ}}$, %	Др, %
1	2	3	4	5	6	7
С1/28/К	28,8	1,07	2,37	54,85	15,2	18,6
С2/28/К	31,0	1,06	2,29	53,71	15,2	19,3
С3/28/К	29,8	1,06	2,35	54,89	18,3	17,2
С1/90/К	31,2	1,07	2,38	55,04	15,1	17,2
С2/90/К	30,8	1,07	2,32	53,88	12,7	21,0
С3/90/К	31,0	1,07	2,33	54,08	10,6	20,2
С1/180/К	29,2	1,10	2,36	53,39	15,7	19,8
С2/180/К	30,4	1,07	2,29	53,28	13,9	18,1
С3/180/К	29,8	1,05	2,34	55,13	18,1	15,6

Таблиця 3.4.

Результати випробувань РКЗ фракцій 10-20 мм

Суміш	Вміст фракції, %	$\rho_{\text{н}}^{\text{РКЗ}}$, г/см ³	$\rho_{\text{з}}^{\text{РКЗ}}$, г/см ³	$V_{\text{п}}^{\text{РКЗ}}$, %	$\Pi_{\text{пл}}^{\text{РКЗ}}$, %	Др, %
1	2	3	4	5	6	7
С1/28/К	70,1	1,24	2,52	50,79	11,0	11,6
С2/28/К	66,5	1,21	2,44	50,41	13,1	14,1
С3/28/К	64,9	1,24	2,48	50,00	16,5	13,0
С1/90/К	64,1	1,27	2,53	49,80	11,2	14,5
С2/90/К	65,4	1,21	2,49	51,41	13,4	17,4
С3/90/К	63,3	1,22	2,46	50,41	11,8	15,7
С1/180/К	70,0	1,25	2,55	50,98	12,8	14,9
С2/180/К	68,5	1,20	2,45	51,02	10,5	15,6

Продовження таблиці 3.4

1	2	3	4	5	6	7
C3/180/К	69,1	1,20	2,51	52,19	14,6	14,2

Проаналізувавши дані, наведені в табл. 3.3, 3.4, можна зробити висновок про відмінність у фізико-механічних властивостях в різних фракціях РКЗ. Зі збільшенням крупності насипна густина та середня густина зерен збільшуються, а порожнистість зменшується. Враховуючи, що РКЗ складається з двох фаз з різною питомою вагою, очевидно, що об'ємний вміст більш легкого залишкового розчину є більшим в меншій фракції. Очевидно також, що розчинова частина має меншу міцність на стиск, а отже, більш крупна фракція з меншим вмістом залишкового розчину характеризується вищою міцністю (меншою дробильністю) (див. рис. 3.8, рис. 3.9).

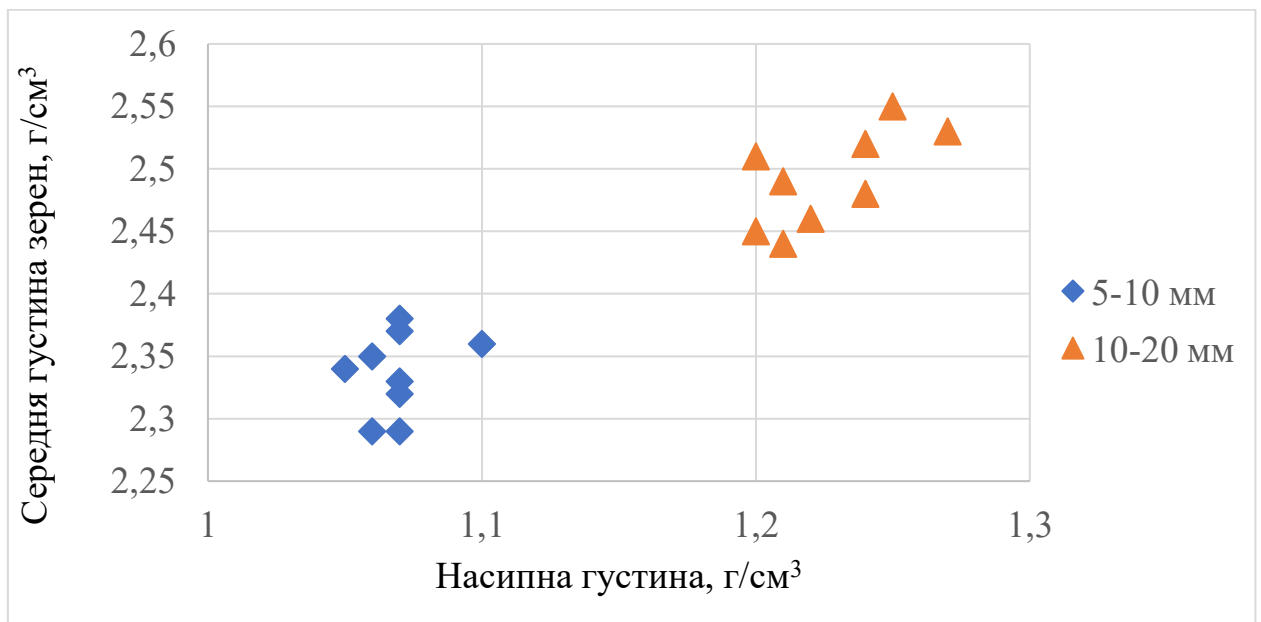


Рисунок 3.8. Співвідношення між насипною густиною та середньою густиною зерен РКЗ

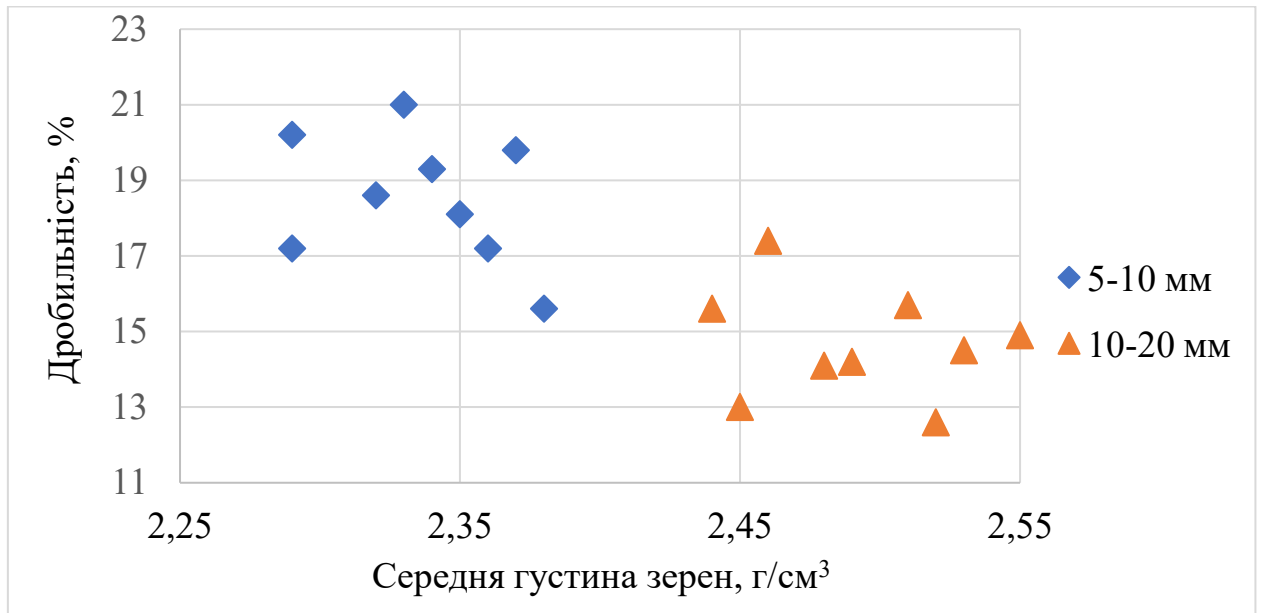


Рисунок 3.9. Співвідношення між середньою густиною зерен та дробильністю

Додатково визначена насипна густина кожної суміші РКЗ з фактичним співвідношенням фракцій (див. табл. 3.5).

Таблиця 3.5.

Насипна густина РКЗ з фактичним співвідношенням фракцій

Суміш	Співвідношення фракцій 5...10 мм та 10...20 мм в суміші, %	$\rho_{\text{н}}^{\text{РКЗ}}$, г/см ³
С1/28/К	29:71	1,21
С2/28/К	32:68	1,19
С3/28/К	31:69	1,21
С1/90/К	33:67	1,21
С2/90/К	32:68	1,18
С3/90/К	33:67	1,18
С1/180/К	29:71	1,21
С2/180/К	31:69	1,20
С3/180/К	30:70	1,18

3.4. Виготовлення сумішей рециклінгового крупного заповнювача

Згідно з положеннями п. 10.1 [21] співвідношення фракцій крупного заповнювача встановлюється таким, за якого вся суміш крупного заповнювача має найбільшу насипну густину та найменшу порожнистість. Зазвичай це співвідношення встановлюється експериментально. Зважаючи на зменшення насипної густини із зменшенням крупності фракції, можна припустити, що найбільшу насипну густину матиме суміш з мінімально допустимим вмістом меншої фракції. Для двофракційної суміші щебня з максимальною крупністю зерен 20 мм згідно з табл. 10.6 [21] допускається вміст фракції 5...10 мм не менше 20% за масою. Для перевірки залежності насипної густини $\rho_{\text{H}}^{\text{PKЗ}}$ двофракційних сумішей РКЗ від вмісту меншої фракції виготовлені суміші РКЗ зі співвідношенням фракцій 80%:20% за масою і результати випробувань порівнювались з даними в табл. 3.5.

За результатами визначення насипної густини та густини зерен, а також міцності подрібненого щебеню не встановлена залежність цих характеристик від віку бетону-джерела. Тому для виготовлення дослідних сумішей РКЗ суміші одного складу, але різного віку, об'єднувались в одну готову суміш шляхом ретельного перемішування вручну. Послідовність формування готових до використання сумішей РКЗ з подрібненого бетону кожного складу була наступна:

- 1) в межах фракцій одного віку формувалась двофракційна суміш шляхом перемішування фракцій 10...20 мм та 5...10 мм у співвідношенні 80%:20% за масою;

- 2) утворені суміші РКЗ різного віку з одного складу бетону-джерела об'єднувались в єдину двофракційну суміш шляхом ретельного перемішування.

В результаті отримані три готові двофракційні суміші РКЗ, які за аналогією з відповідними складами бетону-джерела позначені С1, С2 та С3 (рис. 3.10).



Рисунок 3.10. Готова двофракційна суміш РКЗ

Визначення характеристик підібраних сумішей крупного заповнювача виконувалось методами, наведеними у п.2.1.3 та п.2.3.1. результати випробувань наведені в табл. 3.6

Таблиця 3.6.

Результати випробувань РКЗ

Найменування параметру	Позначення	Одиниця вимірювання	Значення		
			C1	C2	C3
1	2	3	4	5	6
Насипна густина	ρ_H^{PK3}	г/см ³	1,25	1,25	1,25
Середня густина зерен	ρ_3^{PK3}	г/см ³	2,54	2,47	2,50
Порожнистість	V_{II}^{PK3}	%	50,8	49,4	50,0

Продовження таблиці 3.6

1	2	3	4	5	6
Вміст лещадних зерен	$P_{ПЛ}^{PKЗ}$	%	13,1	14,1	12,4
Вміст пилюватих та глинистих часток	$P_{Відм}^{PKЗ}$	%	0,64	0,72	0,66
Вологість	$W_{щ}^{PKЗ}$	%	0,13	0,11	0,13
Водопотреба	$B_{щ}^{PKЗ}$	%	3,6	4,0	3,6
Кількість зерен менше 5 мм	-	%	5,4	5,8	8,1

Як видно з табл. 3.6 в сумішах РКЗ, незважаючи на попереднє ретельне фракціонування і видалення дрібних (<5 мм) фракцій, спостерігається значна кількість зерен менше 5 мм. Очевидно в процесі механічного перемішування фракцій відбувається подрібнення деякої кількості слабких зерен внаслідок їх взаємних ударів. Згідно з ДСТУ [21] суміш крупного заповнювача зі вмістом зерен розміром менше 5 мм більше ніж 5% призводить до збільшення водопотреби всієї бетонної суміші.

Порівнюючи насипні густини $\rho_H^{PKЗ}$, наведені в табл. 3.5 та 3.6, отримали підтвердження, що насипна густина збільшується разом із зменшенням вмісту меншої фракції. Тобто для виготовлення бетону з РКЗ застосовуватимемо двофракційні суміші РКЗ зі співвідношенням фракцій 5...10 мм та 10...20 мм як 20%:80% за масою.

Висновки за розділом 3

За результатами дослідження фізико-механічних властивостей рециклінгового крупного заповнювача, утвореного з бетонних зразків після їх подрібнення можна зробити наступні висновки.

1. Зерновий склад утворених сумішей з кожного конкретного складу бетону-джерела в цілому не відповідає вимогам [20]. Головним чином, це зумовлено меншим вмістом фракції 5...10 мм, та надмірним обсягом фракцій 10...20 мм та менше 5 мм. Високий вміст часток менших 5 мм зумовлений наявністю великої кількості слабких зерен. Через значно меншу жорсткість залишкового розчину під час подрібнення вони досить легко подрібнюються до розмірів 2,5...5 мм. Зерновий склад крупної фракції в цілому відповідає вимогам нормативної документації. Вміст крупної фракції складає 82,9...84,9%. Вміст кожної фракції: 20...25 мм – 0,8...5,7%; 10...20 мм – 63,3...70,1%; 5...10 мм – 28,9...31,2%.

2. За середньою густиною зерен всі досліджені фракції згідно з табл. 1 [19] відносяться до важких щільних заповнювачів: густина зерен фракцій 10...20 мм – 2,44...2,55 г/см³; 5...10 мм – 2,29...2,38 г/см³. За насипною густиною фракції 5-10 мм (1,05...1,1 г/см³) відноситься до середніх пористих, фракції 10-20 мм (1,2...1,27 г/см³) – до важких щільних. За формою зерен готові суміші РКЗ відносяться до групи кубовидних з вмістом лещадних зерен 10,6...18,3% у фракціях 5...10 мм та 10,5...16,5% у фракціях 10...20 мм.

3. За результатами дослідження не встановлені кореляції між складом, віком та міцністю бетону-джерела та щебня, отриманого після його подрібнення.

4. Головним фактором, що має визначальний вплив на властивості РКЗ, є наявність залишкового розчину на зернах щебня. При чому його вміст на кожному окремому зерні не є постійним навіть в межах однієї фракції, що призводить до значної дисперсії величин середньої густини зерен. За результатами дослідження встановлений факт зменшення середньої та насипної густин, а також міцності РКЗ зі зменшенням крупності фракції. Дробильність фракцій 5...10 мм склала 15,6...21,0%, фракцій 10...20 мм – 11,6...17,4%.

5. Зважаючи на зменшення густини та міцності заповнювача разом із зменшенням розмірів зерен під час виготовлення бетонної суміші необхідним виглядає ручне дозування (в лабораторних умовах) або використання дозаторів (на виробництві) для формування суміші заповнювачів за умови забезпечення вмісту менших фракцій на рівні, що дозволить отримати максимальні насипну густину та щільність пакування зерен (наприклад, згідно з [21] у двофракційній суміші заповнювача допускається вміст меншої фракції на рівні 20-25%). В цьому контексті необхідно звернути увагу на високу, порівняно з натуральним щебнем, порожнистість. Об'єм порожнин очевидно пов'язаний з підвищеною лещадністю зерен через особливості процесу подрібнення в щоківій дробарці. Крім того, візуально виявлені зерна з увігнутою формою, які сприяють зниженню щільності пакування зерен. Порівняння насипної густини РКЗ зі співвідношенням фракцій, отриманим одразу після подрібнення бетону-джерела, з РКЗ зі співвідношенням фракцій 5...10 мм та 10...20 мм як 20%:80% показало збільшення насипної густини з 1,18...1,21 г/см³ до 1,25 г/см³ зі зменшенням вмісту в РКЗ фракції 5...10 мм.

6. Після змішування фракцій між собою отримані наступні фізико-механічні характеристики готових до використання сумішей РКЗ: насипна густина 1,25 г/см³; середня густина зерен 2,47...2,54 г/см³; порожнистість 49,4...50,8%; вміст лещадних зерен 12,4...14,1%; вміст пилюватих та глинистих часток 0,64...0,72%; вологість 0,11...0,13%.

7. За рахунок наявності пористого залишкового розчину водопотреба РКЗ в 7,8...8,7 разів вища за водопотребу НЗ.

8. Внаслідок механічної взаємодії зерен між собою під час перемішування фракцій деяка частина слабких зерен руйнується, що призводить до утворення фракції менше 5 мм. Її вміст складає 5,4...8,1%. Як наслідок, збільшується водопотреба бетонної суміші з РКЗ.

РОЗДІЛ 4. БЕТОН З ВИКОРИСТАННЯМ РЕЦИКЛІНГОВОГО КРУПНОГО ЗАПОВНЮВАЧА

4.1. Математичне планування експерименту

Суть планування експерименту і вибору складу бетону із застосуванням математично-статистичних методів полягає у встановленні математичної залежності між заданими властивостями бетону та витратою і властивостями складових матеріалів [21].

Планування експериментів складається з декількох етапів [5, 21]:

- 1) попереднє вивчення об'єкта дослідження;
- 2) вибір факторів, що визначають мінливість параметрів, які потрібно оптимізувати;
- 3) розрахунок основного вихідного складу бетонної суміші;
- 4) вибір інтервалів варіювання факторів;
- 5) вибір плану та умов проведення експерименту;
- 6) розрахунок усіх складів бетонної суміші відповідно до обраного плану та реалізація експерименту;
- 7) побудова відповідної математичної моделі.

Об'єктом дослідження в даному експерименті є важкий бетон з відомими фізико-механічними характеристиками компонентів та постійною рухливістю.

Завданням експерименту є визначення впливу 100% вмісту рециклінгового щебня на В/Ц (Ц/В) і витрату води і визначення поправок ΔA_i (для коефіцієнта A , необхідного для розрахунку В/Ц) та ΔB_i (для витрати води B) на застосування рециклінгового щебня. Фактично необхідно визначити:

- 1) змінення В/Ц (Ц/В) у випадку застосування рециклінгового щебня для досягнення міцності, що рівна міцності бетону аналогічного складу із застосуванням тільки НЗ;
- 2) збільшення водопотреби бетонної суміші з РКЗ для досягнення рухливості, що рівна рухливості бетонної суміші аналогічного складу на НЗ.

Враховуючи, що залежність Ц/В від коефіцієнта A з незначною похибкою можна прийняти лінійною (рис. 4.1), міцність бетону лінійно залежить від Ц/В, а додаткова витрата води, що враховує особливості РКЗ, очевидно лінійно впливає на загальну водопотребу бетонної суміші (згідно з формулою (1.6), метою експерименту є отримання рівняння регресії першого ступеня (лінійної залежності).

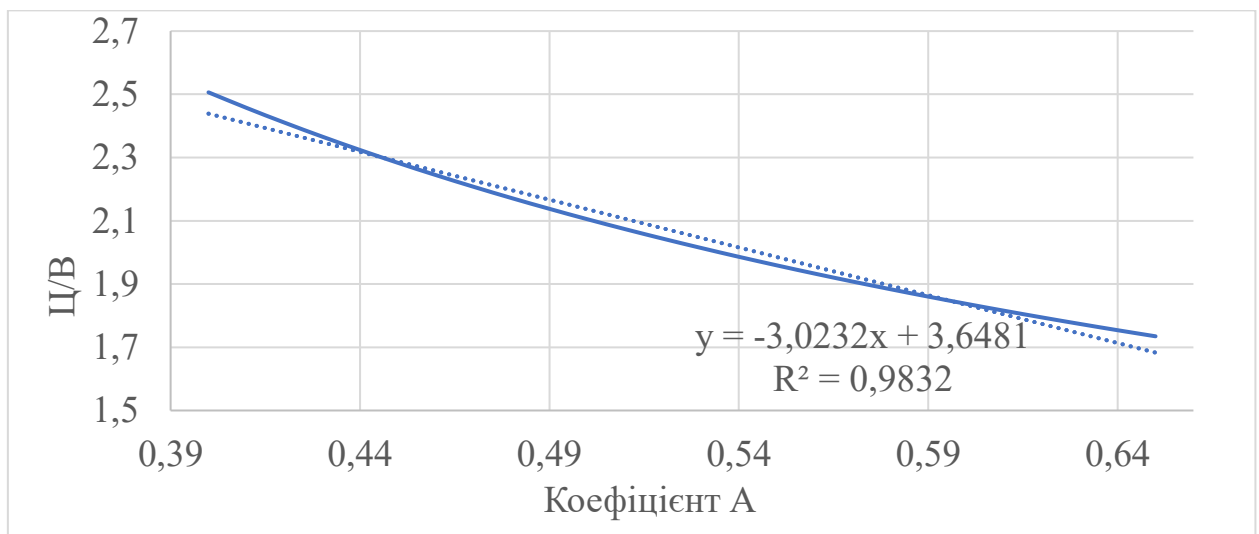


Рисунок 4.1. Залежність Ц/В від коефіцієнта A

При вивченні лінійних залежностей застосовується повний факторний експеримент (ПФЕ) на верхньому та нижньому рівнях [5] з кодованими записами відповідно «+1» та «-1».

В якості факторів, що варіюються, виступатимуть Ц/В та витрата води. Таким чином, маємо двофакторний експеримент з кількістю дослідів (точок плану) $N_1 = 2^2 = 4$.

Загальний вигляд регресії першого порядку:

$$\hat{y}_i = b_0 + \sum_1^k b_i x_i + \sum_1^k b_{ij} x_i x_j ; i \neq j \quad (4.1)$$

де $i, j = 1, 2, \dots, k$ – порядкові номери факторів;

\hat{y}_i – досліджувана властивість бетону;

x_k – вихідні фактори;

b_0, b_i, b_{ij} – коефіцієнти рівнянь регресії.

Коефіцієнти рівнянь при використанні планів першого порядку обчислюються за наступними формулами:

$$b_0 = \frac{\sum_1^{N_1} \bar{y}_u}{N_1} \quad (4.2)$$

$$b_i = \frac{\sum_1^{N_1} \bar{y}_u x_{iu}}{N_1} \quad (4.3)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_1^{N_1} \bar{y}_u x_{iu} x_{ju}}{N_1}; i \neq j \quad (4.4)$$

де \bar{y}_u – експериментально встановлена властивість бетону в точці плану u ;

x_{iu}, x_{ju} – значення відповідно i -го, j -го фактора в точці плану u ;

N_1 – кількість точок плану (за винятком нульових точок).

4.2. Розрахунок складу бетонної суміші на натуральному заповнювачі

Бетон на НЗ замішувався для виготовлення еталонних зразків-кубів та отримання цільових міцності та рухливості для бетону та бетонної суміші на РКЗ. Отримані за результатами випробування характеристики бетону та бетонної суміші на НЗ підставлялись в отримані за результатами експериментальних випробувань бетону та бетонної суміші з РКЗ рівняння регресії для обчислення відповідних значень факторів, що варіювались. Тобто рівняння регресії для визначення легкоукладальності бетонної суміші та міцності бетонів з РКЗ розв'язувались, виходячи відповідно з рівнорухливості та рівноміцності бетонів з РКЗ та НЗ.

В цілях даної роботи вирішувалась двопараметрична задача. Нормована міцність бетону – клас С20/25. Рухомість бетонної суміші – осадка конуса ОК=7 см (каркасні залізобетонні конструкції).

Розраховувалась чотирикомпонентна суміш. Відповідно для розрахунку складу бетону послідовно визначались три параметри: цементно-водне

співвідношення (Ц/В), витрата води (В) та коефіцієнт розсуву зерен крупного заповнювача цементно-піщаним розчином (α).

4.2.1. Підбір зернового складу НЗ, ідентичного сумішам РКЗ

Визначений в п. 2.1.3 зерновий склад НЗ не є оптимальним через надмірний обсяг крупних зерен. Крім цього для виключення впливу різниці в гранулометричних складах НЗ та РКЗ на властивості бетонної суміші та бетону в цілях експерименту в суміш НЗ вручну домішувалась фракція 5...10 мм. Для цього під час виготовлення зразків бетону з натуральним заповнювачем спочатку відбиралась проба натурального щебня масою 120...130% від його розрахованого вмісту за масою, потім додавалась до відібраної суміші 10% за масою фракція НЗ 5...10 мм. Після ретельного перемішування НЗ відважувався його розрахований вміст. За таких умов відкориговані результати ситового аналізу НЗ наведені в табл. 4.1 та на рис. 4.2.

Таблиця 4.1.

Результати ситового аналізу натурального заповнювача

Найменування залишку	Залишки на ситах, % за масою				Прохід крізь сито №5, % за масою
	25	20	10	5	
Частковий, a_i	0	6,6	78,5	13,0	1,9
Повний, A_i	0	6,6	85,1	98,1	-
Відкоригований частковий	0	6,1	72,0	20,2	1,7
Відкоригований повний	0	6,1	78,1	98,3	-

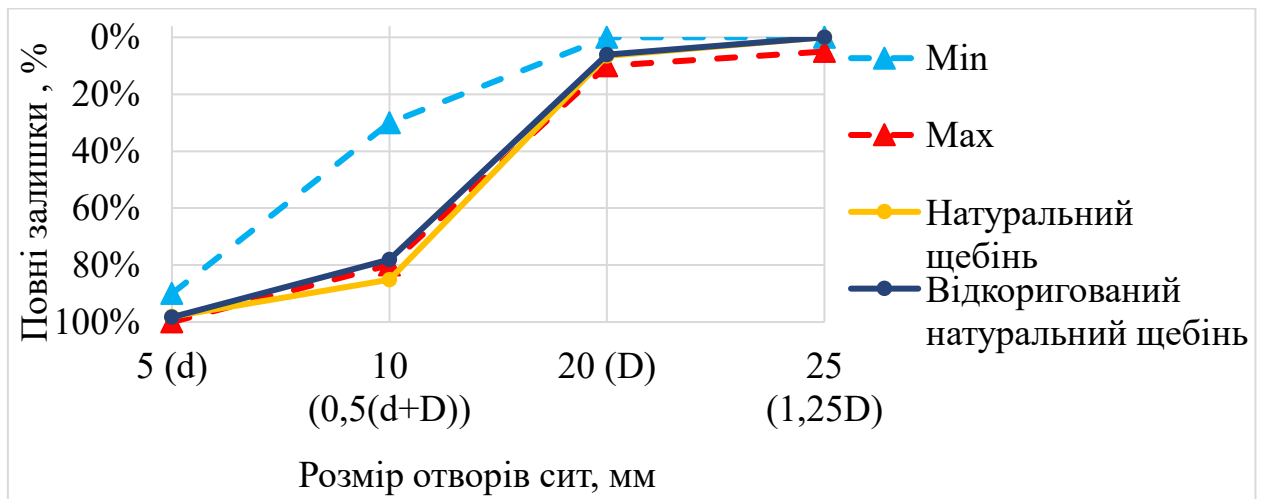


Рисунок 4.2. Криві розсіювання НЗ на стандартному графіку

Результати визначення характеристик НЗ відкоригованого гранулометричного складу наведені у табл. 4.2.

Таблиця 4.2.

Результати випробувань НЗ відкоригованого гранулометричного складу

Найменування параметру	Позначення	Одиниця вимірювання	Значення
Насипна густина	$\rho_n^{НЗ}$	г/см ³	1,45
Середня густина зерен	$\rho_z^{НЗ}$	г/см ³	2,66
Порожнистість	$V_p^{НЗ}$	%	45,5
Вміст пилюватих та глинистих часток	$P_{відм}^{НЗ}$	%	0,34
Вологість	$W_{щ}^{НЗ}$	%	0,17
Дробильність	Др	%	9,6
Водопотреба	$B_{щ}^{НЗ}$	%	0,46
Кількість зерен менше 5 мм	-	%	1,7

4.2.2. Визначення Ц/В та витрат води і цементу

Ц/В, як обернене значення В/Ц, визначається з формули (1.2). Коефіцієнт A визначається за формулою (1.3).

Користуючись даними з таблиць 4.2 та 3.4 за табл. 10.1 [21] приймаємо $A_0=0,62$.

Початково розрахуємо В/Ц для базового A_0 , після цього перерахуємо його з урахуванням поправок.

Задавшись коефіцієнтом варіації $C_v=13,5\%$ середню міцність бетону визначаємо за формулою:

$$f_{cm} = f_{ck.cube}/0,778, \quad (4.5)$$

де $f_{ck.cube}=25$ МПа – заданий клас бетону.

$$f_{cm} = \frac{25}{0,778} = 32,1 \text{ МПа}$$

Підставивши значення f_{cm} та A_0 у формулу (1.2) отримаємо:

$$\text{В/Ц} = \frac{0,62 \cdot 40}{32,1 + 0,5 \cdot 0,62 \cdot 40} = 0,56$$

Враховуючи визначені в розділі 2 характеристики компонентів бетонної суміші на НЗ, за допомогою рис. 1.8 визначаємо поправки коефіцієнта A (табл. 4.3).

Таблиця 4.3.

Поправки коефіцієнта A

Показник для визначення поправок	Поправка	Значення поправки
ОК=7 см	ΔA_1	-0,023
$M_k=1,36$	ΔA_2	-0,016
НГЦТ=26%	ΔA_3	+0,01
$D_{ш}=20$ мм	ΔA_4	-0,02
Ц/В	ΔA_5	-
$\Sigma \Delta A \approx$		-0,05

З урахуванням $\Sigma\Delta A$ отримаємо:

$$B/C = \frac{(0,62 - 0,05) \cdot 40}{32,1 + 0,5 \cdot (0,62 - 0,05) \cdot 40} = 0,52 \rightarrow C/B = 1,92$$

Згідно з рис. 1.8 відсутня необхідність в коригуванні за C/B .

4.2.3. Визначення витрати води та цементу

Витрата води визначається за формулою (1.6).

За формулою (1.5) при заданій рухливості бетонної суміші $OK=7$ см та фракції крупного заповнювача 5...20 мм отримаємо:

$$B_0 = 197 \text{ л/м}^3$$

Враховуючи визначені в розділі 2 характеристики компонентів бетонної суміші, отримаємо поправки до витрати води (табл. 4.4).

Таблиця 4.4.

Поправки до витрати води

Показник для визначення поправок	Поправка	Значення поправки
За походженням щебня (граніт)	ΔB_1	-
За формою зерен (щебінь необкатаний)	ΔB_2	-
$M_k=1,36$	ΔB_3	+13
Шорстка поверхня заповнювачів	ΔB_4	-
НГЦТ 26%	ΔB_5	-8
За витратою цементу	ΔB_6	-
За наявністю промитих заповнювачів	ΔB_7	-
$P_{\text{відм}}^{\text{НЗ}} = 0,34$; кількість зерен менше 5 мм 1,7%	ΔB_8	-
$P_{\text{відм}}^{\text{ДЗ}} = 1,3\%$	ΔB_9	-
	$\Sigma\Delta B_i \approx$	+5

Підставивши отримані значення в формулу (1.6) отримаємо:

$$B = 202 \text{ л/м}^3$$

Витрата цементу визначається за формулою (1.7):

$$Ц = \frac{202}{0,52} = 388,5 \text{ кг/м}^3$$

Коригуємо витрату води за витратою цементу:

$$\Delta B_6 = +4 \text{ л/м}^3 \rightarrow B = 206 \text{ л/м}^3 \rightarrow Ц = 396,2 \text{ кг/м}^3$$

$$\Delta B_6 = +1 \text{ л/м}^3 \rightarrow B = 207 \text{ л/м}^3 \rightarrow Ц = 398 \text{ кг/м}^3$$

Маючи витрати води та цементу визначаємо абсолютний об'єм цементного тіста (за формулою 1.8):

$$V_{\text{ц.т.}} = 207 + \frac{398}{3,1} = 335,4 \text{ л}$$

Відповідно абсолютний об'єм заповнювачів (за формулою 1.9):

$$V_a = 664,6 \text{ л}$$

4.2.4. Визначення витрати заповнювачів

Витрата щебня визначається за формулою (1.15). Коефіцієнт α – коефіцієнт заповнення пустот і розсунення зерен щебня розчином, визначається за рис. 1.9 та уточнюється за рухливістю суміші ($\Delta\alpha_{\text{OK}}$, рис. 1.10, а) та витратою цементу ($\Delta\alpha_{\text{Ц}}$, рис. 1.10, б):

$$\alpha = 1,26; \Delta\alpha_{\text{OK}} = 0,15; \Delta\alpha_{\text{Ц}} = 0,024$$

$$\text{Щ} = \frac{1,45 \cdot 1000}{1 + 0,455 \cdot (1,26 + 0,15 + 0,024 - 1)} = 1211 \text{ кг/м}^3$$

Витрата дрібного заповнювача визначається за формулою (1.16)

$$\text{П} = \left(664,6 - \frac{1211}{2,66} \right) \cdot 2,56 = 536 \text{ кг/м}^3$$

Розрахункова середня густина бетонної суміші $\rho_{\text{б.с.}}^T$, кг/м³, та абсолютний об'єм матеріалів V_M , л, визначаються відповідно за формулами (1.17) та (1.18).

Остаточний прийнятий склад бетонної суміші на НЗ на 1 м³ та її характеристики наведені в колонці 2 табл. 4.5.

4.2.5. Пробний заміс та коригування робочого складу суміші

Для коригування розрахованого складу з метою перевірки консистенції бетонної суміші виконаний пробний заміс на 7 л. За В/Ц=0,47 досягнута консистенція з ОК=9,5 см, тобто прийнята витрата води є очевидно більшою, ніж необхідно, орієнтовно на 10%. Зменшивши розрахункову витрату води на 10% і використовуючи формули (1.7)÷(1.9), (1.15)÷(1.18) отримаємо коригований склад бетонної суміші (див. колонку 3 табл. 4.5). Виконавши вдруге заміс на 7 л, отримали рухливість суміші з ОК=7,5 см, що відповідає цільовій. Остаточо для виготовлення 6 зразків з бетону на НЗ приймаємо склад суміші, наведений в колонці 4 табл. 4.5.

Таблиця 4.5.

Склад та характеристики бетонної суміші на НЗ

Параметр	Розрахункове значення	Кориговане значення	Прийняте значення на 7 л суміші
В/Ц	0,52	0,52	0,52
Цемент, кг	398	360	2,52
Вода, кг	207	187	1,309
Пісок, кг	536	610	4,27
Щебінь, кг	1211	1220	8,54
Розрахункова середня густина бетонної суміші, кг/м ³	2352	2377	-
Абсолютний об'єм матеріалів, л	1000	1000	7

4.3. Розрахунок складів бетонної суміші на РКЗ

4.3.1. Принципи розрахунку інтервалів варіювання факторів експерименту

Бетонні суміші на РКЗ в рамках даної роботи є експериментальними. Тому розрахунок їх складу буде виконуватись на верхньому та нижньому рівні варіювання факторів ПФЕ. Факторами, що варіюються, є Ц/В та витрата води. На нижньому рівні натуральні значення факторів приймаємо рівними значенням відповідних величин для бетону на НЗ. Розрахунок інтервалів варіювання та відповідних натуральних значень факторів на верхньому рівні наведені нижче.

Інтервал варіювання для фактора «Ц/В» очевидно визначається шуканою поправкою ΔA_i на застосування рециклінгового щебня. Оскільки РКЗ за рахунок наявності залишкового розчину має гірші характеристики у порівнянні з НЗ (див. Розділи 1, 3), то і коефіцієнт A для РКЗ буде меншим (за аналогією з табл. 8.1 [21]). Тобто величина ΔA_i на застосування рециклінгового щебня матиме від'ємне значення. В проаналізованій літературі максимальні абсолютні величини поправок на кожен окрему характеристику компонентів бетонної суміші не перевищують 0,08. Таким чином, для отримання значення Ц/В на рівні «+1» підставимо в формулу (1.2) коефіцієнт $(A-0,08)$.

Загальна водопотреба бетонної суміші з урахуванням легкоукладальності (пластичності) складається з води, що йде на замішування цементу, та водопотреби піску і щебня. Якщо на нижньому рівні варіювання фактора «В» водопотребу щебня прийняти за 0 (фактично вона врахована шляхом додавання до V_0 поправок), то теоретичний об'єм додаткової води для змочування РКЗ становить:

$$\Delta V_{\text{п}} = V_{\text{щ}}^{\text{РКЗ}} \text{Щ}^{\text{РКЗ}} - V_{\text{щ}}^{\text{НЗ}} \text{Щ}^{\text{НЗ}} \quad (4.6)$$

де $\text{Щ}^{\text{НЗ}}$, $\text{Щ}^{\text{РКЗ}}$ – відповідно вміст НЗ та РКЗ в бетонних сумішах, кг/м³.

На даному етапі достатньо врахувати лише поправку на водопотребу РКЗ, оскільки вміст в бетонній суміші піску і цементу є взаємопов'язаним, тоді як вміст крупного заповнювача практично не залежить від вмісту інших компонентів бетонної суміші (див. формулу (1.15)). Доцільно за результатами експерименту отримати фактичну пластичність бетонної суміші з урахуванням зміни водопотреби лише на РКЗ і під час пробних замісів коригувати вміст води.

Таким чином інтервал варіювання фактора «В» встановимо за результатами розрахунку складу бетонної суміші на РКЗ на нижніх рівнях прийнятих факторів:

$$\text{Інтервал варіювання фактора "В"} = \frac{\Delta B_{\text{п}}}{2} \quad (4.7)$$

Розрахунок складів сумішей на РКЗ виконується аналогічно до п. 4.2.

4.3.2. Розрахунок складів бетонної суміші на РКЗ на нижньому рівні варіювання факторів Ц/В («-1») та В («-1»)

Показники для визначення поправок до коефіцієнта A та витрат води для РКЗ не відрізняються від аналогічних для НЗ. Тому значення В/Ц, В та Ц для бетонної суміші на РКЗ становлять:

$$\begin{aligned} \text{В/Ц} &= 0,52 \rightarrow \text{Ц/В} = 1,92 \\ \text{В} &= 187 \text{ л/м}^3 \rightarrow \text{Ц} = 360 \text{ кг/м}^3 \end{aligned}$$

Вміст РКЗ та піску розраховується за формулами (1.15) та (1.16) за умов $\rho_{\text{н}}^{\text{щ}} = \rho_{\text{н}}^{\text{РКЗ}}$, $\rho_{\text{з}}^{\text{щ}} = \rho_{\text{з}}^{\text{РКЗ}}$, $V_{\text{п}}^{\text{щ}} = V_{\text{п}}^{\text{РКЗ}}$. Значення показників у формулі (1.15) та результат розрахунку вмісту щебня Щ та піску П для кожної суміші наведені у табл. 4.6.

Таблиця 4.6.

Результати визначення вмісту заповнювачів на нижньому рівні варіювання факторів Ц/В («-1») та В («-1»)

Показник у формулах (1.15) та (1.16)	C1	C2	C3
1	2	3	4
ρ_H^{PK3}	1,25	1,25	1,25
ρ_3^{PK3}	2,54	2,47	2,5
V_{II}^{PK3}	50,8	49,4	50,0
α	1,16	1,19	1,18
$\Delta\alpha_{OK}$	0,15	0,15	0,15
$\Delta\alpha_{Ц}$	0,005	0,005	0,005
Щ, кг/м ³	1078	1068	1071
П, кг/м ³	698	677	688

За формулами (1.17) та (1.18) розраховуємо середні густини бетонних сумішей та абсолютні об'єми матеріалів З кожного складу виготовлятимемо по 3 зразки-куби розміром 100 x 100 x 100 мм. Для цього перерахуємо визначені склади на лабораторний заміс об'ємом 3,5 л. Розраховані склади бетонних сумішей на РКЗ та їх характеристики наведені в табл.4.7.

Таблиця 4.7.

Склади та характеристики бетонних сумішей на РКЗ на нижньому рівні варіювання факторів Ц/В («-1») та В («-1»)

	C1		C2		C3	
	на 1 м ³	на заміс	на 1 м ³	на заміс	на 1 м ³	на заміс
1	2	3	4	5	6	7
Цемент, кг	360	1,259	360	1,259	360	1,259

Продовження таблиці 4.7

1	2	3	4	5	6	7
Вода, л	187	0,655	187	0,655	187	0,655
Пісок, кг	698	2,443	677	2,371	688	2,408
Щебінь, кг	1078	3,772	1068	3,738	1071	3,748
Розрахункова середня густина бетонної суміші, кг/м ³	2322	2322	2292	2292	2305	2305
Абсолютний об'єм матеріалів, л	1000	3,5	1000	3,5	1000	3,5
$\Delta V_{\text{п}}$, л	33,2		37,1		32,9	

Розраховану витрату РКЗ підставляємо в формулу (4.6) і отримуємо додаткову витрати води $\Delta V_{\text{п}}$ для кожної суміші РКЗ. Додаткові витрати води для сумішей С1 та С3 виявились близькими, для С2 – більше на 4л. Виконавши пробний заміс з додатковою витратою води для суміші С2 отримано дуже рухливу суміш, яка очевидно не відповідала рухливості суміші на НЗ. Отже, в якості верхнього рівня варіювання фактора витрати води приймається значення близьке до додаткової водопотреби для сумішей С1 та С3 – 33 л. Відповідно за формулою (4.7) визначаємо інтервал варіювання для фактора «В» в ПФЕ.

4.3.3. Умови планування експерименту

Визначивши інтервали варіювання факторів можна сформулювати умови планування експерименту (табл. 4.8).

Таблиця 4.8.

Умови планування експерименту

Фактори		Рівень варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
Ц/В	x_1	1,92	2,03	2,14	0,11
Витрата води В, л/м ³	x_2	187	203,5	220	16,5

В табл. 4.9 наведена матриця планування експерименту. Кожна точка плану ПФЕ відповідає одному складу суміші, з якої виготовлялись по три зразки бетону з подальшим випробуванням їх на стиск. Перед заливкою у форми визначалися рухливість суміші та її густина згідно з п. 2.3.2.

Таблиця 4.9.

Матриця планування експерименту

№ дослід (точка плану)	Кодовані значення факторів		Натуральні значення факторів	
	x_1	x_2	Ц/В	витрата води В, л/м ³
1	2	3	4	5
1	+1	+1	2,14	220
2	-1	+1	1,92	220
3	+1	-1	2,14	187
4	-1	-1	1,92	187
5	0	0	2,03	203,5

4.3.4. Розрахунок складів бетонних сумішей на РКЗ в інших комбінаціях рівнів варіювання

Розрахунок складів на інших рівнях варіювання факторів згідно з табл. 4.9 виконувався в послідовності, наведеній в п. 4.3.2. Результати розрахунків наведені в таблицях 4.10÷4.13

Таблиця 4.10.

Склади та характеристики бетонних сумішей на РКЗ на рівнях варіювання факторів «+1»

	C1		C2		C3	
	на 1 м ³	на 3,5 л	на 1 м ³	на 3,5 л	на 1 м ³	на 3,5 л
1	2	3	4	5	6	7
Цемент, кг	471	1,649	471	1,649	471	1,649
Вода, л	220	0,770	220	0,770	220	0,770
Пісок, кг	547	1,916	526	1,842	537	1,879
Щебінь, кг	1052	3,682	1044	3,652	1046	3,660
Розрахункова середня густина бетонної суміші, кг/м ³	2291	2291	2261	2261	2274	2274
Абсолютний об'єм матеріалів, л	1000	3,5	1000	3,5	1000	3,5

Таблиця 4.11.

Склади та характеристики бетонних сумішей на РКЗ на рівнях варіювання фактору Ц/В «-1» та фактору В «+1»

	C1		C2		C3	
	на 1 м ³	на 3,5 л	на 1 м ³	на 3,5 л	на 1 м ³	на 3,5 л
1	2	3	4	5	6	7
Цемент, кг	423	1,481	423	1,481	423	1,481

Продовження таблиці 4.11

1	2	3	4	5	6	7
Вода, л	220	0,770	220	0,770	220	0,770
Пісок, кг	576	2,016	555	1,943	566	1,980
Щебінь, кг	1063	3,720	1054	3,689	1056	3,697
Розрахункова середня густина бетонної суміші, кг/м ³	2282	2282	2252	2252	2265	2265
Абсолютний об'єм матеріалів, л	1000	3,5	1000	3,5	1000	3,5

Таблиця 4.12.

Склади та характеристики бетонних сумішей на РКЗ на рівні варіювання фактору Ц/В «+1» та фактору В «-1»

	C1		C2		C3	
	на 1 м³	на 3,5 л	на 1 м³	на 3,5 л	на 1 м³	на 3,5 л
1	2	3	4	5	6	7
Цемент, кг	400	1,401	400	1,401	400	1,401
Вода, л	187	0,655	187	0,655	187	0,655
Пісок, кг	674	2,359	653	2,286	664	2,323
Щебінь, кг	1068	3,739	1059	3,706	1061	3,715
Розрахункова середня густина бетонної суміші, кг/м ³	2329	2329	2299	2299	2313	2313
Абсолютний об'єм матеріалів, л	1000	3,5	1000	3,5	1000	3,5

Таблиця 4.13.

Склади та характеристики бетонних сумішей на РКЗ на рівні варіювання факторів «0»

	C1		C2		C3	
	на 1 м ³	на 3,5 л	на 1 м ³	на 3,5 л	на 1 м ³	на 3,5 л
1	2	3	4	5	6	7
Цемент, кг	414	1,448	414	1,448	414	1,448
Вода, л	203,5	0,712	203,5	0,712	203,5	0,712
Пісок, кг	624	2,184	603	2,110	614	2,147
Щебінь, кг	1065	3,728	1056	3,696	1059	3,705
Розрахункова середня густина бетонної суміші, кг/м ³	2306	2306	2276	2276	2289	2289
Абсолютний об'єм матеріалів, л	1000	3,5	1000	3,5	1000	3,5

4.4. Виготовлення зразків-кубів з бетонних сумішей на НЗ та РКЗ, визначення рухливості та густини бетонних сумішей

Експериментом передбачалось виготовлення зразків-кубів з довжиною ребра 100 мм.

Для зменшення впливу умов навколишнього середовища на процес виготовлення зразків для кожної суміші РКЗ досліди виконувались не в порядку запису, їх послідовність визначалась за допомогою генератора випадкових чисел.

Зважені на електронних вагах з точністю до 1 г суміші крупного заповнювача та піску засипались в попередньо зволожену чашу планетарного змішувача примусової дії і перемішувались протягом 1 хвилини. Після цього в змішувач засипався цемент. Після перемішування сухої суміші протягом 2 хвилин в працюючий змішувач поступово доливалась розрахована порція води. Барабан з мокрою сумішшю обертався протягом 3 хвилин.

Після замішування визначалась консистенція утвореної суміші за методикою, наведеною у п. 2.3.2.

Виготовлення зразків виконувалось у відповідності до [13]. Бетонна суміш укладалася в 3-4 шари в металеві форми зі змащеними стінками. Для визначення густини сумішей змащені форми попередньо зважувались. Ущільнення виконувалося пошарово вручну за допомогою металевого стрижня. Після заповнення форм здійснювалося додаткове ущільнення на вібростолі протягом 1 хвилини або до утворення цементного молочка на верхніх поверхнях.

Результати визначення РК та густини кожної дослідної суміші наведені в графічному вигляді на рис. 4.3, рис. 4.4 та у табл. 4.14. Як видно з діаграм, кількісні залежності між складами РКЗ та рухливістю і густинами бетонних сумішей не простежується. Очевидно, що в кожному окремому об'ємі РКЗ його питома вага та водопоглинання порами заповнювача є різними через різний вміст залишкового розчину.

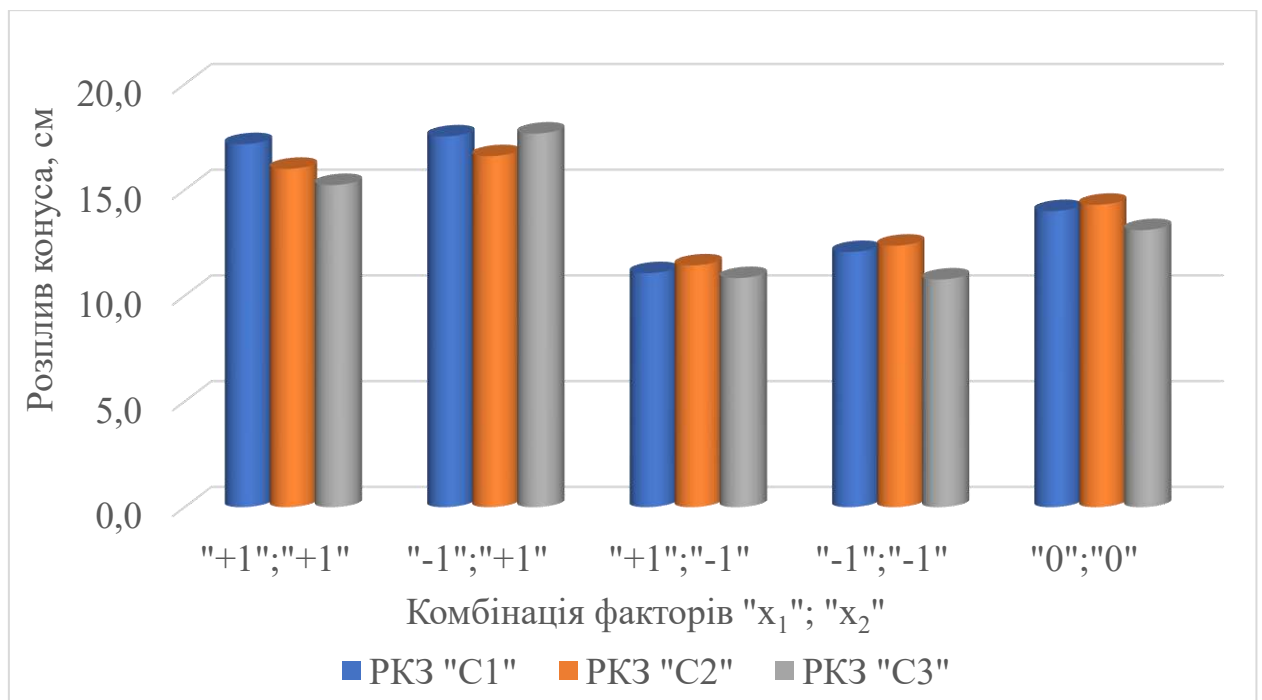


Рисунок 4.3. Порівняльна діаграма рухливостей бетонних сумішей з РКЗ

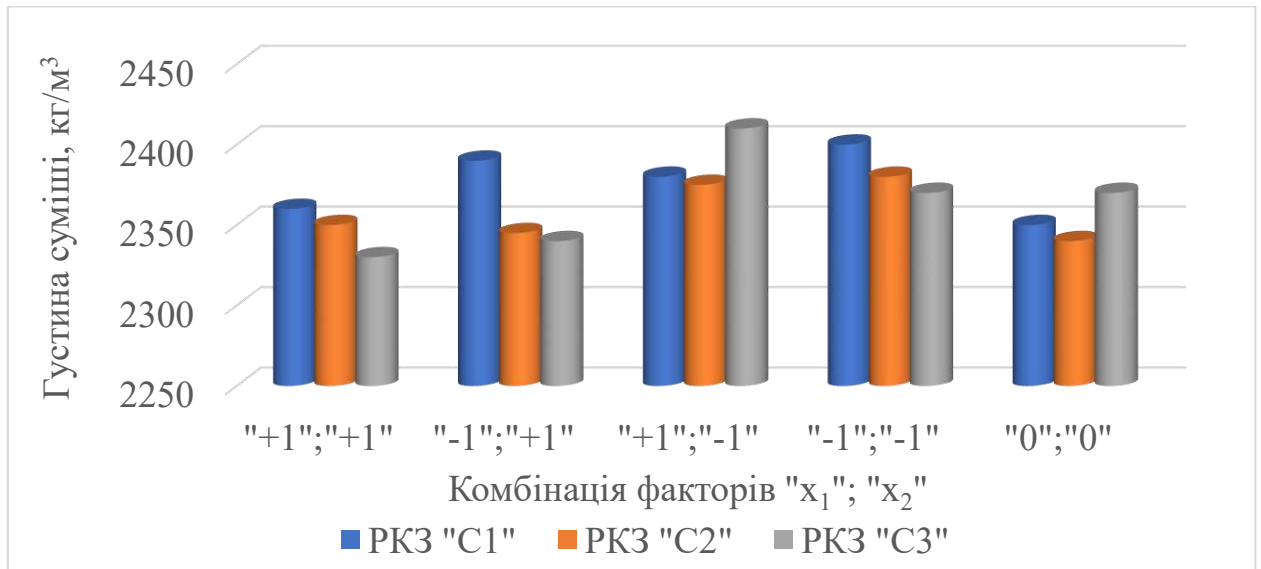


Рисунок 4.4. Порівняльна діаграма густин бетонних сумішей з РКЗ

Таблиця 4.14.

Результати визначення консистенції та густини бетонних сумішей

Суміш крупного заповнювача	Кодовані значення факторів		Густина суміші, кг/м ³	РК, см			
	x ₁	x ₂		y ₁	y ₂	y ₃	\bar{y}
1	2	3	4	5	6	7	8
НЗ	-1	-1	2450	13,9	14,4	14,3	14,2
ПКЗ С1	+1	+1	2360	17,6	17,0	16,9	17,2
	-1	+1	2390	18,0	17,4	17,2	17,5
	+1	-1	2380	11,2	11,0	11,0	11,1
	-1	-1	2400	12,2	11,9	12,1	12,1
	0	0	2350	13,8	14,2	14,1	14,0
ПКЗ С2	+1	+1	2350	15,7	15,9	16,4	16,0
	-1	+1	2345	15,8	17,2	16,8	16,6
	+1	-1	2375	11,4	11,5	11,4	11,4
	-1	-1	2380	12,3	12,3	12,5	12,4
	0	0	2340	14,6	14,0	14,2	14,3

Продовження таблиці 4.14

1	2	3	4	5	6	7	8
РКЗ СЗ	+1	+1	2330	14,6	15,4	15,7	15,2
	-1	+1	2340	18,7	16,9	17,4	17,7
	+1	-1	2410	11,0	10,7	10,8	10,8
	-1	-1	2370	11,0	10,7	10,6	10,8
	0	0	2370	13,2	13,2	12,9	13,1

Отримані густини сумішей виявились вищими за розрахункові. Очевидно частково збільшення густини досяглося за рахунок насичення пор РКЗ водою. Оскільки на етапі планування експерименту склади бетонних сумішей розраховувалися з умови їх відповідності складу бетону на НЗ, водопоглинання якого менше в декілька разів. Отже, при розрахунку витрати води не враховувався об'єм адсорбованої РКЗ води. Також ймовірно в процесі замішування суміші в змішувачі відбулося додаткове руйнування слабких зерен РКЗ, що разом з механічним впливом під час механічного ущільнення суміші та вібраційним впливом сприяло збільшенню щільності пакування зерен РКЗ.

Протягом 24...36 годин зразки тверднули в формах за температури 17...19°C та відносній вологості 90%. Після розпалублення зразки поміщались в камеру для тверднення в нормальних умовах згідно з [13].

4.5. Статистична обробка результатів визначення рухливості суміші

4.5.1. Розрахунок коефіцієнтів рівнянь регресії

За результатами експериментального визначення рухливості бетонних сумішей з РКЗ складаємо табл. 4.15 для розрахунку коефіцієнтів рівнянь регресії.

Таблиця 4.15.

Вихідні дані для розрахунку коефіцієнтів рівнянь регресії

Точка плану	РКЗ С1				РКЗ С2				РКЗ С3			
	\bar{y}	$\bar{y}x_1$	$\bar{y}x_2$	$\bar{y}x_1x_2$	\bar{y}	$\bar{y}x_1$	$\bar{y}x_2$	$\bar{y}x_1x_2$	\bar{y}	$\bar{y}x_1$	$\bar{y}x_2$	$\bar{y}x_1x_2$
1	17,2	17,2	17,2	17,2	16,0	16,0	16,0	16,0	15,2	15,2	15,2	15,2
2	17,5	-17,5	17,5	-17,5	16,6	-16,6	16,6	-16,6	-17,7	17,7	-17,7	-17,7
3	11,1	11,1	-11,1	-11,1	11,4	11,4	-11,4	-11,4	10,8	-10,8	-10,8	10,8
4	12,1	-12,1	-12,1	12,1	12,4	-12,4	-12,4	12,4	-10,8	-10,8	10,8	-10,8
5	14,0	0	0	0	14,3	0	0	0	13,1	0	0	0
$\sum_1^{N_1}$	57,8	-1,4	11,6	0,6	56,4	-1,5	8,8	0,3	54,5	-2,4	11,3	-2,5

Підставивши значення з таблиці 4.15 в рівняння (4.2)÷(4.4) отримаємо коефіцієнти рівнянь регресії (див. табл. 4.16).

Таблиця 4.16.

Коефіцієнти рівнянь регресії для визначення рухливості бетонних сумішей

Параметр	Коефіцієнти рівнянь регресії			
	b_0	b_1	b_2	b_{12}
Рухливість суміші з РКЗ С1	14,5	-0,3	2,9	0,2
Рухливість суміші з РКЗ С2	14,1	-0,4	2,2	0,1
Рухливість суміші з РКЗ С3	13,6	-0,6	2,8	-0,6

Як видно з табл. 4.16 без урахування значимості коефіцієнтів рівнянь регресії вплив фактора Ц/В є негативним на рухливість сумішей з РКЗ.

4.5.2. Статистичний аналіз результатів дослідження

Визначаємо статистичні параметри:

1) число ступенів вільності:

$$f = N_1 \cdot (r - 1), \quad (4.8)$$

де r – число дослідів у кожній точці плану

2) середнє квадратичне відхилення

$$S_{\{y\}} = \sqrt{\frac{\sum_1^{rN_1} (\bar{y}_u - y_{uk})^2}{f}}, \quad (4.9)$$

y_{uk} – експериментально встановлена властивість бетону в k -му досліді в точці плану u , $k=1, 2, \dots, r$

3) середня квадратична похибка у визначенні коефіцієнтів рівнянь регресії

$$S_{\{b_0\}} = S_{\{b_i\}} = S_{\{b_{ij}\}} = \frac{S_{\{y\}}}{\sqrt{N_1}}, \quad (4.10)$$

4) експериментальне значення t_i -критерію Стюдента:

$$t_i = \frac{|b_i|}{S_{\{b_i\}}}, \quad (4.11)$$

Отримані експериментальні значення критерію Стюдента для кожного коефіцієнта рівнянь регресії порівнюємо з табличним значенням t_T (табл. Б.2 [21]):

$$f = N_1 \cdot (r - 1) = 8 \rightarrow t_T = 2,31$$

Всі коефіцієнти рівнянь регресії, для яких $t_i < t_T$, є незначимими і прирівнюються до 0.

В табл. 4.17 наведені розраховані статистичні показники. В таблиці підкреслені показники критерію Стюдента t_i , для яких коефіцієнти рівнянь регресії є незначимими.

Таблиця 4.17.

Результати розрахунку статистичних показників рівнянь регресії для визначення рухливості бетонних сумішей

Параметр	Статистичні показники					
	$S_{\{y\}}$	$S_{\{b_i\}}$	t_i для коефіцієнтів			
			b_0	b_1	b_2	b_{12}
1	2	3	4	5	6	7
Рухливість суміші з РКЗ С1	0,297	0,149	97,29	<u>2,30</u>	19,46	<u>1,07</u>
Рухливість суміші з РКЗ С2	0,408	0,204	69,08	<u>1,88</u>	10,78	<u>0,41</u>
Рухливість суміші з РКЗ С3	0,560	0,280	48,68	<u>2,11</u>	10,09	<u>2,23</u>

Підставивши отримані коефіцієнти рівнянь регресії у рівняння (4.1) з урахуванням їх значимості, математична модель рухливості бетонної суміші для кожної суміші заповнювачів у кодованому виразі змінних матиме вигляд:

$$- \text{С1:} \quad \hat{y}_{\text{С1}} = 14,5 + 2,9x_2 \quad (4.12)$$

$$- \text{С1:} \quad \hat{y}_{\text{С2}} = 14,1 + 2,2x_2 \quad (4.13)$$

$$- \text{С1:} \quad \hat{y}_{\text{С3}} = 13,6 + 2,8x_2 \quad (4.14)$$

Таким чином, можна зробити висновок про відсутність впливу Ц/В (фактору x_1) на рухливість бетонної суміші з РКЗ.

4.5.3. Перевірка адекватності рівнянь регресії

Для перевірки придатності отриманих рівнянь необхідно обчислити критерій Фішера.

Визначаємо дисперсію адекватності для кожного рівняння:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^{N_{\square}} (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2}{N - m}, \quad (4.15)$$

де N – кількість точок плану, включаючи нульові ($N=5$);

m – кількість значимих коефіцієнтів ($m=2$).

Після цього визначаємо розрахункове значення критерію Фішера:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_{\{y\}}^2} \quad (4.16)$$

Результати розрахунку критерію Фішера для кожної суміші РКЗ наведені у табл. 4.18.

Таблиця 4.18.

Дисперсія адекватності рівнянь регресії та розрахункові значення критерію Фішера

Суміш РКЗ	Точка плану	x ₁	x ₂	\bar{y}_u	\hat{y}_u	$(\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2$	$S_{ад}^2$	F_p
1	2	3	4	5	6	7	8	9
РКЗ С1	1	+1	+1	17,2	17,4	0,04	0,267	3,03
	2	-1	+1	17,5	17,4	0,01		
	3	+1	-1	11,1	11,6	0,25		
	4	-1	-1	12,1	11,6	0,25		
	5	0	0	14,0	14,5	0,25		
Σ						0,8		
РКЗ С2	1	+1	+1	16,0	16,3	0,09	0,240	1,44
	2	-1	+1	16,6	16,3	0,09		
	3	+1	-1	11,4	11,9	0,25		
	4	-1	-1	12,4	11,9	0,25		
	5	0	0	14,3	14,1	0,04		
Σ						0,72		
РКЗ С3	1	+1	+1	15,2	16,4	1,44	1,127	3,59
	2	-1	+1	17,7	16,4	1,69		
	3	+1	-1	10,8	10,8	0		
	4	-1	-1	10,8	10,8	0		
	5	0	0	13,1	13,6	0,25		
Σ						3,38		

Умова придатності рівнянь регресії:

$$F_p < [F], \quad (4.17)$$

де $[F]=4,1$ – табличне значення критерію Фішера згідно з табл. Б.3 [21].

Отже, отримані рівняння регресії для кожної суміші РКЗ є адекватними.

4.6. Розрахунок поправки на витрату води на РКЗ

Суть поправки на витрату води за умови застосування РКЗ зводиться до отримання такої витрати води, за якої консистенція отриманої бетонної суміші з РКЗ буде відповідати консистенції суміші на НЗ.

Розв'яжемо рівняння (4.12), (4.13), (4.14), прирівнявши їх ліві частини до значення рухливості суміші на НЗ (див. табл. 4.14) і отримаємо значення фактора x_2 в кодованому вигляді:

$$14,2 = 14,5 + 2,9x_2 \rightarrow x_2 = -0,1$$

$$14,2 = 14,1 + 2,2x_2 \rightarrow x_2 = 0,05$$

$$14,2 = 13,6 + 2,8x_2 \rightarrow x_2 = 0,21$$

Помноживши кодовані значення фактора на інтервал варіювання фактора «В» отримаємо натуральні значення фактора x_2 . Тоді шукані значення поправок на витрату води обчислюються за формулою:

$$\Delta V_x = V_0 + x_2 \Delta X_2 - V_{-1}, \quad (4.18)$$

де V_0 – витрата води на нульовому рівні, л;

ΔX_2 – інтервал варіювання фактора x_2 , л;

V_{-1} – витрата води на рівні варіювання «-1», л.

– С1: $\Delta V_x = 203,5 + (-0,1) \cdot 16,5 - 187 \approx 15$ л

– С2: $\Delta V_x = 203,5 + 0,05 \cdot 16,5 - 187 \approx 17$ л

– С3: $\Delta V_x = 203,5 + 0,21 \cdot 16,5 - 187 \approx 20$ л

Отримані значення поправки на витрату води підлягають уточненню за рахунок наявності в сумішах РКЗ деякої кількості зерен, менших 5 мм (див. табл. 3.6). Згідно з табл. 10.4 [21] при збільшенні в щербні часток менше, ніж

5 мм більше, ніж на 5%, на кожний відсоток зверху необхідно додавати 1 л води. В такому випадку уточнені значення поправок на воду становлять:

- С1: $\Delta V_x = 15 - 0 = 15$ л
- С2: $\Delta V_x = 17 - 1 = 16$ л
- С3: $\Delta V_x = 20 - 3 = 17$ л

Таким чином, поправка на витрату воду на походження крупного заповнювача в бетонних сумішах з РКЗ становить 15÷17 л. Очевидно, що визначені поправки не є абсолютними, а залежать від вмісту РКЗ. Враховуючи, що цільовим складом були склади бетонів на рівні варіювання «-1»; «-1», то відносна поправка витрати води на походження крупного заповнювача становить (у відсотках від вмісту РКЗ за масою):

- С1: $\Delta V_x = 1,4\%$
- С2: $\Delta V_x = 1,5\%$
- С3: $\Delta V_x = 1,6\%$

4.7. Фізико-механічні випробування зразків з бетону на НЗ та РКЗ

Після тверднення протягом 28 діб в нормальних умовах зразки-куби підлягали обмірюванню та зважуванню для визначення густини бетону та площі поверхні, до якої прикладатиметься стискаюче навантаження. Випробування зразків на міцність на стиск виконувалось на гідравлічному пресі П-125 згідно з [13].

Результати випробування бетону з НЗ на міцність на стиск наведені у табл. 4.19.

Таблиця 4.19.

Результати випробувань зразків-кубів з бетону на НЗ

Номер зразка	Розміри, мм	Маса, г	Густина, г/см ³	Руйнівне зусилля, кН	Міцність, $f_{c,cube}$, МПа
НЗ.1	100 x 100 x 100	2296	2,296	263,75	25,06
НЗ.2	100 x 99 x 100	2307	2,330	237,50	22,79
НЗ.3	100 x 99 x 100	2313	2,336	253,75	24,35
НЗ.4	100 x 100 x 100	2301	2,301	261,25	24,82
НЗ.5	101 x 100 x 100	2314	2,291	251,25	23,63
НЗ.6	101 x 100 x 100	2304	2,281	288,75	27,16

Обробка результатів та визначення міцності бетону на НЗ виконувались у відповідності до [15]:

- середня міцність $f_c = 24,63$ МПа;
- коефіцієнт варіації $V_{cm} = 7,1\%$;
- коефіцієнт необхідної міцності $k_t = 1,08$;
- фактичний клас міцності $C_n = 22,8$ МПа $\rightarrow C18/22,5$.

Результати випробувань зразків-кубів бетону з РКЗ на міцність на стиск для кожного складу суміші в кожній точці плану (згідно з табл. 4.9) наведені у табл. 4.20. В цій же таблиці наведені результати статистичної обробки результатів випробувань та розраховані отримані класи міцності бетону.

Таблиця 4.20.

Результати випробувань зразків-кубів з бетону на РКЗ

Склад	Точка плану	Номер зразка	Розміри, мм	Маса, г	Густина, г/см ³	Руйнівне зусилля, кН	Міцність, $f_{c.cube}$, МПа	Середня міцність, МПа	Коеф. варіації, %	Коеф. міцності	Клас бетону	Водопоглинання, W_m , %	Глибина карбонізації, мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
С1	1	1	100 x 101 x 100	2289	2,266	281,25	26,45	29,74	14,5	1,355	С16/20	3,51	0...2
		2	101 x 100 x 101	2296	2,251	308,75	29,04						
		3	100 x 100 x 100	2284	2,284	355,00	33,73						
	2	1	101 x 100 x 101	2281	2,236	275,00	25,87	24,5	5,7	1,07	С18/22,5	3,33	1...2
		2	100 x 100 x 101	2271	2,249	247,50	23,51						
		3	100 x 100 x 101	2300	2,277	253,75	24,11						
	3	1	101 x 100 x 100	2314	2,291	321,25	30,22	31,59	5,3	1,07	С20/25	2,97	0...2
		2	101 x 100 x 101	2327	2,281	351,25	33,04						
		3	101 x 100 x 100	2320	2,297	335,00	31,51						
	4	1	100 x 100 x 102	2332	2,286	293,75	27,91	26,77	4,1	1,07	С20/25	3,30	0...2
		2	99 x 100 x 100	2264	2,287	271,25	26,03						
		3	100 x 100 x 100	2260	2,260	277,50	26,36						
	5	1	101 x 100 x 100	2276	2,253	311,00	29,25	28,68	3,5	1,07	С20/25	3,32	0...1
		2	101 x 100 x 101	2280	2,235	311,00	29,25						
		3	100 x 100 x 100	2267	2,267	290,00	27,55						

Продовження таблиці 4.20

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
C2	1	1	100 x 100 101	2306	2,283	292,50	27,79	30,24	11,2	1,19	C20/25	3,61	1...2
		2	100 x 100 101	2268	2,246	352,50	33,49						
		3	100 x 100 101	2265	2,243	310,00	29,45						
	2	1	101 x 101 x 101	2261	2,195	258,50	24,07	24,14	6,7	1,08	C16/20	3,60	1...2
		2	101 x 100 x 101	2260	2,215	242,50	22,81						
		3	100 x 100 x 101	2232	2,210	268,75	25,53						
	3	1	101 x 99 100	2309	2,309	348,00	33,06	31,32	9,2	1,12	C20/25	3,34	0...2
		2	101 x 100 100	2327	2,304	300,00	28,22						
		3	101 x 100 100	2321	2,298	347,50	32,69						
	4	1	100 x 100 x 100	2277	2,277	281,75	26,77	26,42	6,0	1,07	C18/22,5	3,51	0...1
		2	101 x 100 x 101	2297	2,252	293,25	27,58						
		3	101 x 100 x 101	2324	2,278	264,75	24,90						
	5	1	100 x 100 x 101	2290	2,267	263,75	25,06	27,75	8,6	1,1	C20/25	3,37	0...2
		2	100 x 100 x 100	2274	2,274	306,25	29,09						
		3	100 x 100 x 100	2261	2,261	306,25	29,09						

Продовження таблиці 4.20

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
C3	1	1	100 x 100 x 100	2251	2,251	345,00	32,78	32,03	3,9	1,07	C20/25	3,72	0...1
		2	100 x 100 x 100	2245	2,245	322,50	30,64						
		3	101 x 100 x 101	2307	2,262	347,50	32,69						
	2	1	100 x 100 x 101	2268	2,246	245,00	23,28	25,69	10,7	1,17	C16/20	3,50	0...2
		2	99 x 100 x 100	2242	2,265	290,75	27,90						
		3	100 x 100 x 100	2256	2,256	272,50	25,89						
	3	1	101 x 100 100	2313	2,290	368,25	34,64	32,45	9,0	1,11	C20/25	3,22	0...2
		2	100 x 100 x 101	2351	2,328	312,50	29,69						
		3	101 x 100 x 101	2332	2,286	351,25	33,04						
	4	1	99 x 100 x 100	2294	2,317	287,50	27,59	26,59	6,4	1,075	C18/22,5	3,46	0...1
		2	100 x 100 x 100	2308	2,308	260,00	24,70						
		3	99 x 101 x 100	2317	2,317	289,25	27,48						
	5	1	100 x 100 x 100	2285	2,285	335,00	31,83	28,7	14,0	1,33	C16/20	3,49	1...2
		2	100 x 100 x 100	2285	2,285	263,75	25,06						
		3	100 x 100 x 100	2283	2,283	307,50	29,21						

На рисунках 4.5÷4.7 наведені графічні інтерпретації результатів випробувань зразків на міцність. Очікувано зразки з більшим Ц/В (рівень варіювання фактора x_1 «+1») показали більшу міцність бетону. Звертає на себе увагу, що за однакового Ц/В міцність бетону зразків з меншою витратою води (рівень варіювання фактора x_2 «-1») виявилась більшою, ніж у зразках з більшим вмістом води (рівень варіювання фактора x_2 «-1»). Цей ефект спостерігається незалежно від складу сумішей РКЗ, з яких виготовлялися зразки. Враховуючи пряму залежність між Ц/В та міцністю бетону, можна зробити висновок, про те, що реальний Ц/В в сумішах з меншою кількістю води є більшим від розрахункового. Очевидно, такий ефект пов'язаний з наявністю в РКЗ пористого залишкового розчину, з яким вода миттєво вступає в контакт і заповнює його пори, таким чином збільшуючи Ц/В в контактних зонах між РКЗ та матрицею розчину.

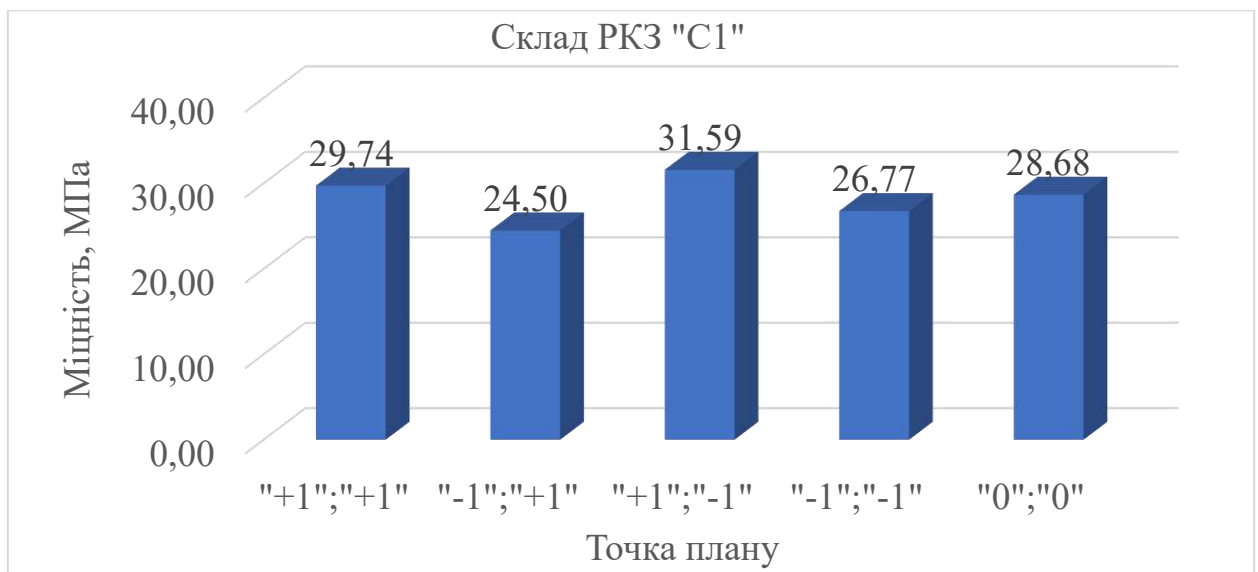


Рисунок 4.5. Графічне відображення результатів визначення міцності зразків бетону з РКЗ (суміш С1)

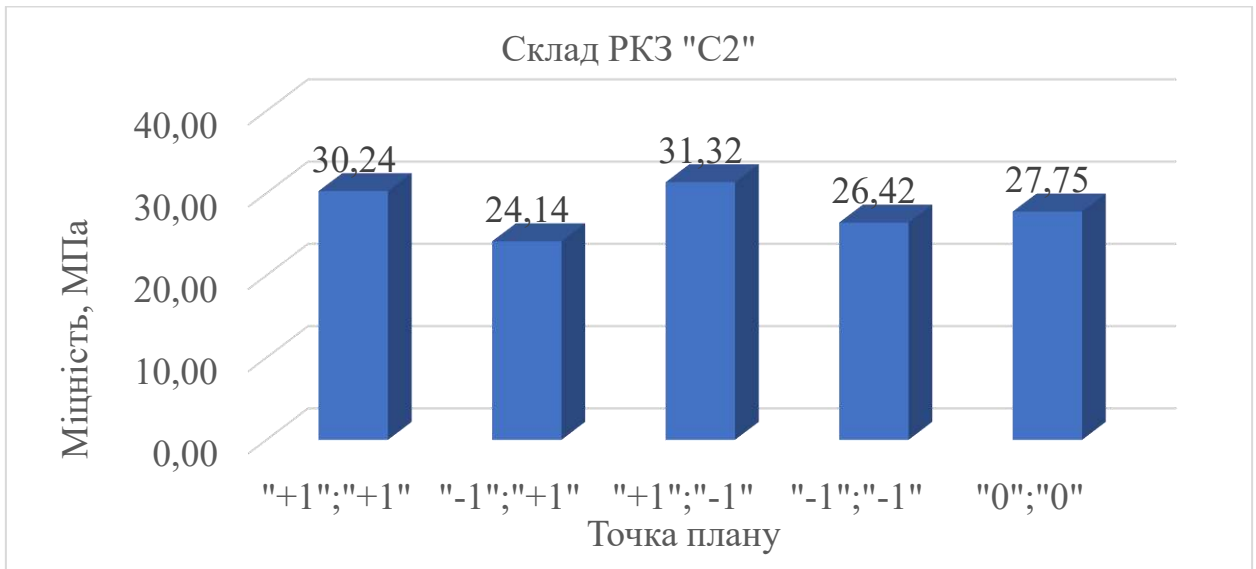


Рисунок 4.6. Графічне відображення результатів визначення міцності зразків бетону з РКЗ (суміш С2)

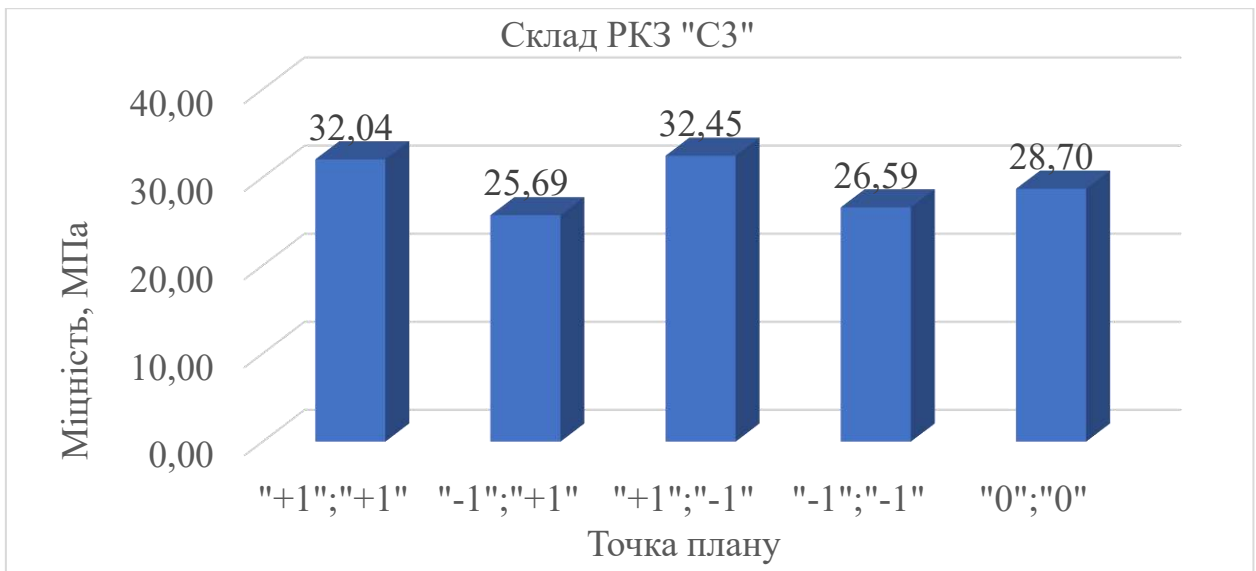


Рисунок 4.7. Графічне відображення результатів визначення міцності зразків бетону з РКЗ

На рис. 4.8 наведена порівняльна діаграма, на якій в кожній точці плану наведені результати визначення міцності кожного складу РКЗ. Середня міцність бетону з суміші С3, яка виготовлялась з подрібненого бетону найбільшої міцності, виявилась найвищою в кожній точці плану з максимальною різницею 9,5% (в точці плану 2). Але середні міцності бетону

зі складів С1 та С2 в окремих точках плану не корелюють з міцностями бетону-джерела. Крім цього під час обробки результатів випробування зразків на РКЗ складу С3 отримані великі коефіцієнти варіації, внаслідок чого класи міцності бетону виявились низькими. З цього можна зробити висновок, що міцність бетону-джерела не впливає суттєвим чином на міцність бетону з РКЗ. Тобто очевидно, що за однакових умов подрібнення та підбору сумішей крупних заповнювачів на міцність бетону з РКЗ головним чином впливає Ц/В, витрата води та вміст РКЗ.

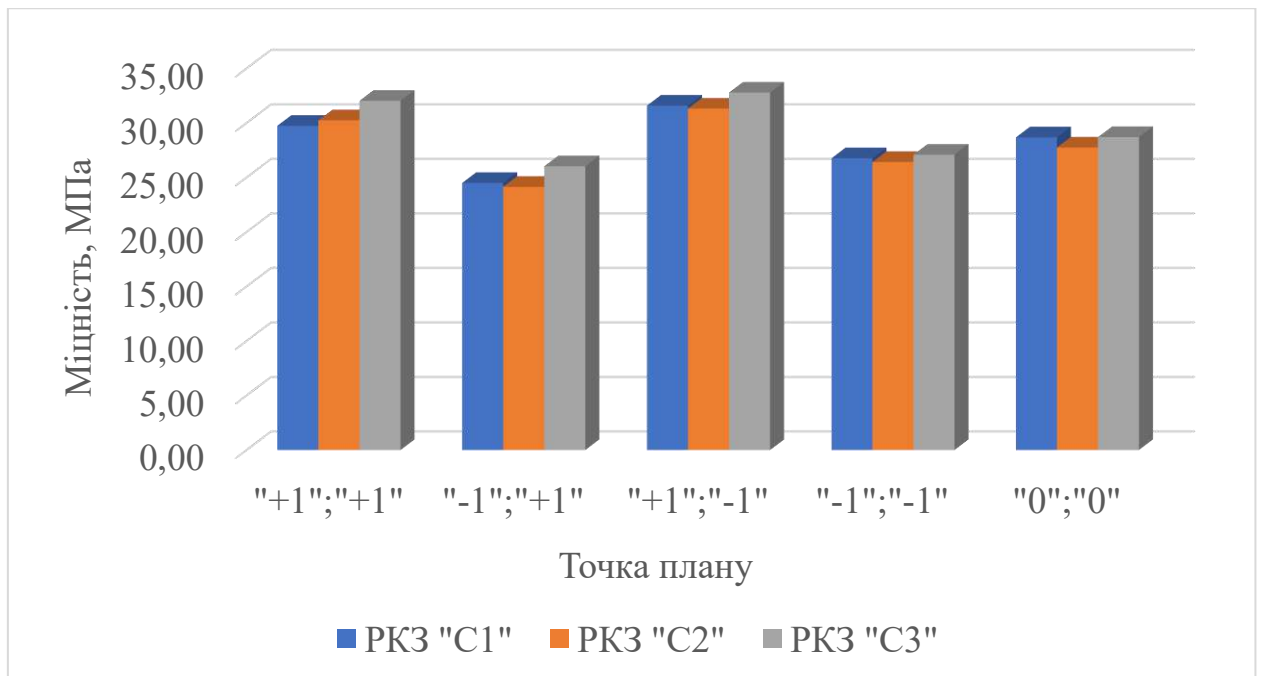


Рисунок 4.8. Порівняльна діаграма міцностей зразків бетону з РКЗ

При візуальному огляді зразків-кубів з витратою води на рівні варіювання «-1» на поверхнях, що доторкалися до стінок форм, виявлені раковини і каверни діаметром 1...3 мм і численні відкриті пори діаметром до 0,5 мм (рис. 4.9, а). Очевидно, під час тверднення відбувалось втягування води з поверхонь кубів, де вона скупчилась в процесі віброущільнення, поверхнями пористих залишкових розчинів на РКЗ. На поверхнях зразків з витратою води на рівні варіювання «+1» такі пори практично відсутні (рис. 4.9, б).

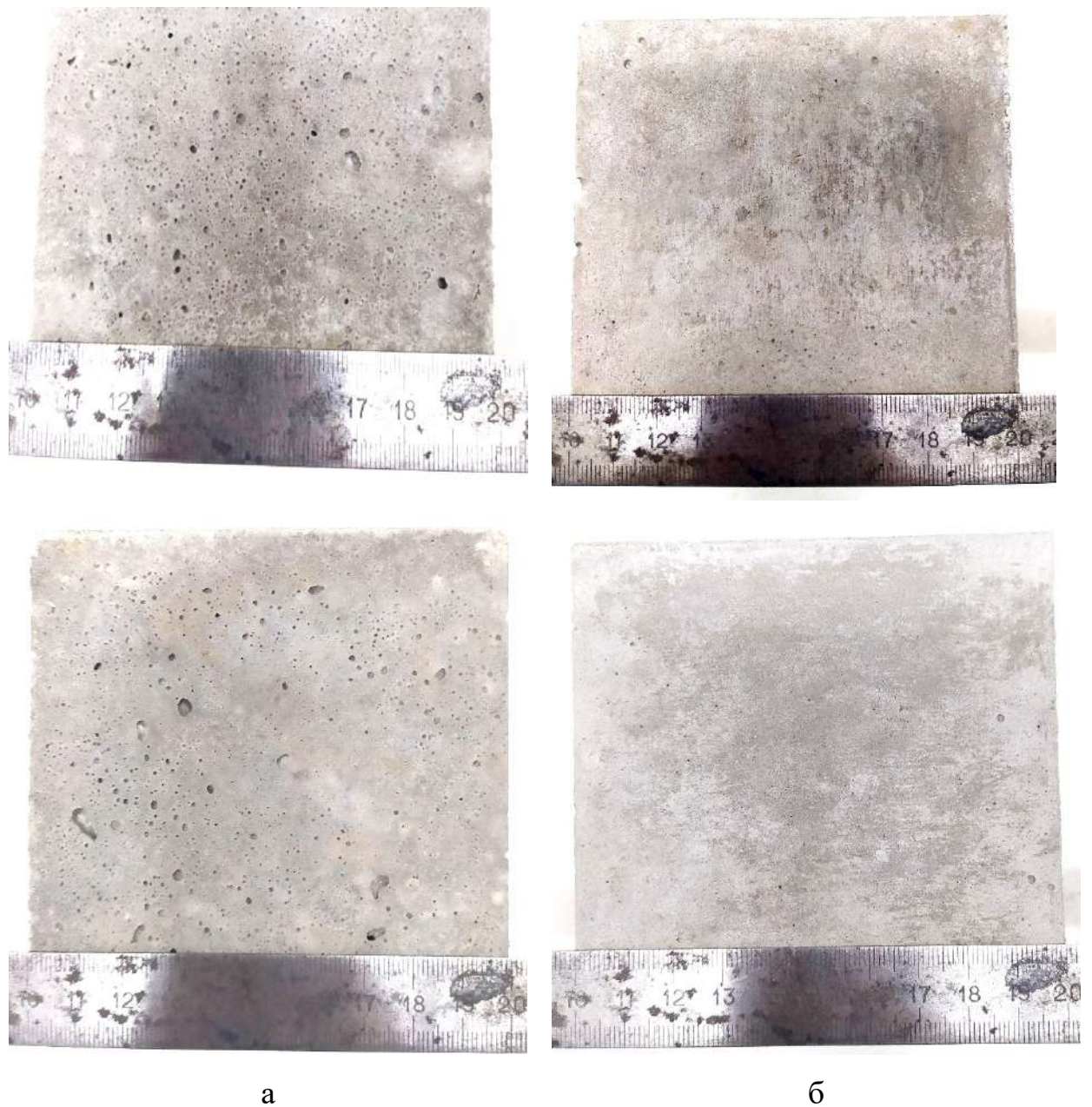


Рисунок 4.9. Характерні поверхні зразків-кубів бетону з РКЗ: а – витрата води на рівні варіювання «-1»; б – витрата води на рівні варіювання «+1»

Характер руйнувань повністю відповідає руйнуванню зразків-кубів з традиційного бетону (див. рис. 4.10).



Рисунок 4.10. Характер руйнування зразків з РКЗ

На фрагментах зруйнованих зразків досить чітко проглядаються зерна РКЗ. На рис. 4.11 наведені світлини, на яких видно зерна РКЗ, що складаються з натурального щебня та залишкового розчину, а також зерна, що повністю складаються з залишкового розчину. При цьому площі поверхонь РКЗ, що потрапили в злам фрагментів є порівняно невеликими з площами матриці нового розчину. Очевидно, руйнування зразків в основному відбулося по новому розчину, а не по залишковому розчину або по МКЗ між РКЗ та новим розчином, що підтверджує високу адгезію між РКЗ та новим розчином.

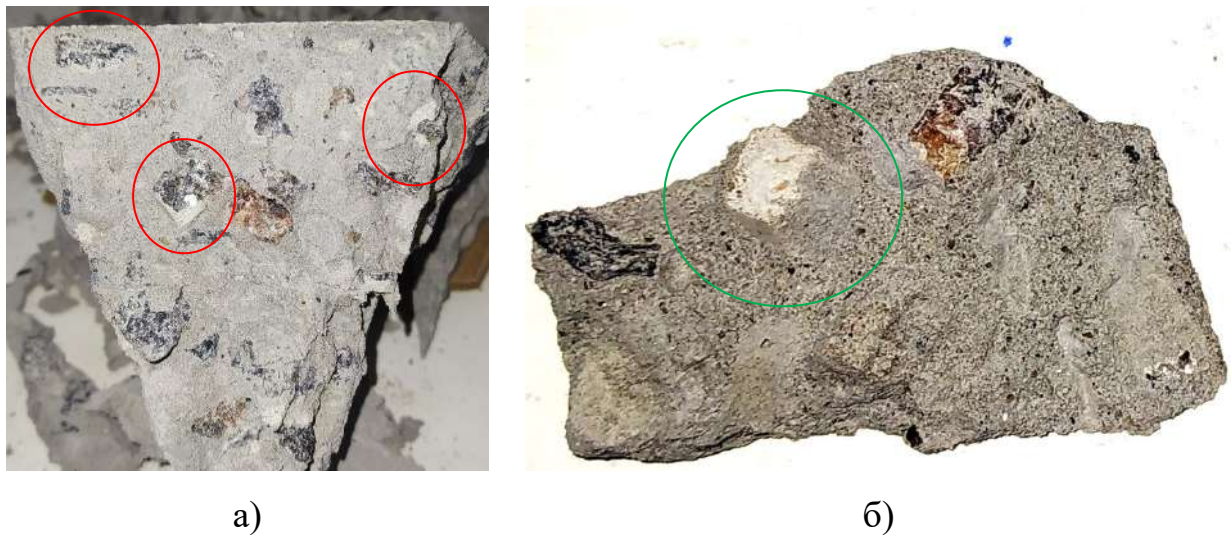


Рисунок 4.11. Фрагменти бетону з РКЗ: а – в червоних еліпсах зерна РКЗ, що складаються з натурального щебеню та залишкового розчину; б – зеленим еліпсом обведене зерно РКЗ, що складається лише з залишкового розчину

Отримані густини бетону в цілому корелюють з Ц/В та витратою води: найбільша густина у зразків з найбільшим Ц/В та найменшою витратою води, найменша густина у зразках з найменшим Ц/В та найбільшою витратою води (рис. 4.12).

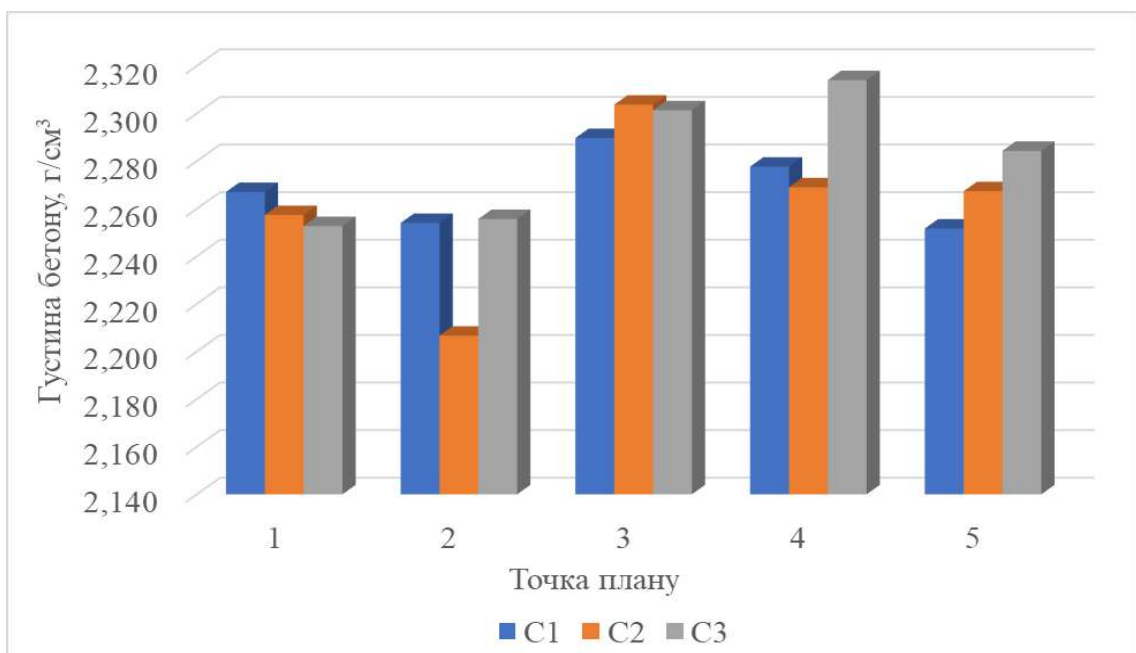


Рисунок 4.12. Середня густина зразків бетону з РКЗ

Глибина карбонізації бетону на всіх зразках у віці бетону 2 місяці не перевищувала 2 мм (рис. 4.13).

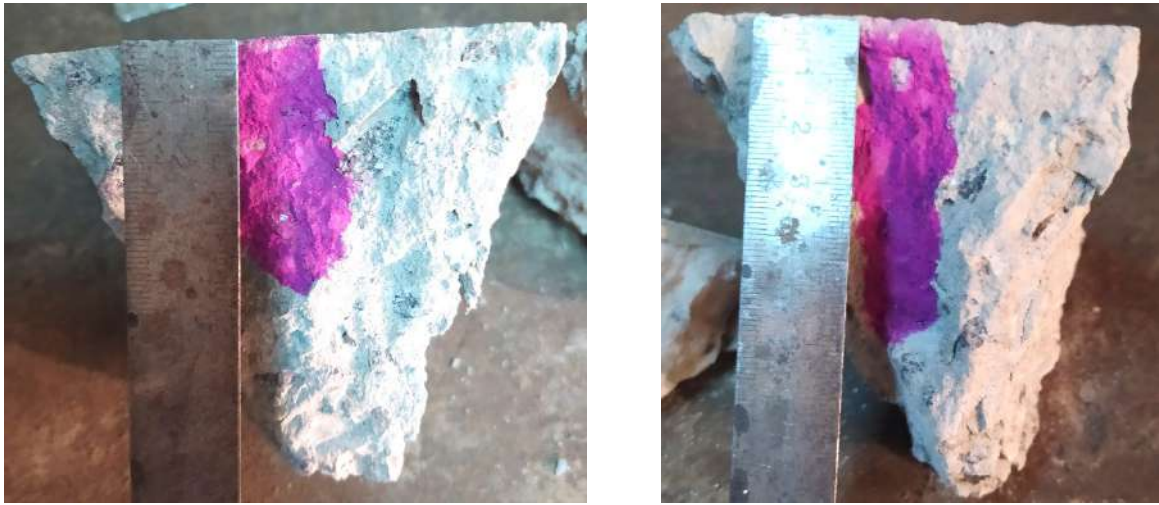


Рисунок 4.13. Глибина карбонізація бетону з РКЗ у віці 2 місяці

4.8. Статистична обробка результатів визначення міцності бетону з РКЗ

Статистична обробка виконується в порядку, наведеному в п. 4.5.

За результатами визначення міцності бетону з РКЗ встановлені вихідні дані для розрахунку коефіцієнтів рівнянь регресії (див. табл. 4.21).

Таблиця 4.21.

Вихідні дані для розрахунку коефіцієнтів рівнянь регресії

Точка плану	С1				С2			
	\bar{y}	\bar{yx}_1	\bar{yx}_2	\bar{yx}_1x_2	\bar{y}	\bar{yx}_1	\bar{yx}_2	\bar{yx}_1x_2
1	29,74	29,74	29,74	29,74	30,24	30,24	30,24	30,24
2	24,50	-24,50	24,50	-24,50	24,14	-24,14	24,14	-24,14
3	31,59	31,59	-31,59	-31,59	31,32	31,32	-31,32	-31,32
4	26,77	-26,77	-26,77	26,77	26,42	-26,42	-26,42	26,42
5	28,68	0	0	0	27,75	0	0	0
$\sum_1^{N_1}$	112,59	10,07	-4,12	0,42	112,12	11,01	-3,36	1,20

Продовження таблиці 4.21

Точка плану	С3			
	\bar{y}	\bar{yx}_1	\bar{yx}_2	\bar{yx}_1x_2
1	32,04	32,04	32,04	32,04
2	25,69	-25,69	25,69	-25,69
3	32,45	32,45	-32,45	-32,45
4	26,59	-26,59	-26,59	26,59
5	28,70	0,00	0,00	0,00
$\sum_1^{N_1}$	116,77	12,21	-1,31	0,48

Значення коефіцієнтів рівнянь регресії розраховані за формулами (4.2)÷(4.4) і наведені у табл. 4.22.

Таблиця 4.22.

Коефіцієнти рівнянь регресії для визначення міцності бетону з РКЗ

Параметр	Коефіцієнти рівнянь регресії			
	b_0	b_1	b_2	b_{12}
Міцність бетону з РКЗ, суміш С1	28,15	2,52	-1,03	0,10
Міцність бетону з РКЗ, суміш С2	28,03	2,75	-0,84	0,30
Міцність бетону з РКЗ, суміш С3	29,19	3,05	-0,33	0,12

Результати розрахунку статистичних показників за формулами (4.8) ÷ (4.11) наведені у табл. 4.23. Показники Стюдента для незначимих коефіцієнтів підкреслені.

Таблиця 4.23.

Статистичні показники для визначення міцності бетону з РКЗ

Параметр	Статистичні показники					
	$S_{\{y\}}$	$S_{\{b_i\}}$	t_i для коефіцієнтів			
			b_0	b_1	b_2	b_{12}
Міцність бетону з РКЗ, суміш С1	2,129	1,064	26,45	2,36	<u>0,97</u>	<u>0,1</u>
Міцність бетону з РКЗ, суміш С2	2,21	1,107	25,33	2,49	<u>0,76</u>	<u>0,27</u>
Міцність бетону з РКЗ, суміш С3	1,99	1,0	29,29	3,06	<u>0,33</u>	<u>0,12</u>

З урахуванням значимості коефіцієнтів математична модель міцності бетону з РКЗ у кодованому виразі змінних матиме вигляд:

$$- \text{С1:} \quad \hat{y}_{C1} = 28,15 + 2,52x_1 \quad (4.19)$$

$$- \text{С1:} \quad \hat{y}_{C2} = 28,03 + 2,75x_1 \quad (4.20)$$

$$- \text{С1:} \quad \hat{y}_{C3} = 29,19 + 3,05x_1 \quad (4.21)$$

Для перевірки адекватності отриманих рівнянь регресії виконується розрахунок критерію Фішера за формулами (4.15), (4.16) (див табл. 4.24).

Таблиця 4.24.

Дисперсія адекватності та розрахункові значення критерію Фішера

Суміш РКЗ	Точка плану	x_1	x_2	\bar{y}_u	\hat{y}_u	$(\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2$	$S_{ад}^2$	F_p
1	2	3	4	5	6	7	8	9
РКЗ С1	1	+1	+1	29,74	30,67	0,86	1,524	0,336
	2	-1	+1	24,50	25,63	1,28		
	3	+1	-1	31,59	30,67	0,85		
	4	-1	-1	26,77	25,63	1,30		
	5	0	0	28,68	28,15	0,28		
Σ						4,57		

Продовження таблиці 4.24

1	2	3	4	5	6	7	8	9
РКЗ С2	1	+1	+1	30,24	30,78	0,29	1,09	0,223
	2	-1	+1	24,14	25,28	1,3		
	3	+1	-1	31,32	30,78	0,29		
	4	-1	-1	26,42	25,28	1,3		
	5	0	0	27,75	28,03	0,08		
Σ						3,26		
РКЗ С3	1	+1	+1	32,04	32,24	0,04	0,24	0,06
	2	-1	+1	25,69	26,14	0,2		
	3	+1	-1	32,45	32,24	0,04		
	4	-1	-1	26,59	26,14	0,2		
	5	0	0	28,70	29,19	0,24		
Σ						0,72		

4.9. Розрахунок поправки коефіцієнта А на походження крупного заповнювача

Отримані міцності бетону зразків-кубів з РКЗ на рівні варіювання фактора Ц/В «-1», що відповідає значенню Ц/В для цільового складу бетону на НЗ, дорівнюють або навіть перевищують значення міцності аналогічного складу бетону на НЗ. Враховуючи, що міцність РКЗ є нижчою, ніж міцність НЗ, а міцність бетону визначається міцністю його складових, очевидно, що фактичний Ц/В бетону з РКЗ виявився вищим, ніж розрахунковий. Тобто частина води витрачається на заповнення пор РКЗ. Фактично експериментально підтверджені підходи до врахування водопотреби бетонної суміші, наведені в [67] (щодо РКЗ) та [8] (щодо бетонів будь-яких складів). Міцність бетону всіх зразків з однаковим Ц/В була вищою у тих, в яких витрата води була меншою. Таким чином, встановлена особливість утворення структури бетону з РКЗ: внаслідок першочергового заповнення

пор РКЗ водою замішування відбувається збільшення фактичного Ц/В в контактних зонах між РКЗ та новим розчином.

Отже, для розрахунку реального співвідношення Ц/В в цілях даної роботи необхідно виключити водопотребу РКЗ, яка фактично дорівнює поправці на витрату води на походження РКЗ, що розрахована в п. 4.6. Для цього скористаємось витратами води та цементу, що наведені в таблицях 4.7, 4.10÷4.13 (див. табл. 4.25).

Таблиця 4.25.

Розрахунок фактичного Ц/В експериментальних бетонних сумішей з РКЗ

Точка плану	Ц, кг	В, кг	Розрахунковий Ц/В	Поправка на «В», л	Фактичний Ц/В
1	471	220	2,14	15÷17	2,31
2	423	220	1,92	15÷17	2,07
3	400	187	2,14	15÷17	2,34
4	360	187	1,925	15÷17	2,11
5	414	203,5	2,03	15÷17	2,21

З табл. 4.25 видно, що на однакових рівнях варіювання різниця у фактичних Ц/В не перевищує 2%, тому для розрахунку поправки до коефіцієнта A доцільно застосувати усереднені значення фактичних Ц/В. Тоді відкориговані умови планування експерименту в частині фактора x_1 матимуть вигляд згідно з табл. 4.26.

Таблиця 4.26.

Умови планування експерименту (відкориговані) в частині Ц/В

Фактори		Рівень варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
Ц/В	x_1	2,09	2,21	2,33	0,12

Для визначення поправки до коефіцієнта A необхідно знайти таке Ц/В бетону на РКЗ, за якого його міцність буде рівною міцності бетону аналогічного складу на НЗ. Прирівнявши ліві частини рівнянь (4.19), (4.20) та (4.21) до величини міцності бетону на НЗ розв'яжемо рівняння відносно фактора x_1 в кодованому вигляді:

- С1: $24,63 = 28,15 + 2,52x_1 \rightarrow x_1 = -1,4$
- С2: $24,63 = 28,03 + 2,75x_1 \rightarrow x_1 = -1,24$
- С3: $24,63 = 29,19 + 3,05x_1 \rightarrow x_1 = -1,5$

Тоді шукане Ц/В бетону на РКЗ визначається за формулою:

$$\text{Ц/В}_{\text{РКЗ}} = \text{Ц/В}_0 + x_1 \Delta X_1, \quad (4.22)$$

де Ц/В_0 – Ц/В бетону з РКЗ на нульовому рівні;

ΔX_1 – інтервал варіювання фактора x_1 .

- С1: $\text{Ц/В}_{\text{РКЗ}} = 2,21 + (-1,4) \cdot 0,12 = 2,04$
- С2: $\text{Ц/В}_{\text{РКЗ}} = 2,21 + (-1,06) \cdot 0,12 = 2,06$
- С3: $\text{Ц/В}_{\text{РКЗ}} = 2,21 + (-1,66) \cdot 0,12 = 2,03$

Позначивши шукану поправку до коефіцієнта A як ΔA_i отримаємо:

$$A_{\text{РКЗ}} = A + \Delta A_i, \quad (4.23)$$

де $A=0,57$ – коефіцієнт, розрахований за формулою (1.3) за значеннями поправок з табл. 4.3.

Перетворивши рівняння (1.2) отримаємо:

$$\begin{aligned} \text{Ц/В}_{\text{РКЗ}} &= \frac{f_{cm}}{(A + \Delta A_i)R_c} + 0,5 \\ \Delta A_i &= \frac{f_{cm}}{(\text{Ц/В}_{\text{РКЗ}} - 0,5)R_c} - A \end{aligned} \quad (4.24)$$

Відповідно для кожної бетонної суміші з РКЗ отримаємо наступні значення поправок ΔA_i :

- С1: $\Delta A_i = -0,05$
- С2: $\Delta A_i = -0,055$
- С3: $\Delta A_i = -0,046$

Враховуючи, що різниця між поправками в залежності від суміші РКЗ не перевищує 10%, достатньо прийняти шукану поправку $\Delta A_i = -0,05$, і під час пробного замісу бетону з РКЗ за необхідності відкоригувати Ц/В.

Висновки за розділом 4

1. Удосконалений метод розрахунку складу важкого бетону, наведений в [21], шляхом введення додаткових поправок до коефіцієнта якості заповнювачів та витрати води, які враховують походження РКЗ. Експериментально встановлена додаткова витрата води у випадку застосування РКЗ для досягнення заданої рухливості бетонної суміші складає 1,4...1,6% від масового вмісту РКЗ в бетоні. Для досягнення необхідної міцності бетону з РКЗ необхідно збільшити Ц/В шляхом введення поправки $\Delta A_i = -0,05$ до коефіцієнту якості заповнювачів A на походження крупного заповнювача.

2. Встановлений механізм утворення структури бетону з РКЗ. За рахунок наявності пористого залишкового розчину в момент контакту води з РКЗ починається поглинання води пористими поверхнями заповнювача, що призводить до зниження рухливості бетонної суміші, а в затверділому цементному камені – до ущільнення цементного тіста. Зменшення об'єму цементного гелю (контракція) в бетоні з РКЗ пов'язане з капілярними явищами і починається в момент контакту води з залишковим розчином. Найбільш інтенсивно цей процес протікає в перші хвилини після замішування. За рахунок гідростатичного тиску вода потрапляє в пори залишкового розчину з усіх боків незалежно від напрямку руху води, в результаті чого повітря, що було в порах, затискається в середині них. Внаслідок цього об'єм поглинутої порами води завжди менший від об'єму пор, а тиск повітря в порах завжди вищий від атмосферного. Таким чином, в результаті капілярної контракції в контактній зоні між залишковим розчином РКЗ та цементним тістом виникає градієнт тиску, що сприяє покращенню

адгезії. Огляд зруйнованих на пресі фрагментів зразків бетону з РКЗ показав, що в основному руйнування відбувалось по новому розчину або по МКЗ між НЗ та залишковим розчином.

3. Встановлено, що міцність бетону з РКЗ не залежить від міцності бетону, після подрібнення якого отриманий РКЗ, а визначається, як і у випадку традиційного бетону, тільки співвідношенням Ц/В і міцністю МКЗ в зернах РКЗ. За рахунок мікропошкоджень МКЗ між залишковим розчином та НЗ, які виникають в процесі подрібнення бетону-джерела, міцність РКЗ може бути навіть нижчою за міцність цементного каменю в бетоні з РКЗ. При цьому за рахунок високої адгезії між цим цементним каменем і РКЗ міцність заповнювача включається в формування міцності бетону, що призводить до її зниження. Застосування отриманої поправки ΔA_i дозволяє нейтралізувати це зниження шляхом збільшення Ц/В бетону з РКЗ.

4. Для запобігання перевитрати цементу в бетонах з РКЗ під час розрахунку необхідного Ц/В додаткова витрата води, яка визначається отриманою поправкою ΔB_i , не враховується. Додавати поправку ΔB_i до загальної водопотреби бетонної суміші з РКЗ необхідно після визначення вмісту всіх компонентів бетонної суміші.

РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ КРУПНОГО ЗАПОВНЮВАЧА РЕЦИКЛІНГОВОГО ПОХОДЖЕННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВАЖКИХ БЕТОНІВ

5.1. Виробнича апробація результатів дослідження

Згідно з додатком 1 Порядку [30] передбачається застосування РКЗ в бетонах класом міцності до С20/25. Для апробації результатів даного дослідження компанією ТОВ «ДНІПРО ЗБК» виконувалось бетонування підлоги в одному з підсобних приміщень під час нового будівництва складу резервного палива по вул. Байкальській, 9Г в м. Дніпрі. Площа приміщення 4 кв.м., товщина підлоги 100 мм, проєктний клас бетону С16/20, рухливість суміші ОК=4 см. Розрахунок складу бетону виконувався за удосконаленим методом із використанням 100% РКЗ. Джерело РКЗ – фрагменти фундаментних блоків. Початкове подрібнення до фракції 70 мм виконувалось на промисловій стаціонарній шоківій дробарці, остаточне подрібнення з отриманням фракцій 5...20 мм здійснювалось в лабораторній шоківій дробарці з подальшим просіюванням і формуванням двофракційної суміші РКЗ зі співвідношенням фракцій 5...10 мм та 10...20 мм як 20%:80%. Застосовані матеріали:

– цемент марки М400 виробництва HeidelbergCement, м. Кривий Ріг, дійсна густина $\rho_{ц}=3,1$ г/см³; насипна густина $\rho_{н.ц.}=1,2$ г/см³; активність $R_{ц}=40$ МПа, НГЦТ 26%;

– дрібний заповнювач – дніпровський пісок, $M_k=1,62$, насипна густина $\rho_{н}^{ДЗ}=1,49$ г/см³; дійсна густина $\rho_3^{ДЗ}=2,51$ г/см³; вміст пилюватих та глинистих часток $P_{відм}^{ДЗ}=1,9\%$, водопотреба 6,0%;

– РКЗ, насипна густина $\rho_{н}^{РКЗ}=1,27$ г/см³; середня густина зерен $\rho_3^{РКЗ}=2,48$ г/см³; кількість зерен менше 5 мм – 6,2%.

1) Розрахунок В/Ц

Середня міцність бетону $f_{cm}=25,7$ МПа.

Базове значення коефіцієнта A за табл. 10.1 [21] $A=0,6$.

Розрахунок поправок до коефіцієнта A зведений в табл. 5.1.

Таблиця 5.1.

Поправки коефіцієнта A

Показник для визначення поправок	Поправка	Значення поправки
ОК=4 см	ΔA_1	-0,013
$M_k=1,62$	ΔA_2	-0,014
НГЦТ=26%	ΔA_3	+0,01
$D_{ш}=20$ мм	ΔA_4	-0,02
Ц/В	ΔA_5^*	-
Наявність РКЗ	ΔA_6	-0,05
Для РКЗ $\Sigma \Delta A \approx$		-0,087

* уточняється після розрахунку В/Ц без врахування цієї поправки

За формулами (1.2) та (1.3):

$$В/Ц = 0,57$$

2) Розрахунок водопотреби та витрати цементу

Результати експерименту, наведені в розділі 4, показали, що реальний В/Ц у випадку застосування РКЗ є меншим за рахунок першочергового швидкого заповнення водою пор залишкового розчину РКЗ. Фактично адсорбція води порами РКЗ починається з моменту контакту води замішування з заповнювачем. Такий механізм утворення структури є характерним для легких бетонів на пористих заповнювачах. Отже, враховуючи наявність пористої складової в заповнювачі, в контексті визначення водопотреби бетонної суміші з РКЗ доцільно застосувати окремі підходи, що використовуються під час розрахунку складу легких бетонів.

На жаль, в Україні відсутні нормативні документи, які регламентують розрахунок складів таких бетонів. Але в навчальних посібниках та довідковій літературі наведені послідовність та методи врахування особливостей пористих заповнювачів. Так Дворкін в [8] пропонує наступну послідовність визначення складів конструкційних легких бетонів:

1) в залежності від розрахункової міцності визначається витрата цементу C , а від заданої легкоукладальності суміші, крупності і виду крупного заповнювача визначається початкова витрата води V_0 ;

2) визначаються витрати заповнювачів;

3) початкова витрата води уточнюється шляхом введення поправок в залежності від водопотреби та водопоглинання заповнювачів і витрати цементу;

4) після визначення вмісту складових правильність розрахунку перевіряється шляхом визначення сумарного абсолютного об'єму компонентів суміші. Причому автором допускається отримання суми об'ємів в діапазоні $950 \dots 1050 \text{ л/м}^3$, що очевидно пов'язано з додатковою кількістю води, яка поглинається заповнювачами (тобто фактично знаходиться в межах об'єму заповнювачів).

Якщо адаптувати прийнятий підхід до традиційного методу підбору складу важкого бетону згідно з [21], для коректного визначення витрати води необхідно спочатку визначити водопотребу з урахуванням всіх поправок, окрім поправки на застосування РКЗ, після цього визначити витрати цементу та заповнювачів, і вже після цього додавати до витрати води поправку на застосування РКЗ. Алгоритм розрахунку водопотреби бетонної суміші з використанням РКЗ наведений на рис. 5.1.

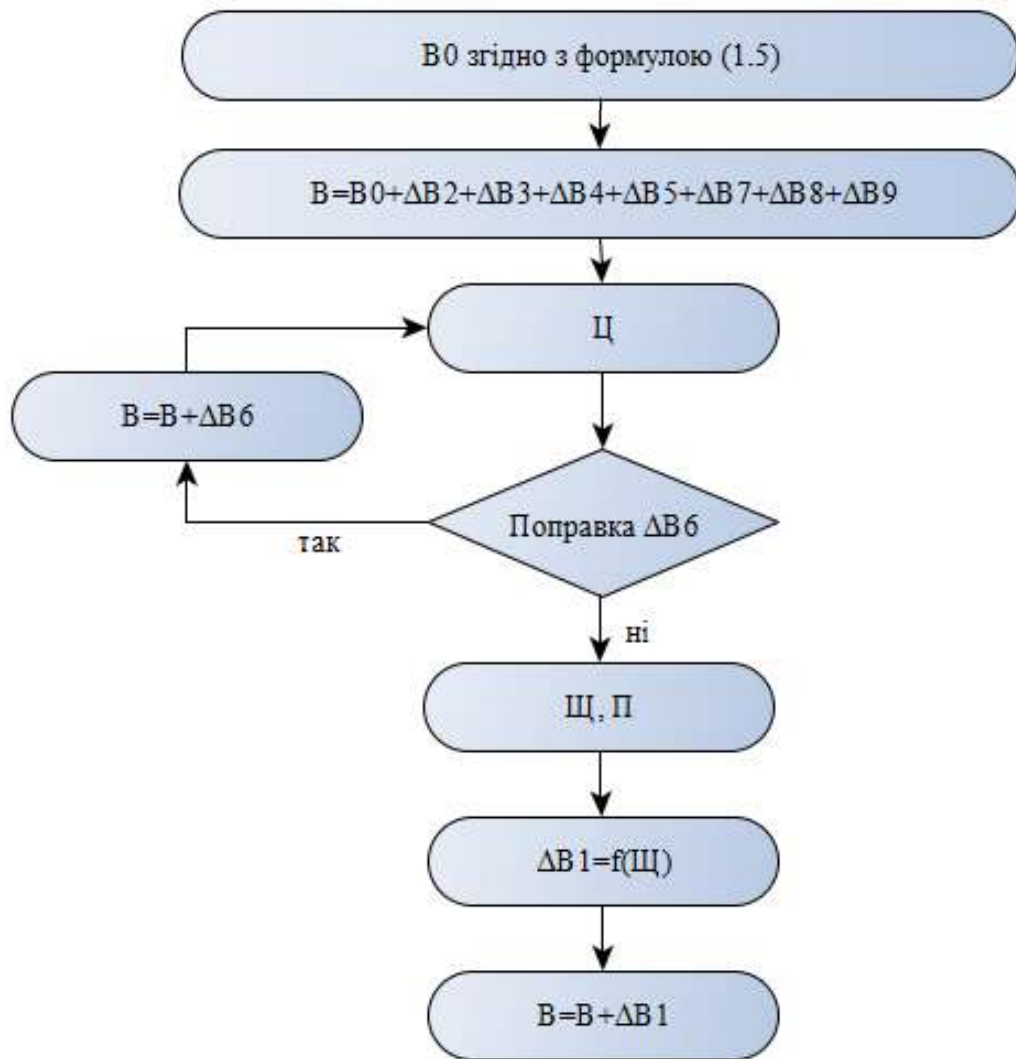


Рисунок 5.1. Блок-схема визначення водопотреби бетонної суміші з РКЗ

За формулою (1.5) $V_0 = 187,5$ л. Поправки до витрати води згідно з табл. 1.2 та в табл. 10.4 [21]: $\Delta B_3 = +11$; $\Delta B_5 = -8$; $\Delta B_8 = +1$. Тоді за формулами (1.6) та (1.7):

$$V = 191,5 \text{ л} \rightarrow \text{Ц} = 336 \text{ кг}$$

Відсутня необхідність у поправці на витрату цементу.

3) Розрахунок вмісту заповнювачів

За формулами (2.1) та (2.2) порожнистості дрібного заповнювача та РКЗ складають:

$$V_{\text{п}}^{\text{ДЗ}} = 40,6\%; \quad V_{\text{п}}^{\text{РКЗ}} = 48,8\%.$$

Розрахунок вмісту крупного та дрібного заповнювачів виконується за формулами (1.15) та (1.16). Результати розрахунку зведені в табл. 5.2.

Таблиця 5.2.

Розрахунок витрат натурального дрібного заповнювача та РКЗ

Розрахунковий клас міцності	α	$\Delta\alpha_{OK}$	$\Delta\alpha_{Ц}$	Щ, кг	П, кг
C16/20	1,17	0,05	0	1147	597

Застосовуючи експериментально визначену поправку на витрату води $\Delta B_1=0,015Щ$ остаточна розрахункова витрата води становить 209 л.

Отже, розрахунковий склад бетонної суміші, а також абсолютні об'єми матеріалів та густина бетонної суміші становлять (див. табл. 5.3)

Таблиця 5.3.

Розрахункові склад, середня густина та абсолютні об'єми матеріалів бетонної суміші

Розрахунковий клас міцності	В, л	Ц, кг	Щ, кг	П, кг	$\rho_{б.с.}^T$, кг/м ³	V_M , л
C16/20	209	336	1147	597	2288	1017

4) Виготовлення бетону з РКЗ

Під час виконання пробного замісу на 10 л отримана бетонна суміш з рухливістю ОК=5,5 см, що перевищує розрахункову рухливість. Прийнято рішення про зменшення витрати води до 204 л без зміни витрат інших компонентів. За таких умов досягнута рухливість 4,5 см.

З готової бетонної суміші виготовлені 3 зразки-куби з ребром 100 мм, які тверднули в однакових умовах з бетоном підлоги. У віці 28 діб зразки випробувані на стиск у випробувальній лабораторії ПДАБА. Згідно з

результатами випробування проєктний клас міцності бетону досягнутий: середня міцність зразків на стиск 24,2 МПа при коефіцієнті варіації 5,8% (Додаток Б).

5.2. Оцінка економічного ефекту

За результатами експерименту встановлено, що компенсацію погіршених властивостей РКЗ можна здійснити за рахунок збільшення Ц/В, що призводить до збільшення витрати цементу. Як відомо, сфера виробництва цементу посідає третє місце в світі за рівнем споживання енергії та друге місце – за викидами CO_2 [25]. Наприклад на 1 тонну портландцементного клінкера приходиться 0,865 т викидів CO_2 [34]. Одним з варіантів зменшення вмісту цементу в бетоні є застосування цементу більш високої активності. В цьому розділі порівняльний розрахунок складів бетону на РКЗ виконувався для цементів виробництва HeidelbergCement, м. Кривий Ріг, двох марок – М400 та М500 з аналогічними фізичними характеристиками.

Для оцінки економічного ефекту від застосування удосконаленого методу розрахунку складу бетонної суміші з використанням РКЗ порівняємо витрати матеріалів на приготування бетонних сумішей на НЗ на цементі марки М400 та РКЗ на цементах марок М400 та М500. Відповідно розрахуємо склад бетону найбільш ходових класів С12/15, С16/20, С20/25 за допомогою удосконаленого методу, який враховує наявність РКЗ. Характеристики цементу, дрібного заповнювача, РКЗ, легкоукладальність бетонної суміші приймаємо аналогічними до застосованих в п. 5.1 матеріалів. Характеристики НЗ – аналогічні до даних, наведених в табл. 2.6.

Розрахункові склади сумішей на НЗ, визначені за традиційним методом згідно з [21] наведені в табл. 5.4. Розрахункові склади бетонів з використанням РКЗ наведені в табл. 5.5, 5.6.

Таблиця 5.4.

Розрахунок витрат води, цементу та абсолютних об'ємів цементного тіста та заповнювачів в сумішах на натуральних заповнювачах

Розрахунковий клас міцності	A	B/Ц	B, л	Ц, кг	Щ, кг	П, кг	$\rho_{б.с.}^T$, кг/м ³	V_M , л
C12/15	0,573	0,75	190,5	255,0	1312	558	2316	1000
C16/20	0,573	0,62	190,5	307,0	1312	516	2326	1000
C20/25 (цемент M400)	0,573	0,53	192,0	365,0	1308	469	2335	1000
C20/25 (цемент M500)	0,573	0,62	190,5	309	1312	515	2327	1000

Таблиця 5.5.

Розрахунок витрат води, цементу та абсолютних об'ємів цементного тіста та заповнювачів в сумішах на РКЗ та цементі марки M400

Розрахунковий клас міцності	A	B/Ц	B, л	Ц, кг	Щ, кг	П, кг	$\rho_{б.с.}^T$, кг/м ³	V_M , л
C12/15	0,513	0,69	204	276,0	1147	645	2272	1013
C16/20	0,513	0,57	204	336,0	1147	597	2284	1013
C20/25	0,513	0,48	208,5	405,0	1134	542	2290	1013

Таблиця 5.6.

Розрахунок витрат води, цементу та абсолютних об'ємів цементного тіста та заповнювачів в сумішах на РКЗ та цементі марки M500

Розрахунковий клас міцності	A	B/Ц	B, л	Ц, кг	Щ, кг	П, кг	$\rho_{б.с.}^T$, кг/м ³	V_M , л
C12/15	0,513	0,80	204	240,0	1147	674	2266	1013
C16/20	0,513	0,67	204	288,0	1147	636	2275	1013
C20/25	0,513	0,57	204	336,0	1147	597	2284	1013

Як видно з табл. 5.6, для бетону класу С20/25 збільшення В/Ц у випадку застосування цементу марки М500 дозволило зменшити витрату цементу до рівня, за якого справедливим залишається правило сталості водопотреби. Згідно з даними, наведеними в [8], для заданої рухливості бетонної суміші її водопотреба залишається сталою незалежно від витрат цементу в межах 350 кг/м³.

В таблицях 5.7 та 5.8 наведені зміни в кількості складових на 1 м³ бетонних сумішей (кг) у випадку застосування РКЗ (знак «+» означає, що вміст матеріалу в суміші з РКЗ буде більшим).

Таблиця 5.7.

Кількісні зміни витрат матеріалів для приготування бетону з РКЗ на цементі марки М400

Розрахунковий клас міцності	В, л	Ц, кг	П, кг	НЗ, кг	РКЗ, кг
С12/15	+13,5	+21	+87	-1312	+1147
С16/20	+13,5	+29	+81	-1312	+1147
С20/25	+16,5	+40	+73	-1308	+1134

Таблиця 5.8.

Кількісні зміни витрат матеріалів для приготування бетону з РКЗ на цементі марки М500

Розрахунковий клас міцності	В, л	Ц, кг	П, кг	НЗ, кг	РКЗ, кг
С12/15	+13,5	-15	+116	-1312	+1147
С16/20	+13,5	-25	+120	-1312	+1147
С20/25*	+12	-29	+128	-1308	+1147
С20/25**	+13,5	+27	+82	-1312	+1147

* порівняно з бетоном на НЗ та цементі М400

** порівняно з бетоном на НЗ та цементі М500

Станом на лютий 2024 р. в м. Дніпро придбати матеріали для виготовлення бетону можна за наступними відпускними цінами виробників (з доставкою):

- щебінь гранітний – 560 грн/т з ПДВ;
- пісок – 312 грн/т з ПДВ;
- цемент М400 (Криворізький цемент) навалом – 4100 грн/т з ПДВ;
- цемент М500 (Криворізький цемент) навалом – 4700 грн/т з ПДВ;
- вода (КП «Дніпроводоканал») – 31,36 грн/т з ПДВ.

Здійснивши опитування декількох надавачів послуг з подрібнення бетонних відходів, проаналізувавши пропозиції готового фракціонованого щебеню, а також декілька державних закупівель за 2021-2022 р.р. з урахуванням індексу інфляції вартість РКЗ фракції до 40 мм в Центральному регіоні України становить близько 200 грн/т з ПДВ. Орієнтовна вартість доставки по м. Дніпро складає 150 грн/т з ПДВ. Але при розрахунку вартості виробництва РКЗ на майданчику необхідно враховувати, що не весь брукхт перетворюється в РКЗ. Згідно з розрахунками на готовий до використання РКЗ перетворюється близько 73% подрібнених відходів. Відповідно приведена ціна РКЗ з доставкою складатиме:

$$\frac{200 + 150}{0,73} \approx 480 \text{ грн/т}$$

Враховуючи, що в традиційних умовах демонтажу подрібнений брукхт в будь-якому випадку вивозиться на полігони для захоронення, необхідно від вартості виробництва РКЗ відняти нездійснені витрати на вивезення. Для врахування цього були проаналізовані п'ять державних закупівель на вивезення будівельних відходів в м. Дніпро в період лютий-квітень 2024 р. За результатами всіх закупівель договори укладені з КП «ЕКО Дніпро» Дніпровської міської ради. В усіх договорах вартість вивезення будівельних відходів на полігони складала 102 грн/т з ПДВ. Отже, чиста вартість виробництва готового до використання РКЗ становить 378 грн/т.

Перерахуємо дані, наведені в таблицях 5.7, 5.8 у додаткові витрати/економію в грошовому еквіваленті. Після чого зможемо розрахувати економію на вартості матеріалів для бетонів різних класів міцності і відповідно, визначити економічний ефект (див. табл. 5.9, 5.10).

Таблиця 5.9.

Економічний ефект від використання РКЗ при застосуванні цементу марки М400

Розрахунковий клас міцності	В, грн	Ц, грн	П, грн	НЗ, грн	РКЗ, грн	Економія	
						Грн	%
С12/15	+0,42	+86,10	+27,14	-734,72	+433,57	187,49	9,6
С16/20	+0,42	+118,90	+25,27	-734,72	+433,57	156,56	7,2
С20/25	+0,52	+164,00	+22,78	-732,48	+428,65	116,53	4,9

Таблиця 5.10.

Економічний ефект від використання РКЗ при застосуванні цементу марки М500

Розрахунковий клас міцності	В, грн	Ц, грн	П, грн	НЗ, грн	РКЗ, грн	Економія	
						Грн	%
С12/15	+0,42	+82,50	+36,19	-734,72	+433,57	182,04	9,3
С16/20	+0,42	+94,90	+37,44	-734,72	+433,57	168,39	7,8
С20/25*	+0,38	+82,70	+39,94	-732,48	+433,57	175,90	7,4
С20/25**	+0,42	+126,9	+25,58	-734,72	+433,57	148,25	6,9

* порівняно з бетоном на НЗ та цементі М400

** порівняно з бетоном на НЗ та цементі М500

Враховуючи, що згідно з положеннями п. 6.2 [21] для бетонів класів міцності С12/15 та С16/20 не рекомендується застосування цементів з активністю більше 40 МПа, з наведених вище розрахунків можна зробити

висновки про доцільність застосування РКЗ в бетонах класів міцності C12/15 та C16\20 на цементах марки M400 та в бетонах класу міцності C20/25 на цементах марки M500. Очікувана економія вартості матеріалів на 1 м³ бетонної суміші складає до 8-10% в першому випадку та близько 7,5% в другому.

5.3. Оцінка екологічної ефективності

5.3.1. Загальні передумови для розрахунку екологічної ефективності

Традиційний життєвий цикл будь-якої будівельної продукції, включаючи бетонні та залізобетонні конструкції, представлений на рис. 5.2.



Рисунок 5.2. Життєвий цикл будівельної продукції

В умовах утворення відходів від знесення будівель безпосередньо на майданчику демонтажу доцільно розглянути варіант сортування, подрібнення, сепарації шкідливих речовин та речовин іншого походження також на будівельному майданчику. Це дозволить виключити з життєвого циклу продукції або значною мірою зменшити емісію CO₂ на наступних етапах:

- вивезення відходів;
- захоронення відходів;
- видобуток сировини;
- транспортування сировини на виробництво та за деяких умов готової продукції до будівельного майданчика.

Оцінка зниження навантаження на довкілля за умови застосування рециклінгового щебеню в якості крупного заповнювача для бетону має включати наступні аспекти:

- 1) величину зменшення кількості бетонних та залізобетонних відходів, які підлягають вивезенню на полігони для захоронення;
- 2) величину зменшення потреби в натуральному крупному заповнювачі та збільшення потреби в цементі та дрібному заповнювачі;
- 3) різницю в енергетичних витратах, пов'язаних з виробництвом рециклінгового щебеню.

Для розрахунку екологічного ефекту в якості кількісних параметрів використаємо дані, наведені в [29], згідно з якими після демонтажу старого п'ятиповерхового чотирипід'їзного цегляного житлового будинку утворюється близько 5 тис. т. відходів, з яких 52% – бетонний та залізобетонний брухт. Розрахуємо екологічний ефект від використання подрібнених бетонних (залізобетонних) відходів в якості РКЗ. За аналогією з РКЗ, що отриманий в рамках даної роботи, плануємо отримати двофракційну суміш з фракцій 5...10 мм та 10...20 мм. Для розрахунку екологічного ефекту доцільно розглядати саме цілісний об'єкт знесення, а не зміни в кількості

матеріалів на 1 м³ готового бетону через наявність екологічних факторів, які не залежать прямо від одиничного обсягу продукції (наприклад, викиди під час транспортування).

Приймаємо, що будинок, що підлягає знесенню, розташований в м. Дніпрі в Самарському районі на житловому масиві «Придніпровськ». Постачальник бетону – ТОВ «Дніпробетон», м. Дніпро, вул. Гаванська. Постачальник натурального щебня – ТОВ «Рибальський кар'єр», м. Дніпро, вул. Німецька. Під час демонтажу застосовується обладнання, яке дозволяє безпосередньо на майданчику знесення отримати готові до застосування суміші РКЗ. Прийняте розташування об'єкту знесення та постачальників дозволяє знехтувати викидами CO₂ під час транспортування сировини з кар'єру та РКЗ з майданчику демонтажу до виробника бетону та бетонних та залізобетонних виробів, оскільки відстані транспортування майже однакові і складають 3,5...4,0 км. Транспортування відходів здійснюється вантажними автомобілями з корисною вантажопідйомністю 9 т на полігон «Правобережний», відстань від майданчику знесення 33 км. Наступне припущення: на бетонному заводі плануємо отримати бетон класу міцності C16/20 з цементу марки М400 або бетон класу міцності C20/25 з цементу марки М500.

Зазначена будівля є типовою «хрущовкою» (рис. 5.3). В умовах масової забудови 1950-60-х р.р. минулого століття такі будівлі будувались досить типовими, прямокутними в плані з габаритами 68,22 x 12,62 м.



Рисунок 5.3. Типова «хрущовка» з цегляними стінами

Конструктивна схема зазвичай стінова з трьома поздовжніми несучими стінами. Просторова жорсткість забезпечується сумісною роботою поздовжніх та поперечних стін та жорсткими дисками перекриття та покриття, які виконані зі збірних залізобетонних найчастіше круглопустотних плит прольотом 6,0 м. Стіни цегляні з силікатної або керамічної цегли на піщано-цементному розчині, зовнішні товщиною 510 мм, внутрішні – 380 мм. Перегородки цегляні товщиною 120 мм. На території України фундаменти таких будівель зазвичай стрічкові зі збірних фундаментних блоків типу ФБС, рідше монолітні або бутобетонні. Традиційно наявний підвал. У випадку застосування двоскатних або вальмових покрівель кроквяні системи виконані з дерева. Після демонтажу таких будівель бетонні та залізобетонні відходи представлені фундаментними блоками (неармовані), плитами покриття та перекриття (армовані), балконними плитами (армовані), сходові марші та майданчики (армовані), брусковими перемичками (армовані) (рис. 5.4).

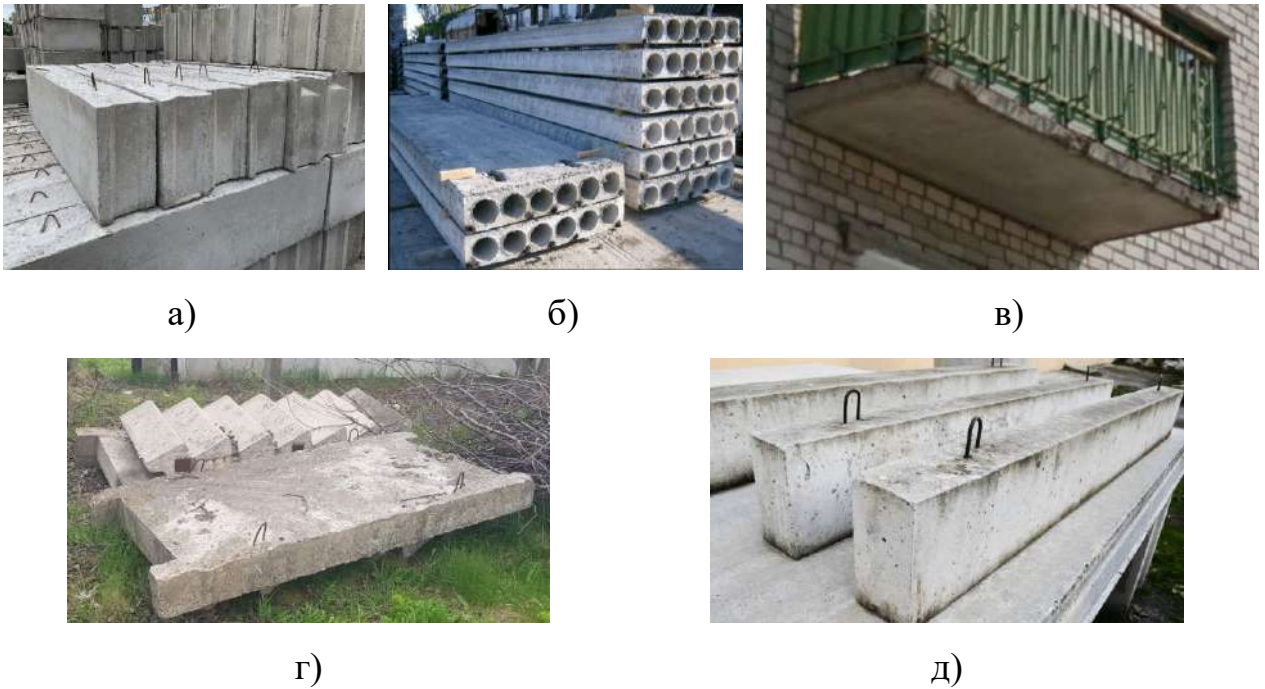


Рисунок 5.4. Типові збірні бетонні та залізобетонні конструкції, що застосовувалися в будівництві житлових будинків масової забудови в 1950-70 х р.р.: а – фундаментні блоки типу ФБС; б – круглопустотні плити перекриття та покриття; в – балконні плити; г – сходові марші та майданчики; д – брускові перемички

Виходячи з розмірів та поверховості будинку за типовими серіями відповідного періоду будівництва, можна орієнтовно встановити кількість арматури та закладних деталей, які не підлягають переробці в крупний заповнювач:

- арматура та закладні деталі плит перекриття та покриття – 18,2 т;
- арматура та закладні деталі балконних плит – 3,1 т;
- арматура та закладні деталі сходових маршів та майданчиків – 1,6 т;
- арматура та закладні деталі перемичок – 0,24 т.

Враховуючи частку бетонного та залізобетонного брухту в загальному обсязі відходів, в абсолютних значеннях маса бетону, що підлягає подрібненню, після сепарації металевих елементів складає приблизно 2577 т або при середній густині бетону $2,4 \text{ т/м}^3$ – 1074 м^3 .

В даній роботі не розглядалися питання переробки з метою повторного застосування цегляного бою, скляного бою, металобрухту та інших відходів. Тому для оцінки екологічної ефективності виходимо з припущення, що без переробки бетонні (залізобетонні) відходи повністю вивозяться на полігони і їх частка становить 100%.

5.3.2. Оцінка очікуваної кількості РКЗ

За результатами ситового аналізу отриманих після подрібнення в щоківій дробарці сумішей частка крупних фракцій (>5 мм), які пропонується застосовувати в якості РКЗ, становить в середньому 84% (див. п. 3.2). Таким чином, після подрібнення та відсіву дрібної фракції подальшій переробці та сортуванню підлягає $2577 \cdot 0,84 \approx 2165$ т.

Наступним кроком для забезпечення мінімального вмісту дрібної фракції передбачається розсіювання утвореної суміші та формування бажаної суміші РКЗ шляхом дозування фракцій. Згідно з отриманими даними зернового складу тільки крупної фракції вміст фракції 10...20 мм після подрібнення та сортування складає приблизно 70% або 1515 т.

Відповідно до рекомендацій, наведеними в розділі 3 вміст фракції 5...10 мм в розрахунковій суміші має складати $1515 \cdot 0,25 \approx 379$ т.

І відповідно залишок фракції 5...10 мм, не використаний в формуванні розрахункової суміші РКЗ становить $2165 - 1515 - 379 \approx 271$ т.

З наведених вище розрахунків отримана суміш РКЗ масою ≈ 1894 т, невикористані відходи бетонного брухту ≈ 683 т.

Необхідно зазначити, що невикористаний бетонний брухт фракції 5...10 мм та піщаної фракції може також бути застосованим в якості дорожніх підсіпок, зворотних засіпок тощо.

5.3.3. Методичні засади оцінки емісії шкідливих речовин протягом життєвого циклу об'єкту

В Україні відсутня нормативна документація, яка встановлює методику кількісної оцінки впливу будівельної продукції на навколишнє середовище.

Згідно з прийнятими в Європейському союзі нормами така оцінка виконується з урахуванням повного життєвого циклу, який включає чотири стадії [59]:

- виробництво;
- будівництво;
- експлуатація;
- закінчення терміну експлуатації.

Згідно з [59] оцінка впливу для кожної стадії визначається в окремих інформаційних модулях. Організаційна схема стадій життєвого циклу та інформаційних модулів наведена на рис. 5.5.



Рисунок 5.5. Організаційна схема стадій життєвого циклу будівельного об'єкта

Враховуючи, що метою оцінки екологічної ефективності є отримання величини зміни шкідливих викидів, для спрощення емісія викидів на стадіях будівництва та експлуатації не визначалась, оскільки очевидно, що ці викиди не залежать від застосованих заповнювачів в бетоні. Також в оцінку не включаються викиди на стадіях виробництва, будівництва та демонтажу, які

очевидно дублюються (транспортування сировини до бетонного заводу, крім тієї сировини, що додатково витрачається на виробництво бетону з РКЗ, первинне подрібнення відходів демонтажу до розмірів, придатних для транспортування на полігон або завантаження в щоківу дробарку).

У випадку застосування бетонів на натуральних заповнювачах під час екологічної оцінки необхідно врахувати викиди, що утворюються в наступних підгрупах інформаційних модулів (див. рис. 5.5):

- виробництво крупного заповнювача (підгрупи A1-A3);
- додаткове виробництво цементу марки М400 для бетону класу С20/25 (підгрупи A1-A3);
- транспортування відходів демонтажу до місця захоронення (підгрупа С2);
- безпосередньо захоронення (підгрупа С4).

У випадку застосування РКЗ, готові суміші якого за наявності пересувних технологічних ланцюгів можна отримати безпосередньо на майданчику демонтажу, враховуються викиди, що утворюються в наступних підгрупах інформаційних модулів:

- рециклінг бетонних та залізобетонних відходів (інформаційний модуль D), що включає в себе двостадійне подрібнення та фракціонування;
- додаткове виробництво та транспортування цементовозом з м. Кривий Ріг цементу марки М400 для бетону класу С16/20 (підгрупи A1÷A3);
- видобуток та транспортування на бетонний завод додаткового піску (підгрупи A1÷A3).

Вихідними даними для оцінки викидів в межах інформаційних модулів згідно з [59] є екологічні декларації продукції (environmental product declarations, EPD). Процедура затвердження і реєстрації EPD в міжнародній базі регламентується міжнародним стандартом ISO 14025, який в Україні впроваджений як національний стандарт [23]. Екологічне декларування в країнах Євросоюзу поки що є добровільним, тому додатково для розрахунків

будемо користуватись базами даних Ökobaudat (база по викидах в будівельній індустрії Німеччини), Inventory of Carbon and Energy (база викидів парникових газів та витрат енергії під час виробництва будівельних матеріалів та продуктів у Канаді та США) та Lipasto (база викидів під час транспортування різними видами транспорту, а також при роботі машин і механізмів).

Для оцінки сукупності викидів всіх парникових газів, що утворюються в процесі певної діяльності в 1997 р. в Кіотському протоколі було введено поняття **вуглецевого сліду**, для розрахунку якого використовують параметр GWP – потенціал глобального потепління (global warming potential, ПГП). Це чисельний коефіцієнт, що визначає ступінь впливу різних парникових газів на глобальне потепління [1]. В якості еталону прийнятий CO₂ з GWP=1. Найчастіше GWP вимірюється в грамах (кілограмах) CO₂-еквіваленту.

В межах прийнятих в даному розділі умов кількість викидів CO₂ може бути визначене з рівняння:

$$C = C_b + C_d, \quad (5.1)$$

де C_b – кількість викидів в межах інформаційного модуля А (продукція), кг;

C_d – кількість викидів в межах інформаційного модуля С (знесення), кг.

Емісія CO₂ на етапі будівництва, а фактично в даному випадку на етапі виготовлення та транспортування матеріалів та сировини до бетонного заводу, складається з двох доданків:

$$C_b = C_{be} + C_{bt}, \quad (5.2)$$

де C_{be} – кількість викидів, що утворюється в процесі виробництва матеріалів (видобутку сировини), кг;

де C_{bt} – кількість викидів на етапі транспортування, кг.

Складові з формули (4.2) в загальному випадку визначаються за допомогою формул:

$$C_{be} = \sum Q_{be,i} \cdot EF_{be,i}, \quad (5.3)$$

$$C_{bt} = \sum Q_{bt,i} \cdot EF_{bt,i} \cdot D_i \quad (5.4)$$

де $Q_{be,i}$, $Q_{bt,i}$ – маси i -го матеріалу (сировини) для виготовлення бетону, кг;
 $EF_{be,i}$ – коефіцієнт викидів CO_2 під час видобутку (виробництва) i -го матеріалу (сировини), кг/кг;
 $EF_{bt,i}$ – коефіцієнт викидів CO_2 під час транспортування i -го матеріалу (сировини) до бетонного заводу, кг/кг;
 D_i – відстань транспортування i -го матеріалу (сировини) до бетонного заводу, км.

В EPD та, наприклад, в базі Ökobaudat зазвичай GWP на етапах A1-A3 об'єднані, оскільки стадія виробництва продукції є найбільш визначеною і контрольованою в оцінці життєвого циклу [1]. А отже, формули (5.2)÷(5.4) можна узагальнити в одну формулу:

$$C_b = \sum Q_{b,i} \cdot GWP_{b,i}, \quad (5.5)$$

де $Q_{b,i}$ – кількість i -го матеріалу (сировини), кг;
 $GWP_{b,i}$ – ППП для виробництва i -го матеріалу (сировини) на етапах A1-A3 життєвого циклу, екв.кг CO_2 /кг.

Враховуючи, що емісія вуглекислого газу під час безпосередньо демонтажу будівлі відбувається незалежно від того, планується подальша переробка відходів або ні, кількість викидів CO_2 на етапі знесення, що підлягають врахуванню в даній роботі, можна обчислити з наступного рівняння:

$$C_d = C_{d1} + C_{d2}, \quad (5.6)$$

де C_{d1} – кількість викидів, що утворюється при транспортуванні придатних для переробки будівельних відходів на полігони, кг;

C_{d2} – кількість викидів, що утворюється при зберіганні відходів на полігоні.

В формулі (5.6) обсяги емісії CO_2 обчислюються за формулами:

$$C_{d1} = M_{w,lf} \cdot D \cdot k_{tr}, \quad (5.7)$$

$$C_{d2} = M_{w,lf} \cdot k_w \quad (5.8)$$

де $M_{w,lf}$ – обсяг будівельних відходів, що підлягає захороненню на полігоні, кг;

D – відстань від майданчику демонтажу до полігону, км;

k_{tr} – коефіцієнт викидів CO_2 під час транспортування на полігон (в залежності від транспорту), кг/кг*км;

k_w – коефіцієнт викидів CO_2 від захоронення на полігоні, кг/кг.

5.3.4. Визначення обсягів емісії CO_2

З розрахунків, наведених в п. 5.3.2, випливає, що після демонтажу будівлі чотирипід'їзної «хрущовки» отримується готова до використання суміш РКЗ масою 1894 т. Згідно з розрахованими за удосконаленим методом складами бетону з РКЗ класом міцності С16/20 на цементі марки М400 (див. табл. 5.5) або класом міцності С20/25 на цементі марки М500 (див. табл. 5.6) з такого обсягу РКЗ можна отримати близько 1650 м³ бетону зазначених класів. Перераховані дані табл. 5.7 та 5.8 на цей обсяг наведені в табл. 5.11.

Таблиця 5.11.

Обсяги матеріалів (сировини) та емісії CO_2

Матеріал (сировина), процес	$Q_{b,i}$, т	$GWP_{b,i}$, екв. кг CO_2 /т	D_i , км	$M_{w,lf}$, т	k_{tr} , екв. кг CO_2 / (т*км)	k_w , екв. кг CO_2 /т
1	2	3	4	5	6	7
НЗ (А1-А3) для С16/20	2165	7,841 [87]	-	-	-	-
НЗ (А1-А3) для С20/25	2160		-	-	-	-
Цемент М400 (А1- А3) для С16/20	34,65	747,6 [88]	-	-	-	-
			-	-	-	-
Цемент М400 (А1- А3) для С20/25	47,85		-	-	-	-
Цемент М500 (А1- А3) для С20/25	44,55		-	-	-	-

Продовження таблиці 5.11

1	2	3	4	5	6	7
Пісок (А1-А3) для С16/20	133,65	2,62 [89]	-	-	-	-
			-	-	-	-
Пісок (А1-А3) для С20/25	211,2		-	-	-	-
РКЗ (D)	1893	5,79 [91]	-	-	-	-
Транспортування відходів демонтажу на полігон (С2)	-	-	33	2577; 286 машино-рейсів*	0,00114*	-
Захоронення відходів на полігоні (С4)	-	-	-	2577	-	14,58 [90]

* Згідно з даними в [1] середній показник викидів за один машино-рейс під час пересування міськими вулицями для вивезення відходів вантажними автомобілями $Q=9$ т

Розрахунок екологічного ефекту від застосування РКЗ під час виробництва бетону класу міцності С16/20 на цементі М400 наведений у табл. 5.12.

Таблиця 5.12.

Обсяги додаткової емісії CO₂ під час виробництва бетону класу міцності С16/20 на НЗ та РКЗ (цемент марки М400)

Матеріал (сировина)	НЗ				РКЗ, бетон С16/20 на цементі М400			
	С _b , т	С _{d1} , т	С _{d2} , т	С, т	С _b , т	С _{d1} , т	С _{d2} , т	С, т
1	2	3	4	5	6	7	8	9
НЗ (А1-А3)	17,0			17,0				

Продовження таблиці 5.12

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Цемент М400 (А1-А3)					25,9			25,9
Пісок (А1-А3)					0,35			0,35
РКЗ (D)						11,0		11,0
Стадія С2		10,8		10,8				
Стадія С4			37,6	37,6				
Всього	17,0	10,8	37,6	65,4	26,3	11,0	-	37,3
Всього на 1 м ³ бетонної суміші				0,04				0,023
Зменшення викидів CO ₂ , т/м ³				-				0,017

Під час виготовлення бетону класу міцності С16/20 загальний GWP≈154,6 екв. кг CO₂/м³ [92]. Таким чином, застосування РКЗ сприяє зменшенню емісії CO₂ на 11%.

Розрахунок екологічного ефекту від застосування РКЗ під час виробництва бетону класу міцності С20/25 на цементі М500 порівняно з виробництвом бетону аналогічного класу міцності на цементі М400 наведений у табл. 5.13.

Таблиця 5.13.

Обсяги додаткової емісії CO₂ під час виробництва бетону класу міцності С20/25 на НЗ (цемент марки М400) та РКЗ (цемент марки М500)

Матеріал (сировина)	НЗ, бетон С20/25 на цементі М400				РКЗ, бетон С20/25 на цементі М500			
	C _b , т	C _{d1} , т	C _{d2} , т	C, т	C _b , т	C _{d1} , т	C _{d2} , т	C, т
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Видобуток НЗ (А1-А3)	16,9			16,9				
Цемент М400 (А1-А3)	35,8			35,8				

Продовження таблиці 5.13

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Пісок (A1-A3)					0,55			0,55
РКЗ (D)						11,0		11,0
Стадія С2		10,8		10,8				
Стадія С4			37,6	37,6				
Всього	52,7	10,8	37,6	101,1	0,6	11,0	-	11,6
Всього на 1 м ³ бетонної суміші				0,061				0,007
Зменшення викидів CO ₂ , т/м ³				-				0,054

Під час виготовлення бетону класу міцності С20/25 загальний GWP \approx 203,2 екв. кг CO₂/м³ [93]. Таким чином, застосування РКЗ сприяє зменшенню емісії CO₂ на 26,6%, порівняно з виготовленням бетону на НЗ на цементі марки М400.

Розрахунок екологічного ефекту від застосування РКЗ під час виробництва бетону класу міцності С20/25 на цементі М500 порівняно з виробництвом бетону аналогічного класу міцності на цементі М500 наведений у табл. 5.14.

Таблиця 5.14.

Обсяги додаткової емісії CO₂ під час виробництва бетону класу міцності С20/25 на НЗ (цемент марки М500) та РКЗ (цемент марки М500)

Матеріал (сировина)	НЗ, бетон С20/25 на цементі М500				РКЗ, бетон С20/25 на цементі М500			
	C _b , т	C _{d1} , т	C _{d2} , т	C, т	C _b , т	C _{d1} , т	C _{d2} , т	C, т
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Видобуток НЗ (A1-A3)	17,0			17,0				
Цемент М500 (A1-A3)					33,3			33,3

Продовження таблиці 5.14

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Пісок (A1-A3)					0,35			0,35
РКЗ (D)						11,0		11,0
Стадія С2		10,8		10,8				
Стадія С4			37,6	37,6				
Всього	16,9	10,8	37,6	65,3	33,7	11,0	-	44,7
Всього на 1 м ³ бетонної суміші				0,04				0,027
Зменшення викидів CO ₂ , т/м ³				-				0,013

Під час виготовлення бетону класу міцності С20/25 загальний GWP \approx 203,2 екв. кг CO₂/м³ [93]. Таким чином, застосування РКЗ сприяє зменшенню емісії CO₂ на 6,4%, порівняно з виготовленням бетону на НЗ на цементі марки М500.

5.4. Впровадження результатів дослідження в освітній процес в Українському державному університеті науки і технологій, м. Дніпро

Результати розділів 3-4 (в частині особливостей та властивостей РКЗ та бетонів з РКЗ, їх врахування під час проектування складів важких бетонів) використовуються при читанні лекцій з дисципліни «Будівельні матеріали» на будівельному факультеті УДУНТ для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, «Раціональне проектування залізобетонних і кам'яних конструкцій будівель та споруд» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти. Результати розділу 5 (в частині розрахунку екологічного ефекту від застосування РКЗ) використовуються при читанні лекцій з дисципліни «Особливості проектування сталих будівель» на будівельному факультеті УДУНТ для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти (додаток В).

Висновки за розділом 5

1. Компанією ТОВ «ДНІПРО ЗБК» застосований запропонований удосконалений метод розрахунку складу важкого бетону з РКЗ для влаштування підлоги в одному з приміщень під час нового будівництва складу резервного палива по вул. Байкальській, 9Г в м. Дніпрі. Випробування зразків бетону з РКЗ на міцність на стиск здійснювалось в сертифікованій випробувальній лабораторії. Отримана середня міцність на стиск 24,2 МПа при коефіцієнті варіації 5,8%, що відповідає запроєктованому класу міцності С16/20.

2. Розрахунок економічного ефекту показав, що заміна НЗ на РКЗ дозволяє знизити вартість матеріалів:

- для виготовлення бетону класу міцності С12/15 на 9,6%;
- для виготовлення бетону класу міцності С16/20 на 7,2%;
- для виготовлення бетону класу міцності С20/25 (за умови використання цементу марки М500, порівняно з бетоном на НЗ на цементі марки М400) – на 7,4%;
- для виготовлення бетону класу міцності С20/25 (за умови використання цементу марки М500, порівняно з бетоном на НЗ на цементі марки М500) – на 6,9%.

3. Результати розрахунків екологічного ефекту свідчать про зменшення емісії CO₂ під час виробництва бетону з використанням РКЗ:

- під час виготовлення бетону класу міцності С16/20 – на 11%;
- під час виготовлення бетону класу міцності С20/25 (за умови використання цементу марки М500, порівняно з бетоном на НЗ на цементі марки М400) – на 26,6%;
- під час виготовлення бетону класу міцності С20/25 (за умови використання цементу марки М500, порівняно з бетоном на НЗ на цементі марки М500) – на 6,4%.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Досліджені фізико-механічні властивості крупного заповнювача, отриманого в результаті подрібнення бетону. Насипна густина готових до використання сумішей РКЗ склала $1,25 \text{ г/см}^3$, середня густина зерен $2,47...2,54 \text{ г/см}^3$. Вміст лещадних зерен становив $12,4...14,1\%$. Водопотреба $3,6...4,0\%$, що в $7,8...8,7$ разів вища за водопотребу натурального щебня. Після перемішування дослідних фракцій між собою в результаті взаємодії зерен між собою відбувається руйнування деякої кількості слабких зерен РКЗ з утворенням фракції менше 5 мм з масовим вмістом $5,4...8,1\%$, що призводить до збільшення водопотреби РКЗ.

2. Встановлено, що склад, міцність та вік бетону, що подрібнювався, не впливають суттєво на властивості РКЗ. Головним фактором, що має визначальний вплив на властивості РКЗ, є наявність залишкового розчину на зернах натурального щебня. При чому його вміст на кожному окремому зерні не є постійним навіть в межах однієї фракції, що призводить до зменшення прогнозованості властивостей бетону з РКЗ. Запропоновані в літературних джерелах методи визначення вмісту залишкового розчину є трудомісткими та тривалими в часі. Зважаючи на зменшення густини та міцності РКЗ разом із зменшенням розмірів зерен очевидно, що масовий вміст залишкового розчину більший в зернах менших фракцій. Запропоновано підхід, який експериментально підтверджений, згідно з яким для забезпечення раціонального зернового складу РКЗ необхідно забезпечити вміст менших фракцій на мінімально допустимому рівні. Для двофракційної суміші РКЗ найбільші насипна густина та щільність пакування зерен досягнуті за співвідношення фракцій $5...10 \text{ мм}$ та $10...20 \text{ мм}$ як $20\%:80\%$ за масою.

3. За однакового вмісту цементу та води експериментальні зразки бетону з РКЗ показали вищу міцність бетону, ніж зразки бетону на НЗ: $26,4...26,8 \text{ МПа}$ при коефіцієнтах варіації $4,1...6,4\%$ (бетон з РКЗ, клас $\text{C18/22,5}... \text{C20/25}$); $24,6 \text{ МПа}$ при коефіцієнті варіації $7,1\%$ (бетон з НЗ, клас C18/22,5). Але за таких умов рухливість бетонної суміші з РКЗ відповідала

ОК=5,5...6,0 см, тоді як в суміші з НЗ ОК=7,5 см. В зразках з тим самим Ц/В, але збільшеним вмістом води міцність становила 24,1...25,7 МПа з коефіцієнтами варіації 5,7...10,7% (клас С16/20...С18/22,5), рухливість сумішей відповідала ОК=8,5...9,0 см. Аналогічний ефект спостерігався і на верхньому рівні варіювання фактора Ц/В. Таким чином, встановлені закономірності утворення структури бетону з РКЗ. За рахунок наявності пористого залишкового розчину в момент контакту води з РКЗ починається поглинання води пористими поверхнями заповнювача, що призводить до зниження рухливості бетонної суміші, а в затверділому цементному камені – до ущільнення цементного тіста. Тобто в контактних зонах між РКЗ та матрицею нового розчину відбувається збільшення Ц/В, що призводить до збільшення міцності.

4. Досягнення розрахункового класу міцності бетону з РКЗ можливе тільки за рахунок збільшення Ц/В, а також достовірного визначення характеристик РКЗ. Через наявність залишкового розчину прогнозованість характеристик бетону зменшується. В багатьох серіях зразків досягнута необхідна середня міцність бетону, але за рахунок великих коефіцієнтів варіації розрахунковий клас міцності не досягнутий.

5. З умов рівнорухливості бетонних сумішей та рівноміцності бетонів на НЗ та РКЗ експериментально встановлені поправки до коефіцієнту якості заповнювачів $\Delta A_i = -0,05$ та витрати води $\Delta B_i = (1,4...1,6\%) * \text{Щ}$, де Щ – вміст РКЗ в одиницях маси. Дані поправки враховують особливості РКЗ.

6. Удосконалений метод розрахунку складу важкого бетону дозволяє спроектувати склад бетону з РКЗ з урахуванням особливостей крупного заповнювача та закономірностей формування структури бетону з РКЗ з заданими міцністю та рухливістю. Згідно з удосконаленим методом на першому етапі розрахунку визначається Ц/В (ВЩ) з урахуванням поправки на походження крупного заповнювача $\Delta A_i = -0,05$. Наступним кроком встановлюються водопотреба бетонної суміші без врахування наявності РКЗ

та витрата цементу за стандартною методикою. На основі фактичних фізико-механічних властивостей РКЗ та дрібного заповнювача визначається вміст заповнювачів. Після цього до встановленої раніше водопотреби додається поправка на витрату води $\Delta B_i = (1,4 \dots 1,6\%) * \text{Щ}$. Після визначення вмісту складових коректність розрахунку перевіряється шляхом визначення сумарного абсолютного об'єму компонентів суміші. Для розрахункового об'єму бетонної суміші 1 м^3 сумарний абсолютний об'єм складових в літрах становить $1000 \text{ л} + \Delta B_i$. Після розрахунку складу, як і при традиційному розрахунково-експериментальному методі, виконується пробний заміс та за необхідності вносяться коригування для досягнення заданих властивостей. Застосування запропонованого удосконаленого методу дозволяє лише за рахунок якісного фракціонування РКЗ, перемішування, формування та достовірного визначення фактичних характеристик РКЗ отримати бетон класів міцності до С20/25 для певного виду конструкцій, що працюють на стиск та згин.

7. Компанією ТОВ «ДНІПРО ЗБК» був використаний запропонований метод розрахунку складу важкого бетону з РКЗ для влаштування підлоги в одному з приміщень під час нового будівництва складу резервного палива по вул. Байкальській, 9Г в м. Дніпро. За результатами випробування контрольних зразків проєктний клас міцності бетону з РКЗ С16/20 був досягнутий, що підтверджує коректність методу: середня міцність зразків на стиск 24,2 МПа при коефіцієнті варіації 5,8%.

8. На основі даних про вартість сировини для виготовлення важких бетонів, а також вартість робіт з переробки та сортування бетонних відходів в Дніпропетровській області розрахований економічний ефект від заміщення НЗ на РКЗ в бетонах різних класів міцності. Досягнута економія на вартості матеріалів при виробництві 1 м^3 бетону складає 9,6% для бетону класу С12/15, 7,2% для бетону класу С16/20, 7,4% та 6,9% для бетону класу С20/25 в залежності від марки цементу в бетоні на НЗ.

9. За методикою, прийнятою в Європейському Союзі, на основі екологічних декларацій продукції розрахований екологічний ефект від заміщення НЗ на РКЗ в бетоні. Зменшення емісії CO₂ у випадку застосування РКЗ складає 11% при виготовленні бетону класу C16/20; 6,4% при виготовленні бетону класу міцності C20/25 (за умови використання цементу марки M500, порівняно з бетоном на НЗ на цементі марки M500); 26,6% при виготовленні бетону класу міцності C20/25 (за умови використання цементу марки M500, порівняно з бетоном на НЗ на цементі марки M400).

Результати дослідження, що отримані в результаті роботи над дисертацією, опубліковані в роботах [3, 32, 33, 36, 37, 38, 39, 40, 110] та в додатку А.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Білик А. С. Екологічний та економічний аналіз життєвого циклу каркасів будівель : монографія. Київ : УЦСБ, КНУБА, 7БЦ, 2022. 263 с.
2. Гоц. В. І. Бетони і будівельні розчини: підр. – К.: ТОВ УВПК «ЕксОб», К.: КНУБА, 2003 – 472 с.
3. Гусєв В. О., Смирнов А. С., Нікіфорова Т. Д. Використання бетонних сумішей на основі продуктів рециклінгу будівельних відходів для зведення будівель методом 3d-друку. Переможемо – відбудуємо! Тези доповідей всеукраїнського науково-практичного форуму, 29–30 червня 2022 р., Дніпро, 2022. С. 40-41.
4. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Гарніцький Ю. В. Проектування складів бетону із заданими властивостями: навч. посіб. – Р.: РДТУ. – 2000. – 215 с.
5. Дворкін Л. Й. Експериментально-статистичне моделювання при проектуванні складів бетонів: навч. посіб. Київ : Вид. дім "Кондор", 2020. 205 с.
6. Дворкін Л. Й., Мироненко А. В. Будівельні матеріали та вироби із застосуванням промислових відходів : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2019. 298 с.
7. Дворкін Л. Й. Міцність бетону: навч. посіб. Київ : Вид. дім "Кондор", 2021. 310 с.
8. Дворкін Л. Й. Проектування складів бетонів (методи, приклади, вправи): навч. посіб. Київ : Вид. дім "Кондор", 2018. 613 с.
9. ДСТУ Б В.2.7-114-2002. Будівельні матеріали. Суміші бетонні. Методи випробувань. Чинний від 2002-07-01. Вид. офіц. Київ : Держбуд України, 2002.
10. ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності. Чинний від 2009-07-01. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009.
11. ДСТУ Б В.2.7-185:2009. Цементи. Методи визначення нормальної густоти, строків тужавлення та рівномірності зміни об'єму. Чинний від 2010-08-01. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010.

12. ДСТУ Б В.2.7-187:2009. Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск. Чинний від 2010-08-01. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010.
13. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. Чинний від 2010-09-01. Вид. офіц. Київ, 2010.
14. ДСТУ Б В.2.7-215:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Правила підбору складу. Чинний від 2010-09-01. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010.
15. ДСТУ Б В.2.7-224:2009. Бетони. Правила контролю міцності. Чинний від 2010-09-01. Вид. офіц. Київ, 2010.
16. ДСТУ Б В.2.7-232:201. Будівельні матеріали. Пісок для будівельних робіт. Методи випробувань. Чинний від 2011-01-01. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010.
17. ДСТУ Б В.2.7-32-95. Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. Чинний від 1996-01-01. Вид. офіц.
18. ДСТУ Б В.2.7-71-98. Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань. Чинний від 1999-01-01. Вид. офіц.
19. ДСТУ Б В.2.7-74-98. Крупні заповнювачі природні, з відходів промисловості, штучні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Класифікація. Чинний від 1999-01-01. Вид. офіц. Київ, 1999.
20. ДСТУ Б В.2.7-75-98. Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. Чинний від 1999-01-01. Вид. офіц. Київ, 1999.
21. ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013. Настанова щодо визначення складу важкого бетону. Чинний від 2014-07-01. Вид. офіц. 2013.
22. ДСТУ CR 12793:2019. Вимірювання глибини карбонізації затверділого бетону (CR 12793:1997, IDT). Чинний від 2020-01-01. Вид. офіц. 2019.

23. ДСТУ ISO 14025:2008 Екологічні маркування та декларації. Екологічні декларації типу III. Принципи та процедури (ISO 14025:2006, IDT).
24. ДСТУ 9208:2022. Бетони важкі. Технічні умови. Київ: ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», 2023 р.
25. Кропивницька Т. П. Концепція еко-ефективних наномодифікованих лужноактивованих композиційних цементів з високою ранньою міцністю. Вісник Національного університету "Львівська політехніка": Теорія і практика будівництва. 2019. № 912. С. 99–107.
26. Морковська Н. Г., Абделрахем А. Переробка будівельних відходів, що утворюються в Україні. Комунальне господарство міст. 2019. Т. 1, № 147. С. 210–214.
27. Оцінка збитків. Damaged In Ua. URL: <https://damaged.in.ua/damage-assessment> (дата звернення: 15.09.2023).
28. Порядок виконання робіт з демонтажу об'єктів, пошкоджених або зруйнованих внаслідок надзвичайних ситуацій, воєнних дій або терористичних актів: Постанова Кабінету Міністрів України від 19.04.2022 №474. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/474-2022-%D0%BF#Text> (дата звернення: 23.07.2023).
29. Попович О. Р., Захарко Я. М., Мальований М. Проблеми утилізації та переробки будівельних відходів. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2013. № 755. С. 321–324.
30. Про затвердження Порядку поводження з відходами, що утворились у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) будівель та споруд внаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсій або проведенням робіт з ліквідації їх наслідків та внесення змін до деяких постанов Кабінету Міністрів України : Постанова Каб. Міністрів України від 27.09.2022 р. № 1073 : станом на 3 трав. 2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1073-2022-п#Text> (дата звернення: 23.07.2023).

31. Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року : Розпорядж. Каб. Міністрів України від 08.11.2017 р. № 820-р : станом на 17 верес. 2020 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-r#Text> (дата звернення: 10.02.2022).
32. Савицький М., Смирнов А. Властивості вторинних крупних заповнювачів, отриманих в результаті подрібнення бетонних відходів. Будівельні конструкції. Теорія і практика, (14), 2024, С. 19-28. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.14.2024.19-28>.
33. Савицький М. В., Смирнов А. С. Особливості використання подрібненого бетонного брухту в якості крупного заповнювача для бетону. Український журнал будівництва та архітектури, № 6 (018), 2023. С. 111-117.
34. Саницький М.А., Кропивницька Т.П., Іващишин Г.С., Русин Б.Г. Концепція низьковуглецевого розвитку в цементній промисловості. Будівельні матеріали та вироби. 2017. № 5-6. С. 24–27.
35. Саницький М., Кропивницька Т., Круць Т., Гев'юк І. Модифіковані швидкотверднучі клінкер-ефективні бетони. Будівельні матеріали та вироби. 2019. №1-2 (101). С. 24–28.
36. Смирнов А. С., Мислицька А. О. Оцінка можливості застосування переробленого крупного заповнювача в деревогрунтобетонній плиті. Український журнал будівництва та архітектури, № 2 (020), 2024. С. 99-105.
37. Смирнов А. С., Савицький М. В., Нікіфорова Т. Д., Титюк А. О. Огляд досліджень властивостей бетонів з використанням продуктів рециклінгу будівельних відходів. Матеріали III науково-практичної конференції студентів ПДАБА, 26 квітня 2021 р., Дніпро: ПДАБА, 2021. С. 127-129.
38. Смирнов А. С., Савицький М. В., Тимошенко О. А., Колохов В. В., Титюк А. А. Використання продуктів рециклінгу будівельних конструкцій. Інноваційні технології у будівництві, цивільній інженерії та архітектурі. Матеріали XIX міжнародної науково-практичної конференції, 19-22 вересня 2021 р., Чернігів: ДВНЗ ПДАБА, 2021. С. 294-295.

39. Смирнов А., Савицький М., Нікіфорова Т. Бетони на основі продуктів рециклінгу будівельних відходів. Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції: робоча програма та тези доповідей III науково-практичної конференції, присвяченої 35-й річниці аварії на ЧАЕС, 22-23 квітня 2021 р., Київ: Київський національний університет будівництва та архітектури, 2021. С. 23-24.
40. Сопільняк А. М., Колохов В. В., Шляхов К. В., Титюк А. А., Смирнов А. С. Удосконалення залізобетонних огорожувальних конструкцій для малоповерхового будівництва. Український журнал будівництва та архітектури, №2 (008), 2022, ISSN 2710-0367. С. 92-101.
41. Уваров П. Є., Татарченко Г. О., Шпарбер М. Є. Сучасні проблеми рециклінгу вторинних будівельних ресурсів. Наукові вісті Далівського університету. - 2019. - № 16 - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvdu_2019_16_22.
42. Уряд схвалив цілі кліматичної політики України до 2030 року. Урядовий портал. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/uryad-shvaliv-cili-klimatichnoyi-politiki-ukrayini-do-2030-roku> (дата звернення: 15.11.2023).
43. Шуваєв А. Інструментарій залучення відходів будівництва та зносу до повторного господарського циклу в контексті їх класифікаційних ознак. Грааль науки. 2021. С. 600–605.
44. Abbas A. et al. Environmental Benefits of Green Concrete. 2006 IEEE EIC Climate Change Conference, Ottawa, ON, Canada, 10–12 May 2006. 2006.
45. Abbas A, Fathifazl G, Isgor OB, Razaqpur AG, Fouriner B, Foo S. Creep and drying shrinkage characteristics of concrete produced with coarse recycled concrete aggregate. Cement and Concrete Composites. 2011. Vol. 33, no. 10. P. 1026–1037.
46. Abbas A, Fathifazl G, Isgor OB, Razaqpur AG, Fouriner B, Foo S. Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method. Cement & Concrete Composites 31 (2009), p. 555–563.

47. Abbas A, Fathifazl G, Isgor OB, Razaqpur AG, Fouriner B, Foo S. Environmental benefits of green concrete. In: Climate change conference; 2006.
48. Abbas A., Fathifazl G., Burkan Isgor O., Razaqpur A. G., Fournier B., Foo S., Zavadil R. Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis //Materials Characterization. – 2009. – Vol. 60, no. 7. – P. 716–728.
49. Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. Cement and Concrete Composites. 2002. Vol. 24, no. 2. P. 269–279.
50. Buttler A. M., Machado E. F. Properties of Concrete with Recycled Concrete Coarse Aggregates. SP-229: Quality of Concrete Structures and Recent Advances in Concrete Materials and Testing. 2005.
51. Carlo De Pauw, Johan Vyncke and Jan Desmyter. Reuse of demolition waste as aggregates in concrete. A new challenge or the re-introduction of old practice? Sustainable Construction. Tampa, Florida, USA, November 6-9, 1994. P.385-394.
52. Chang H., Morgan R., Aziz U., Herfellner S., Ho K. Performance and Implementation of Low-Quality Recycled Concrete Aggregate. Consilience: The Journal of Sustainable Development. 2013, No. 10 (2013), pp. 72-84.
53. De Oliveira M. B., Vazquez E. The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. Waste Management. 1996. Vol. 16, no. 1-3. P. 113–117.
54. Dean S. W., Abbas A., Fathifazl G., Burkan Isgor O., Razaqpur A. G., Fournier B., Foo S. Proposed Method for Determining the Residual Mortar Content of Recycled Concrete Aggregates //Journal of ASTM International. 2008. – Vol. 5, no. 1. – P. 101087.
55. Despotović I., Savić A., Kovačević M., Bojković J., Mandić V. Recycled concrete aggregate properties improvement. Engineering Today. Vol. 2 (2023) No. 4. P. 59-66.

56. Dhir R. K., Limbachiya M. C., Leelawat T. Suitability of Recycled Concrete Aggregate for Use in BS 5328 Designated Mixes. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings. 1999. Vol. 134, no. 3. P. 257–274.
57. Dodds W., Goodier C., Christodoulou C., Austin S., Dunne D. Durability performance of sustainable structural concrete: Effect of coarse crushed concrete aggregate on microstructure and water ingress. Construction and Building Materials 145 (2017) 183–195.
58. Dos Santos J. R., Branco F., de Brito J. Mechanical Properties of Concrete with Coarse Recycled Aggregates. Structural Engineering International. 2004. Vol. 14, no. 3. P. 213–215.
59. EN 15978:2011. Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method. [valid from 2011-11-30]. European Committee for Standardization, 2011. 64 p.
60. ErcTech [Электронный ресурс] / ERC-TECH solution. – Режим доступа: <http://www.erc-tech.eu/circular-economy/> – Назва з екрана. – Дата перегляду: 07.12.2020.
61. EU Construction & Demolition Waste Management Protocol, 2016.
62. European Commission. (2016a). The European construction sector. A global partner, Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Directorate General for Joint Research Centre, Retrieved June 14, 2018, from <http://ec.europa.eu/docsroom/documents/15866/attachments/1/translations/en/renditions/native>.
63. Facebook [Электронный ресурс] / Facebook. URL: <https://www.facebook.com/MinregionUkraine/posts/pfbid0rJGSkspLRGADAFGQ5e6Dzwp5vesGtn4P5tZWMD1KL7symp4nKeYskrhWnsnUJyXl> (дата звернення: 20.09.2022).
64. Fathifazl G. and Razaqpur A. G. Creep Rheological Models for Recycled Aggregate Concrete. ACI Mater. J., vol. 110, no. 2, pp. 115–126, 2014.

65. Fathifazl G., Razaqpur A. G., Isgor O. B., Abbas A., Fournier B., and Foo S. Flexural Performance of Steel-Reinforced Recycled Concrete Beams. *ACI Mater. J.*, vol. 106, no. 6, pp. 858–867, 2010.
66. Fuller W. B., Thompson S. E. *The Laws of Proportioning Concrete*. Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1907. Vol. 59, no. 2. P. 67–143.
67. Fumoto, T., and Yamada, M. Strength and Drying Shrinkage of Concrete Used Recycled Aggregate. *Memoirs of Faculty of Engineering Osaka City University*. 2003. Vol. 44, pp. 79-82.
68. Gómez-Soberón J. M. V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*. 2002. Vol. 32, no. 8. P. 1301–1311.
69. Guo, Z., An Tu, Chen, C., Dawn. E. Lehman. (2018). Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of concrete building blocks incorporating recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 199: 136–149.
70. Hansen T. C. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985. *Materials and Structures*. 1986. Vol. 19, no. 3. P. 201–246.
71. Hansen T. C. *Recycling of Demolished Concrete and Masonry: Report of Technical Committee 37-DRC, Demolition and Reuse of Concrete*. Spon Pr, 1992. 316 p.
72. Hu Y., Li J., Gao P., Zhan B., Yu Y., Yang Y., Hong L., Yu Q. Quantification of the residual mortar's distribution and wrapping degree in recycled concrete aggregate based on 3-D reconstruction technology. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 414. P. 134983.
73. Hummel A. *Das Beton-ABC*. Zwölfte Auflage. Berlin, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, 1959, 288 S.
74. Ignjatović, I.S., S.B. Marinković, and N. Tošić (2017). Shear behaviour of recycled aggregate concrete beams with and without shear reinforcement. *Engineering Structures*, 141: 386–401.

75. Ismail, S., W.H. Kwan, and M. Ramli (2017). Mechanical strength and durability properties of concrete containing treated recycled concrete aggregates under different curing conditions. *Construction and Building Materials*, 155: 296–306.
76. Jayasuriya A., Adams M.P., Bandelt M. J. Generation and Numerical Analysis of Random Aggregate Structures in Recycled Concrete Aggregate Systems. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2020, 32(4): 04020044. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003113.
77. Katkhuda, H. and N. Shatarat (2016). Shear behavior of reinforced concrete beams using treated recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 125: 63–71.
78. Kou, S.-C., Poon, C. S. & Etxeberria, M. 2011. Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 33, p. 286–291.
79. Kuosa H. Reuse of recycled aggregates and other C&D wastes. Research Report VTT-R-05984-12.
80. Limbachiya M. C., Leelawat T., Dhir R. K. Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures*. 2000. Vol. 33, no. 9. P. 574–580.
81. Lucero C. Recycled Concrete Aggregate for Use in Reclamation Structures. Final Report ST-2017-1787-01. Civil Engineer, Concrete, Geotechnical, and Structural Laboratory, 86-68530. Technical Service Center U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, PO Box 25007, Denver CO 80225-0007. 2017.
82. Lye, C., Dhir, R., Ghataora, G. Elastic modulus of concrete made with recycled aggregates. *Institution of Civil Engineers. Proceedings. Structures and Buildings*. Birmingham, UK, 2016, vol. 169. P.314-339.
83. Marie, I., Quiasrawi, H. Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*. 2012. Vol. 37. P. 243–248.
84. Merlet, J.D., Pimienta, P. Mechanical and Physico-Chemical Properties of Concrete Produced with Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregates. *Proceeding*

of 3rd International RILEM Symposium Demolition Reuse Concrete Masonry. 1994, pp. 343-353.

85. Nagataki S., Gokce A., Saeki T., Hisada M. Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*. 2004. Vol. 34, no. 6. P. 965–971.

86. Neville A. M. *Properties of concrete*. 4th ed. Harlow : Longman, 1995. 844 p.

87. OEKOBAU.DAT. [Электронный ресурс] / ÖKOBAUDAT. URL: https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=d47c49c6-fb84-4b33-9710-bb442180823b&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=en (дата звернення 29.04.2024 р.).

88. OEKOBAU.DAT. [Электронный ресурс] / ÖKOBAUDAT. URL: https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=304088d3-b7e0-4e6c-ac37-2044e7587bf1&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=en (дата звернення 29.04.2024 р.).

89. OEKOBAU.DAT. [Электронный ресурс] / ÖKOBAUDAT. URL: https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=8125026b-602d-47d5-9087-7470c457d10a&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=en (дата звернення 29.04.2024 р.).

90. OEKOBAU.DAT. [Электронный ресурс] / ÖKOBAUDAT. URL: https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=8b4a0996-cd52-489c-9bed-5c5d0ee3fb67&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=en (дата звернення 29.04.2024 р.).

91. OEKOBAU.DAT. [Электронный ресурс] / ÖKOBAUDAT. URL: https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=933a0516-62c4-4e70-b8df-4289bc5b10f7&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=en (дата звернення 29.04.2024 р.).

92. OEKOBAU.DAT. [Электронный ресурс] / ÖKOBAUDAT. URL: <https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=fee19a6f->

- 6f79-4906-88fd-41e94757aa3c&version=00.02.000&stock=OBD_2023_I&lang=en
(дата звернення 29.04.2024 р.).
93. OEKOBAU.DAT. [Електронний ресурс] / ÖKOBAUDAT. URL: https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=923e1c71-f172-4902-a5f5-c4a1e8a773bc&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=en
(дата звернення 29.04.2024 р.).
94. Opara H. E., Eziefula U. G., Ugwuegbu C. C. Experimental study of concrete using recycled coarse aggregate. *International Journal of Materials and Structural Integrity*. 2016. Vol. 10, no. 4. P. 123.
95. Otsuki N., Miyazato S.-i., Yodsudjai W. Influence of Recycled Aggregate on Interfacial Transition Zone, Strength, Chloride Penetration and Carbonation of Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2003. Vol. 15, no. 5. P. 443–451.
96. Otsuki N., Yodsudjai W., Nishida, T., Yamane, H. Developed method for measuring flexural strength and modulus of elasticity of micro-regions in normal and recycled aggregate concretes. *Magazine of Concrete Research*. 2003. Vol. 55, no. 5. P. 439–448.
97. Ozbakkaloglu, T., A. Gholampour, and T. Xie (2018). Mechanical and Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete: Effect of Recycled Aggregate Properties and Content. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(2).
98. Pacheco J., de Brito J., Chastre C., Evangelista L. Recycled concrete for structural applications. *Recycled Concrete*. 2023. P. 195–231.
99. Panagapko D. A. 2003. *Canadian Minerals Yearbook*. Ottawa : Natural Resources Canada.
100. Pedro, D., J. de Brito, and L. Evangelista (2018). Durability performance of high-performance concrete made with recycled aggregates, fly ash and densified silica fume. *Cement and Concrete Composites*, 93: 63–74.
101. Pedro D., de Brito J. and Evangelista L. Performance of concrete made with aggregates recycled from precasting industry waste - Influence of the crushing process. *Materials and Structures*. 2015, 48(12):3965-3978.

102. Poon C. S., Shui Z. H., Lam L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. 2004. Vol. 18, no. 6. P. 461–468.
103. Ray S. P., Venkateswarlu B. Recycled aggregate concrete. *Journal of Structural Engineering*. 1991. 18(2):67–75.
104. Richardson A.E., Coventry K., Graham S. Concrete manufacture with un-graded recycled aggregates. *Structural Survey*. University of Northumbria, Newcastle upon Tyne, UK, 2009, vol. 27 (1). P.62-70.
105. Ryu J. S. An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties. *Magazine of Concrete Research*. 2002. Vol. 54, no. 1. P. 7–12.
106. Salesa A., Perez-Benedicto J. A., Colorado-Aranguren D., Esteban L. M., Sanz-baldúz L. J., Pedro L. L., Ramis J., Olivares D. Physico-mechanical properties of multi-recycled concrete from precast concrete industry. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 141. P. 248–255.
107. Sato R., Maruyama I., Sogabe T., Sogo M. Flexural Behavior of Reinforced Recycled Concrete Beams. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2007. Vol. 5, no. 1. P. 43–61.
108. Silva R. V., de Brito J., Dhir R. K. Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 83. P. 108–118.
109. Silva R.V., Neves R., de Brito J., Dhir R.K. Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2015. Vol. 62. P. 22–32.
110. Smyrnov A. S., Savytskyi M. V., Myslytska A. O. Properties of recycled coarse aggregates made of concrete waste. *Просування енергоефективності та підготовка фахівців для відбудови України. Матеріали науково-практичної конференції, 13 березня 2024 р., Дніпро, 2024. С. 12-15.*
111. Topçu İ. B., Günçan N. F. Using waste concrete as aggregate. *Cement and Concrete Research*. 1995. Vol. 25, no. 7. P. 1385–1390.
112. Topçu İ. B., Şengel S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*. 2004. Vol. 34, no. 8. P. 1307–1312.

113. Ulloa V. A., García-taengua E., Pelufo M., Domingo A., Serna P. New Views on Effect of Recycled Aggregates on Concrete Compressive Strength. *ACI Materials Journal*. 2013. Vol. 110, no. 6. pp. 687–696.
114. Use of Recycled Concrete Pavement as Aggregate in Hydraulic-Cement Concrete Pavement. FHWA Tech. Advis., vol. T 5040.37.
115. Waseem, S.A. and B. Singh (2016). Shear transfer strength of normal and high-strength recycled aggregate concrete – An experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 125: 29–40.
116. World Commission on Environment and Development. *Our Common Future*. Oxford University, UK. 1987. P.37-38
117. Yang K.-H., Chung H.-S., Ashour A. F. Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties. 2008. URL: <http://hdl.handle.net/10454/7768>.
118. Yang S., Lee H. Mechanical properties of recycled aggregate concrete proportioned with modified equivalent mortar volume method for paving applications. *Constr. Build. Mater.*, 136 (2017), pp. 9-17.

ДОДАТОК А

ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Сопільняк А. М., Колохов В. В., Шляхов К. В., Титюк А. А., Смирнов А. С. Удосконалення залізобетонних огорожувальних конструкцій для малоповерхового будівництва. Український журнал будівництва та архітектури, №2 (008), 2022, ISSN 2710-0367. С. 92-101. DOI:10.30838/J.BPSACEA.2312.260422.92.856
2. Савицький М. В., Смирнов А. С. Особливості використання подрібненого бетонного брухту в якості крупного заповнювача для бетону. Український журнал будівництва та архітектури, № 6 (018), 2023. С. 111-117. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.261223.111.1013>.
3. Смирнов А. С., Мислицька А. О. Оцінка можливості застосування переробленого крупного заповнювача в деревогрунтобетонній плиті. Український журнал будівництва та архітектури, № 2 (020), 2024. С. 99-105. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.99.1048>.
4. Савицький М., Смирнов А. Властивості вторинних крупних заповнювачів, отриманих в результаті подрібнення бетонних відходів. Будівельні конструкції. Теорія і практика, (14), 2024, С. 19-28. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.14.2024.19-28>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. Смирнов А., Савицький М., Нікіфорова Т. Бетони на основі продуктів рециклінгу будівельних відходів. Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції: робоча програма та тези доповідей III науково-практичної конференції, присвяченої 35-й річниці аварії на ЧАЕС, 22-23 квітня 2021 р., Київ: Київський національний університет будівництва та архітектури, 2021. С. 23-24 (форма участі – доповідач).

6. Смирнов А. С., Савицький М. В., Нікіфорова Т. Д., Титюк А. О. Огляд досліджень властивостей бетонів з використанням продуктів рециклінгу будівельних відходів. Матеріали III науково-практичної конференції студентів ПДАБА, 26 квітня 2021 р., Дніпро: ПДАБА, 2021. С. 127-129 (форма участі – доповідач).
7. Смирнов А. С., Савицький М. В., Тимошенко О. А., Колохов В. В., Титюк А. А. Використання продуктів рециклінгу будівельних конструкцій. Інноваційні технології у будівництві, цивільній інженерії та архітектурі. Матеріали XIX міжнародної науково-практичної конференції, 19-22 вересня 2021 р., Чернігів: ДВНЗ ПДАБА, 2021. С. 294-295 (форма участі – доповідач).
8. Гусєв В. О., Смирнов А. С., Нікіфорова Т. Д. Використання бетонних сумішей на основі продуктів рециклінгу будівельних відходів для зведення будівель методом 3d-друку. Переможемо – відбудуємо! Тези доповідей всеукраїнського науково-практичного форуму, 29–30 червня 2022 р., Дніпро, 2022. С. 40-41 (форма участі – співавтор).
9. Smyrnov A. S., Savytskyi M. V., Myslytska A. O. Properties of recycled coarse aggregates made of concrete waste. Просування енергоефективності та підготовка фахівців для відбудови України. Матеріали науково-практичної конференції, 13 березня 2024 р., Дніпро, 2024. С. 12-15 (форма участі – доповідач).

ДОДАТОК Б



ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ "ДНІПРО ЗБК"
49022, Україна, Дніпропетровська обл., м. Дніпро, вул. Повітряна, буд. 5,
код за ЄДРПОУ 41664779, ПІН 416647704681, Св-во ПДВ № 1704684500109
п/р UA653071230000026001010842953 у банку БАНК ВОСТОК ПАТ

Вих. № 010224/2 від 01.02.2024 р.

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

В рамках виконання будівельно-монтажних робіт з улаштування приміщення згідно з кресленнями проекту «Нове будівництво складу резервного палива по вул. Байкальській, 9Г та у районі вул. Байкальської, 9Г», (договір №01062022 від 01.06.2022 р., замовник ТОВ «АЯКС ДНІПРО») ТОВ «ДНІПРО ЗБК» в листопаді 2023 р. виконувало влаштування підлоги в приміщенні складського призначення.

Дотримуючись принципів сталого розвитку, ТОВ «ДНІПРО ЗБК» відгукнулось на пропозицію аспіранта кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій Придніпровської державної академії будівництва та архітектури Смирнова А. С. застосувати бетон з крупним заповнювачем рециклінгового походження з розрахунком складу за удосконаленим розрахунково-експериментальним методом. Проектом передбачалось влаштування армованої підлоги товщиною 100 мм з бетону класу міцності С16/20, рухливість бетонної суміші Р1 (ОК=4-5 см). В якості крупного заповнювача використовувався подрібнений до фракції 20-25 мм бетон некондиційних фундаментних блоків.

Смирновим А. С. відібрані контрольні проби піска та щебня з подрібненого бетону та виконані лабораторні дослідження їх характеристик. Після цього надані рекомендації щодо зернового складу крупного заповнювача, а також склад бетонної суміші. Бетон замішувався безпосередньо на будівельному майданчику в електричному бетонозмішувачі. Отримана рухливість бетонної суміші ОК=4,5 см. Ущільнення бетону відбувалось за допомогою віброрейки. З бетонної суміші відібрані три контрольні зразки-куби розміром 100x100x100 мм для випробування на міцність у віці 28 діб. Зразки передані на зберігання в лабораторію.

Після випробування зразків на міцність на стиск Смирновим А. С. надана копія Протоколу №01/12-23 випробувань бетону від 20.12.2023 р. Згідно з протоколом досягнута середня міцність бетону 24,2 МПа, що відповідає проектному класу бетону С16/20.

Таким чином, удосконалений метод розрахунку складу бетону з крупним заповнювачем рециклінгового походження, запропонований Смирновим А. С., дозволяє отримати важкий бетон з заданими характеристиками. Враховуючи сучасні тенденції до підвищення екологічності будівельної продукції, зменшення обсягів відходів будівництва, такий підхід є перспективним для подальшого застосування. ТОВ «ДНІПРО ЗБК» налаштоване на подальшу співпрацю зі Смирновим А. С.

Директор



Віталій СПІРІДОНЕНКОВ

Продовження додатку Б



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ


ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

49600 м. Дніпро, вул. Архітектора Олега Петрова, 24 а Телефон: (067) 921-10-19 e-mail: vlabud@ukr.net

ВИПРОБУВАЛЬНА ЛАБОРАТОРІЯз випробування будівельних конструкцій та матеріалів
Свідоцтво № ПЧ 06-2/1118-2023 від 23 березня 2023 року

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідуючий випробувальною
лабораторією ПДАБА
 (Голобок О.О.)

«20» грудня 2023 р.

ПРОТОКОЛ №01/12-23

випробувань важкого бетону

Замовник та його адреса:

ТОВ «ДНІПРО ЗБК»

49022, Україна, м. Дніпро, вул. Повітряна, 5

- 1 Характеристика зразків продукції для випробувань:
- куби бетонні з довжиною ребра 100 мм в кількості 3 шт., позначені №1,2,3;
- 2 Зразки для випробувань: відібрані та доставлені представником **Замовника** Смирновим Антоном Сергійовичем
- 3 Вимоги нормативних документів до показників продукції, що визначались під час проведення випробувань:
 1. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками.
 2. ДСТУ Б В.2.7-224:2009. Бетони. Правила контролю міцності.
- 4 Дата отримання зразків для випробувань: 20 грудня 2023 р.
- 5 Дата проведення випробувань: 20 грудня 2023 р.
- 6 Дата складання протоколу: 20 грудня 2023 р.
- 7 Місце та умови проведення випробувань: Приміщення випробувальної лабораторії.
Температура повітря - 16°C. Відносна вологість повітря - 84 %.
- 8 Тип та основні характеристики засобів виміральної техніки та випробувального обладнання застосованого при випробуванні наведені в таблиці 1

Продовження додатку Б

Продовження протоколу №01/12-23 від 20 грудня 2023 р.

Таблиця 1

Найменування	Позначення	Межа вимірювань	Похибка вимірювань
Штангенциркуль	ШЦ-II-250-0,05	0 - 250 мм	± 0,05 мм
Кутник повірочний	УП	90°	
Терези	РН-10Ц13М	0,1 – 10 кг	± 5 г
Прес гідравлічний	П-125	0-125 тс	± 2%

Таблиця 2

№ п/п	Маркування зразка	Лінійні розміри			Маса, г	Густина, г/см ³	Масштабний коеф., α	Площа, см ²	Руйнівне зусилля, кН	Міцність, МПа
		Довжина, мм	Ширина, мм	Висота, мм						
1.	1	101	100	101	2291	2,25	0,95	101	245,50	23,1
2.	2	101	101	101	2282	2,21	0,95	102	258,00	24,0
3.	3	100	100	100	2275	2,28	0,95	100	268,25	25,5

- 1) Середня міцність бетону в партії $f_{cm}=24,2$ МПа
 2) Коефіцієнт варіації $V_{cm}=5,8\%$
 3) Коефіцієнт необхідної міцності $k_t=1,07$
 4) Клас бетону С16/20

*Примітки: 1 Результати випробувань стосуються тільки зразків, що пройшли випробування.
 2 Протокол випробувань не можна відтворювати частково без письмового дозволу випробувальної лабораторії.*

Відповідальний виконавець, к.т.н., експерт

Виконавець



Андрій ТИТЮК

Олександр ЛЯСОТА

ДОДАТОК В



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Голова комісії з реорганізації Придніпровської державної академії будівництва та архітектури,
доктор технічних наук, професор
Владислав ДАНШЕВСЬКИЙ
26.02.2024 року

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, що підписалися нижче, декан будівельного факультету Нікіфорова Т. Д., начальник навчального відділу Грабовський І. С., науковий керівник дисертаційної роботи Савицький М. В. та виконавець роботи аспірант Смирнов А. С., склали цей акт у тому, що результати дисертації Смирнова А. С. на тему «Бетони з використанням крупного заповнювача рециклінгового походження» впроваджено до навчального процесу у Придніпровській державній академії будівництва та архітектури.

Результати розділів 3-4 (Властивості рециклінгових заповнювачів та бетонів з крупним заповнювачем рециклінгового походження) використовуються при читанні лекцій з дисципліни «Будівельні матеріали» на будівельному факультеті для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, «Рациональне проєктування залізобетонних і кам'яних конструкцій будівель та споруд» на будівельному факультеті для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти. Результати розділу 5 (Оцінка екологічного ефекту від застосування рециклінгових заповнювачів) використовуються при читанні лекцій з дисципліни «Особливості проєктування сталіх будівель» на будівельному факультеті для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти.

Декан будівельного факультету,
д.т.н., проф.

Тетяна НІКІФОРОВА

Начальник навчального відділу,
к.е.н., доц.

Ігор ГРАБОВСЬКИЙ

Науковий керівник, д.т.н., проф.

Микола САВИЦЬКИЙ

Здобувач, асп.

Антон СМІРНОВ