

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА ТА
АРХІТЕКТУРИ

*Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису*

ПІРОГОВ ДМИТРО ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 691.328.4

**ДИСЕРТАЦІЯ
МЕХАНОХІМІЧНА АКТИВАЦІЯ ЗМІШАНОГО ЦЕМЕНТУ І ЇЇ
ВПЛИВ НА ЯКІСТЬ БУДІВЕЛЬНИХ КОМПОЗИТИВ РІЗНОГО
ПРИЗНАЧЕННЯ**

Спеціальність 192 – Будівництво та цивільна інженерія
Галузь знань 19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

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

 Д.О. Пірогов

Науковий керівник:

Барабаш Іван Васильович,
доктор технічних наук, професор

ОДЕСА-2024

АНОТАЦІЯ

Пірогов Д.О. Механохімічна активація змішаного цементу і її вплив на якість будівельних композитів різного призначення.-На правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія».-Одеська державна академія будівництва та архітектури Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2024.

Дисертаційна робота присвячена теоретичному і експериментальному дослідженню будівельного розчину та бетону на механоактивованому змішаному цементі. Розкриття потенційних можливостей портландцементу та його різновидів шляхом зростання їх активності дозволяє вирішувати задачі як підвищення механічних і експлуатаційних властивостей бетону, так і зниження його енерго- і матеріалоємності. Перспективним напрямом можливо рахувати механохімічну обробку портландцементу перед вживанням у виробництво у спеціально сконструйованому роторному протитечійному млині.

В роботі розглядалися питання по вирішенню:

- а) впливу механоактивації в'язучого в роторному протитечійному млині на зміну його ефективної в'язкості;
- б) впливу механоактивації портландцементу на зміну його: 1) питомої поверхні; 2) нормальної густоти та термінів тужавлення; 3) кількості хімічно зв'язаної води; 4) кінетики екзотермічного розігріву тверднучої цементної композиції;
- в) впливу механоактивації змішаного цементу і рецептурних факторів на міцність при стиску будівельного розчину;
- г) впливу механоактивації змішаного цементу і рецептурних факторів на міцність при стиску та стиранність важкого бетону.

Дослідженню піддавались будівельні розчини і бетони як на механоактивованому змішаному в'язучому, так і на в'язучому, яке механоактивації не підлягало (контроль). Механоактивація цементу та цементовміщуючих композицій здійснювалась в роторному протитечійному

млині протягом 60; 180; 300 і 600 сек. Для контролю використовувалось в'язуче, яке механохімічній активації не підлягало. Експериментально встановлено, що механоактивація цементу в млині протягом заданих проміжків часу викликає незначне зростання ефективної в'язкості цементовміщуючої композиції ($V/C=0,35$) - від 198 сП – механоактивація відсутня, до 223 сП – механоактивація цементу протягом 300 сек. Зростання терміну активації в'язучого від 300 до 600 сек незначно віддзеркалюється на підвищенні ефективної в'язкості і не перевищує 230 сП.

Експериментально встановлено, що механохімічна обробка в'язучого в протитечійному млині приводе до зростання його питомої поверхні з 415 m^2/kg (активація відсутня) до 450 m^2/kg (активація протягом 600 сек). Слід відмітити досить інтенсивне зростання питомої поверхні цементу в перші 60 сек активації (від 415 до 430 m^2/kg). В подальшому зростання питомої поверхні сповільнюється, досягаючи 445 m^2/kg після 300 сек активації. Подальше зростання терміну активації від 300 до 600 сек викликає зростання питомої поверхні цементу не більше ніж на 5 m^2/kg (з 445 до 450 m^2/kg).

Експериментально виявлено, що цементний камінь на механоактивованому в'язучому характеризується підвищеною кількістю хімічно зв'язаної води в порівнянні з цементним каменем, в'язуче якого активації не підлягало. Термін активації цементу впливає на кількість хімічно зв'язаної води, досягаючи максимального значення при 600-и секундній механохімічній обробці цементу. Слід відзначити, що основна кількість хімічно зв'язаної води досягається в період до 300 сек активації в'язучого. Підтвердженням ефективності механохімічної активації цементу в роторному протитечійному млині є дані по екзотермічному розігріву цементовміщуючих композицій. Одержані експериментальні дані свідчать про значний вплив на зростання інтенсивності екзотермічного розігріву тверднучого цементного каменю механохімічної активації цементу. Встановлено, що активація цементу протягом 300 сек викликає зростання температури тверднучого цементного каменю з 20,3 °C до 64,0 °C, тобто

майже на 44 °С. Зростання терміну активації в'язучого від 300 до 600 сек незначно впливає на зростання максимального розігріву цементного каменю і не перевищує 2,2 °С. Активація в'язучого протягом 300 сек позитивно відображається і на термінах тужавлення цементного тіста. В порівнянні з контролем (в'язуче механохімічній активації не підлягало) механоактивоване в'язуче характеризується більш короткими термінами як початку тужавлення (скорочення терміну з 2 год 55 хв до 1 год 55 хв), так і кінця тужавлення (скорочення терміну з 4 год 50 хв до 3 год 40 хв). Результати досліджень дозволяють зробити висновок про те, що механоактивація в'язучого викликає прискорення процесів структуроутворення тверднучих цементноводних композицій.

Представляв інтерес в'яснити вплив механохімічної обробки не тільки портландцементу, а також цементу з добавкою кварцового піску (в кількості від 10 до 50 % маси цементу) на міцність цементного каменю при стиску в 28-и денному віці. Механохімічна активація портландцементу, а також суміші (портландцемент + кварцовий пісок) в роторному протитечійному млині здійснювалася протягом 60, 180, 300 і 600 сек. Для контролю використовувався портландцемент з добавкою аналогічної кількості немеленого кварцового піску (до 50 %). Одержана суміш механоактивації не підлягала. Досліджувалася міцність при стиску зразків-балочок розміром 4x4x16 см, які були виготовлені з використанням змішаного цементу. Витрата води визначалася розпливом розчинової суміші на приборі Сутгарда в діапазоні 90±5 мм. Експериментально встановлено, що активація змішаного цементу викликає підвищення міцності при стиску цементного каменю в зоні максимуму з 52 МПа (термін активації 60 сек) до 62 МПа (термін активації 300 сек), тобто майже на 20 %. Зростання терміну активації до 600 сек незначно впливає на зростання міцності цементного каменю і не перевищує 3 %. Слід відмітити про неоднозначний вплив витрати кварцового піску на міцність цементного каменю для різних технологій виготовлення в'язучого. Так, якщо для контрольних зразків характерно зниження міцності при стиску

при зростанні вмісту в цементі кварцового піску, то для цементного каменю на активованому змішаному в'язучому спостерігається підвищення міцності із зростанням витрати кварцового піску. Максимальна міцність досягається при наявності в змішаному в'язучому 20 % кварцового піску. Міцність при стиску цементного каменю в цьому разі досягає значення 62,5 МПа (термін активації змішаного в'язучого складає 300 сек), що на 10 % перевищує міцність цементного каменю на бездобавочному механоактивованому цементі. Проведені дослідження дозволяють зробити висновок про те, що оптимальним за складом є активоване змішане в'язуче, яке включає в себе 80 % портландцементу та 20 % кварцового піску. Термін активації змішаного в'язучого складає 300 сек. Такий склад активованого змішаного в'язучого та термін активації його були прийняті в подальших дослідженнях як будівельного розчину так і бетону.

Розглянуті питання, пов'язані із з'ясуванням впливу витрати активованого змішаного цементу на міцність будівельного розчину. Поряд з цим фактором варіювалися також наступні незалежні змінні, а саме: витрата суперпластифікатору С-3 та мікрокремнезему. Рівні факторів варіювалися в наступних границях:

X_1 – цементно-піщане відношення розчинової суміші – від 1:3 до 1:1;

X_2 – вміст суперпластифікатору С-3 (від маси цементу) – $0,75 \pm 0,75$ %;

X_3 – кількість мікрокремнезему (від маси цементу) – 5 ± 5 %.

Для контролю проводився планований експеримент на портландцементі, який механохімічній активації не підлягав. Витрата води замішування для кожної строчки планового експерименту приймалася з розрахунку одержання діаметру розпливу конусу суміші на струшувальному столику після 30 струшувань в діапазоні 130 ± 2 мм. Заданий діаметр розпливу розчинової суміші приймався однаковим для двох порівнювальних технологій. Аналіз математичних моделей свідчить про те, що згідно величин коефіцієнтів при варійованих факторах як на механоактивованому змішаному в'язучому, так і на в'язучому, яке механоактивації не підлягало,

найбільший вплив на міцність при стиску будівельного розчину в 28-и денному віці надає вміст змішаного цементу в ньому. Слід відзначити, що зростання вмісту активованого змішаного цементу в будівельному розчині від 440 до 850 кг/м³ приведе до підвищення його міцності при стиску з 25 МПа до 48 МПа (вміст С-3 = 0 %). Наступним за впливом на міцність будівельного розчину є витрата суперпластифікатора С-3. Зростання його витрати до 1,5 % маси цементу викликає зростання міцності будівельного розчину на механоактивованому в'язучому від 36 МПа (витрата в'язучого 440 кг/м³) до 58 МПа, тобто більш ніж на 60 %. Мінімальний вклад в підвищення міцності при стиску будівельного розчину надає мікрокремнезем. Введення його до складу розчинової суміші в кількості 10 % (від маси в'язучого) викликає підвищення міцності в марочному віці не більше, ніж на 4...5 МПа. Сумісний вплив механохімічної активації змішаного в'язучого, використання С-3 (1,5 %) та мікрокремнезему (10 %) забезпечує одержання будівельного розчину з міцністю при стиску 65 МПа, що більше ніж на 60 % перевищує міцність контрольного розчину (в'язуче – немеханоактивоване; С-3 та мікрокремнезем-відсутні). В роботі розглянуто вплив рецептурно-технологічних факторів на міцність при стиску бетону на активованому змішаному цементі в ранньому (2 доби) та марочному віці (28 діб). Крім міцності при стиску досліджувалась також стиранність бетону в 28-и добовому віці. Для досягнення заданої цілі проводився 3-х факторний експеримент за 15-и точковим симетричним планом. Для контролю проводився плановий експеримент на портландцементі, який механоактивації не підлягав. В експерименті варіювалися такі фактори складу:

X_1 – суперпластифікатор С-3 в кількості $0,75 \pm 0,75$ % (від маси цементу в змішаному в'язучому);

X_2 – мікрокремнезем в кількості 5 ± 5 % (від маси цементу в змішаному в'язучому);

X_3 – базальтова фібра в кількості 1 ± 1 % (від маси цементу в змішаному в'язучому).

Всі досліджені склади бетонної суміші мали рівну рухливість ($OK=6 \pm 1$ см). Витрата змішаного в'язучого складала 480 кг/м^3 бетону, що відповідала середній витраті в'язучого в промисловому будівництві. Математичні моделі, які відтворюють міцність бетону при стиску, дозволяють зробити висновки про те, що згідно коефіцієнтів при змінних факторах (X_1, X_2, X_3), найбільший вплив на міцність бетону надає витрата суперпластифікатору С-3. Зростання витрати С-3 від 0 до 1,5 % викликає зростання міцності бетону, при цьому, на 40...42 %.

Наступним за величиною впливу на міцність бетону є мікрокремнезем. Зростання його концентрації в змішаному в'язучому від 0 до 10 % викликає підвищення міцності бетону на 12...15 %. Введення в склад бетонної суміші базальтової фібри (до 2 %) сприяє підвищенню міцності бетону при стиску на 5...7 %. Максимальну міцність бетону при стиску $f_{\text{ск.субе.к.2}} = 39,4$ МПа (контроль) і $f_{\text{ск.субе.а.2}} = 60,8$ МПа (механоактивація) показують склади в точках з однаковими координатами: $X_1=+1; X_2=+1; X_3=+1$. В 28-добовому віці максимальна міцність бетону при стиску ($f_{\text{ск.субе.к.28}} = 61$ МПа і $f_{\text{ск.субе.а.28}} = 76,2$ МПа) досягається в точках з однаковими координатами $X_1=X_2=X_3=+1$. Слід відмітити, що зростання міцності бетону в 2-х добовому віці внаслідок активації змішаного в'язучого складає не менше 54 %. В більш зрілому віці (28 діб) ефект від механоактивації змішаного в'язучого дещо знижується, але все ж не опускається нижче 25 %. Експериментально підтверджено значний вплив механоактивації змішаного в'язучого на стиранність бетону. Із рецептурних факторів визначальний вплив на стиранність бетону марочного віку надає вміст суперпластифікатору С-3. Зростання витрати С-3 від 0 до 1,5 % забезпечує зниження величини стиранності бетону майже на 40 %. На відміну від міцності бетону при стиску, наступним по впливу фактором на стиранність є витрата базальтової фібри. Введення її до складу бетонної суміші в кількості 2 % (від вмісту цементу) забезпечує зниження стиранності (в порівнянні з бетоном без фібри) в середньому на 17...20 %.

Мінімальну стиранність ($G^{a.28}=0,18$ г/см²) показує склад бетону в точці з координатами $X_1=X_2=X_3=+1$.

Виконані експериментальні дослідження повністю підтверджують гіпотезу про покращення властивостей як будівельних розчинів, так і важких бетонів (міцність при стиску, стиранність) шляхом оптимізації їх складів, а також використанням механоактивації змішаного в'язучого.

За результатами дисертаційної роботи в промислових умовах виготовлено 10 м³ бетонної суміші на механоактивованому змішаному в'язучому з використанням роторного протитечійного млина.

Ключові слова: механохімічна активація, будівельний розчин, бетон, фібра, стиранність, оптимізація, в'язкість.

ABSTRACT

Pirogov D.A. Mechanochemical activation of mixed cement and its effect on the quality of building composites for various purposes. -Copyrighted as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 192 "Construction and Civil Engineering". – Odessa State Academy of Construction and Architecture of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2024.

The dissertation work is devoted to theoretical and experimental research of mortar and concrete using mixed mechanically activated cement. Unlocking the potential capabilities of Portland cement and its varieties by increasing their activity makes it possible to solve the problems of both increasing the mechanical and operational properties of concrete and reducing its energy and material consumption. A promising direction can be considered the mechanochemical processing of Portland cement before use in production in a specially designed rotary countercurrent mill.

The work addressed issues related to solving:

a) the influence of mechanical activation of the binder in a rotary countercurrent mill on the change in its effective viscosity;

b) the influence of mechanical activation of Portland cement on its change:
1) specific surface area; 2) normal density and setting time; 3) the amount of chemically bound water; 4) kinetics of exothermic heating of the hardening cement composition;

c) the influence of mechanical activation of mixed cement and prescription strength factors during compression of the mortar;

d) the influence of mechanical activation of mixed cement and recipe factors on the compressive strength and abrasion of heavy concrete.

The study included mortars and concretes using both mechanically activated mixed binders and binders that were not subject to mechanical activation (control). Mechanical activation of cement and cement-containing compositions was carried out in a rotary countercurrent mill for 60; 180; 300 and 600 sec. For control, a binder was used that was not subject to mechanochemical activation. It has been experimentally established that mechanical activation of cement in a mill for specified periods of time causes a slight increase in the effective viscosity of the cement-containing composition ($W/C = 0.35$) - from 198 cP - no mechanical activation, to 223 cP - mechanical activation of cement for 300 seconds. An increase in the activation period of the binder from 300 to 600 sec has a slight effect on the increase in effective viscosity and does not exceed 230 cP.

It has been experimentally established that mechanochemical treatment of the binder in a countercurrent mill leads to an increase in its specific surface area from 415 m²/kg (no activation) to 450 m²/kg (activation within 600 sec). It should be noted that the specific surface area of cement increased quite rapidly in the first 60 seconds of activation (from 415 to 430 m²/kg). Subsequently, the growth of the specific surface area slows down, reaching 445 m²/kg after 300 seconds of activation. A subsequent increase in the activation period from 300 to 600 seconds causes an increase in the specific surface area of cement by no more than 5 m²/kg (from 445 to 450 m²/kg).

It was experimentally discovered that cement stone with a mechanically activated binder is characterized by an increased amount of chemically bound

water compared to cement stone whose binder was not subject to activation. The activation period of cement affects the amount of chemically bound water, reaching a maximum value at 600 seconds of mechanochemical treatment of cement. It should be noted that the main amount of chemically bound water is achieved within a period of up to 300 seconds of activation of the binder. The effectiveness of mechanochemical activation of cement in a rotary counterflow mill is confirmed by data on the exothermic heating of cement-containing compositions. The experimental data obtained indicate a significant influence of the mechanochemical activation of cement on the increase in the intensity of exothermic heating of hardening cement stone. It has been established that activation of cement for 300 seconds causes an increase in the temperature of solid cement stone from 20.3 °C to 64.0 °C, that is, by almost 44 °C. An increase in the activation period of the binder from 300 to 600 seconds has a slight effect on the increase in the maximum heating of the cement stone and does not exceed 2.2 °C. Activation of the binder for 300 seconds has a positive effect on the setting time of the cement paste. Compared to the control (the binder was not subject to mechanochemical activation), the mechanically activated binder is characterized by shorter times for both the beginning of setting (reducing the time from 2 hours 55 minutes to 1 hour 55 minutes) and the end of setting (reducing the time from 4 hours 50 minutes to 3 h (40 min)). The research results allow us to conclude that mechanical activation of the binder causes an acceleration of the processes of structure formation of hardening cement-water compositions.

It was of interest to find out the effect of mechanochemical treatment not only of Portland cement, but also of cement with the addition of quartz sand (in an amount from 10 to 50 % of the cement mass) on the compressive strength of cement stone at 28 days of age. Mechanochemical activation of Portland cement, as well as a mixture (Portland cement + quartz sand) in a rotary countercurrent mill was carried out for 60, 180, 300 and 600 seconds. For control, Portland cement was used with the addition of a similar amount of unchalked quartz sand (up to 50 %). The resulting mixture was not subject to mechanical activation. The

compressive strength of beam samples measuring 4x4x16 cm, made using mixed cement, was studied. Water consumption was determined by the spread of the mortar mixture on a Suttard device in the range of 90 ± 5 mm. It has been experimentally established that activation of mixed cement causes an increase in the compressive strength of cement stone in the maximum zone from 52 MPa (activation period 60 sec) to 62 MPa (activation period 300 sec), that is, by almost 20%. An increase in the activation period to 600 s has a slight effect on the increase in the strength of cement stone and does not exceed 3 %. It should be noted the ambiguous effect of quartz sand consumption on the strength of cement stone for various binder manufacturing technologies. Thus, if control samples are characterized by a decrease in compressive strength with an increase in the content of quartz sand in cement, then for cement stone with an activated mixed binder an increase in strength is observed with increasing consumption of quartz sand. Maximum strength is achieved when the mixed binder contains 20 % quartz sand. The compressive strength of cement stone in this case reaches a value of 62.5 MPa (the activation period of the mixed binder is 300 seconds), which is 10 % higher than the strength of cement stone based on mechanically activated non-additive cement. The studies carried out allow us to conclude that the optimal composition is an activated mixed binder, which includes 80 % Portland cement and 20 % quartz sand. The activation period of the mixed binder is 300 seconds. This composition of the activated mixed binder and the period of its activation were adopted in further studies of both mortar and concrete.

Issues related to elucidating the influence of the consumption of activated mixed cement on the strength of the mortar are considered. Along with this factor, the following independent variables were varied, namely: the consumption of superplasticizer C-3 and microsilica. Factor levels varied within the following limits:

X_1 – cement-sand ratio of mortar mixture – from 1:3 to 1:1;

X_2 – content of superplasticizer C-3 (by weight of cement) – $0.75\pm 0.75\%$;

X_3 – amount of microsilica (by weight of cement) – $5\pm 5\%$.

For control, a planned experiment was carried out on Portland cement, which was not subject to mechanochemical activation. The mixing water consumption for each line of the planned experiment was taken from the calculation of obtaining the diameter of the mixture cone spreading on the shaking table after 30 shaking in the range of 130 ± 2 mm. The specified diameter of the mortar mixture spread was assumed to be the same for the two comparative technologies. Analysis of mathematical models indicates that, according to the values of the coefficients for varying factors, both on mechanically activated mixed binder and on binder that was not subject to mechanical activation, the content has the greatest influence on the compressive strength of the mortar at 28 days of age. mixed cement in it. It should be noted that an increase in the content of activated mixed cement in the mortar from 440 to 850 kg/m³ leads to an increase in its compressive strength from 25 to 48 MPa (C-3 content = 0%). The next most important influence on the strength of the mortar is the consumption of superplasticizer S-3. An increase in its consumption to 1.5% of the cement mass causes an increase in the strength of the mortar based on mechanically activated binder from 36 MPa (binder consumption 440 kg/m³) to 58 MPa, that is, by more than 60 %. Microsilica makes a minimal contribution to increasing the compressive strength of mortar. Its introduction into the mortar mixture in an amount of 10% (by weight of the binder) causes an increase in strength at brand age by no more than 4...5 MPa. The combined effect of mechanochemical activation of a mixed binder, the use of C-3 (1.5%) and microsilica (10%) ensures the production of a mortar with a compressive strength of 65 MPa, which is more than 60% higher than the strength of the control mortar (binder) - non-mechanically activated; C-3 and microsilica are absent). The work examines the influence of recipe-technological strength factors during compression of concrete using activated mixed cement at early (2 days) and brand age (28 days). In addition to compressive strength, the abrasion of concrete at 28 days of age was also studied. To achieve the given goal, a 3-factor experiment was carried out using a 15-point symmetrical design. For control, a planned experiment was carried out on

Portland cement, which was not subject to mechanical activation. The following composition factors were varied in the experiment:

X_1 – superplasticizer C-3 in an amount of $0.75 \pm 0.75\%$ (by weight of cement in the mixed binder);

X_2 – microsilica in an amount of $5 \pm 5\%$ (by weight of cement in a mixed binder);

X_3 – basalt fiber in an amount of $1 \pm 1\%$ (by weight of cement in the mixed binder).

All studied concrete mixture compositions had smooth mobility ($OK = 6 \pm 1$ cm). The consumption of mixed binder was 480 kg/m^3 of concrete, which corresponded to the average consumption of binder in industrial construction. Mathematical models that reproduce the compressive strength of concrete allow us to conclude that, according to the coefficients for variable factors (X_1, X_2, X_3), the consumption of superplasticizer C-3 has the greatest influence on the strength of concrete. An increase in C-3 consumption from 0 to 1.5 % causes an increase in the strength of concrete, moreover, by 40...42 %.

The next largest influence on concrete strength is silica fume. An increase in its concentration in the mixed binder from 0 to 10% causes an increase in the strength of concrete by 12...15%. The introduction of basalt fiber into the concrete mixture (up to 2%) helps to increase the compressive strength of concrete by 5...7%. The maximum compressive strength of concrete $fsk.suve.k.2=39.4$ MPa (control) and $fsk.suve.a.2=60.8$ MPa (mechanical activation) is shown by compositions at points with the same coordinates: $X_1=+1; X_2=+1; X_3=+1$. At 28 days of age, the maximum compressive strength of concrete ($fsk.suve.k.28 = 61$ MPa and $fsk.suve.a.28 = 76.2$ MPa) is achieved at points with the same coordinates $X_1=X_2=X_3=+1$. It should be noted that the increase in the strength of concrete at 2 days of age as a result of activation of the mixed binder is at least 54%. At a more mature age (28 days), the effect of mechanical activation of the mixed binder decreases somewhat, but does not fall below 25%. The significant influence of mechanical activation of a mixed binder on the abrasion of concrete

has been experimentally confirmed. Among the recipe factors, the content of superplasticizer C-3 has a decisive influence on the abrasion of brand-age concrete. An increase in C-3 consumption from 0 to 1.5 % ensures a reduction in concrete abrasion by almost 40%. In contrast to the compressive strength of concrete, the next most influential factor on abrasion is the consumption of basalt fiber. Its introduction into the concrete mixture in an amount of 2 % (of the cement content) ensures a reduction in abrasion (compared to concrete without fiber) by an average of 17...20 %. Minimum abrasion ($G_{a.28}=0.18 \text{ g/cm}^2$) shows the composition of concrete at the point with coordinates $X_1=X_2=X_3=+1$.

The experimental studies performed fully confirm the hypothesis about improving the properties of both mortars and heavy concrete (compressive strength, abrasion) by optimizing their compositions, as well as using mechanical activation of a mixed binder.

Based on the results of the dissertation work, 10 m³ of concrete mixture was produced in industrial conditions using a mechanically activated mixed binder using a rotary counterflow mill.

Keywords: mechanochemical activation, mortar, concrete, fiber, abrasibility, optimization, viscosity.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Барабаш І.В., Пірогов Д.О. Активація цементу і її вплив на структуроутворення цементовміщуючих композицій. *Сучасне будівництво та архітектура*. 2023. Вип.6. С.82-89. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2023-6-82-89>
2. Барабаш І.В., Пірогов Д.О. Вплив механохімічної активації композиційного цементу на міцність будівельного розчину. *Механіка та математичні методи*. Вип.2. 2023. С.51-61. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2023-5-2-51-61>
3. Пірогов Д.О., Барабаш І.В. Будівельний розчин на механоактивованому змішаному портландцементі. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2023. Вип.№44. С.83-92. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i44.10>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

4. Барабаш І.В., Ксьоншкевич Л.М., Пірогов Д.О., Горбовий О.Л. Вплив струйної активації на міцність піщаного бетону. *Моделювання та оптимізація будівельних композицій*: Матеріали міжнародного семінару. Одеса. ОДАБА. 2021. С.3-5.
5. Барабаш І.В., Пірогов Д.О., Стрельцов К.О. Вплив рецептурних факторів на водотверде відношення рівновязких цементовміщуючих композицій. *Моделювання та оптимізація будівельних композицій*: Матеріали міжнародного семінару. Одеса. ОДАБА. 2022. С.3-6.
6. Пірогов Д.О., Барабаш І.В., Стрельцов К.О. Активація цементу і її вплив на кількість хімічно зв'язаної води в цементному камені. *Експлуатація та*

реконструкція будівель і споруд: тези доповідей V Міжнародної конференції Одеса. ОДАБА. 2022. С.88-91.

7. Пірогов Д.О., Барабаш І.В. Вплив режиму активації на властивості цементу, цементного тіста та каменю на його основі. *Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій*: Збірник тез міжнародної науково-технічної конференції. Одеса. ОДАБА. 2023. С. 109-111.

8. Пірогов Д.О., Барабаш І.В. Вплив механохімічної активації на властивості цементу та цементного каменю на його основі. Тези доповідей науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу академії. ОДАБА. 2023. С. 129.

ЗМІСТ

	стор.
Анотація	2
Список публікацій здобувача	15
Вступ	20
Розділ 1. Огляд літературних джерел з досліджуваної теми	25
1.1. Фактори, які визначають міцність цементних композитів.....	25
1.2. Вплив методів активації на процес структуроутворення цементних композитів.....	31
1.3. Пластифікуючі та суперпластифікуючі добавки в цементних системах.....	38
1.4. Мікрокремнезем як активна мінеральна добавка до будівельних розчинів та бетону.....	44
1.5. Застосування фібри для дисперсного армування цементних композитів.....	48
1.6. Теоретичні передумови досліджень та наукова гіпотеза.....	52
Висновки за 1-м розділом	54
Розділ 2. Характеристика матеріалів, які використовувалися в експериментах та методики проведення досліджень	55
2.1. Основні етапи і блок-схема досліджень.....	55
2.2. Характеристика матеріалів, використаних в експериментах.....	57
2.3. Методи досліджень цементного тіста, розчину та бетону.....	59
2.3.1. Державні стандарти для визначення фізико-механічних характеристик тверднучого цементного тіста, будівельного розчину та бетону.....	59
2.4. Визначення ефективної в'язкості цементовміщуючих композицій.....	60
2.5. Конструкція роторного протитечійного млину для активації цементу.....	61
2.6. Методика визначення стираності бетону.....	62

2.7. Математичні плани проведених досліджень і фактори, які варіювалися в них.....	63
2.8. Обробка результатів експериментальних досліджень.....	66
Висновки за 2-м розділом	68
Розділ 3. Вплив механохімічної активації на властивості цементу та цементовміщуючих композицій.....	69
3.1. Вплив терміну активації цементу в роторному протитечійному млині на зміну його питомої поверхні.....	72
3.2. Вплив терміну активації в'язучого на зміну ефективної в'язкості цементного тіста.....	73
3.3. Вплив терміну активації в'язучого на кількість хімічно зв'язаної води в цементному камені.....	75
3.4. Вплив механохімічної активації цементу на екзотермічний розігрів тверднучого цементного каменю.....	78
3.5. Вплив активації цементу на його нормальну густоту та терміни тужавлення.....	81
Висновки за 3-м розділом	84
Розділ 4. Вплив механоактивації змішаного в'язучого на міцність при стиску будівельного розчину.....	85
4.1. Вплив витрати кварцового піску на міцність активованого змішаного цементу.....	86
4.2. Планування і реалізація трифакторного експерименту.....	89
4.3. Вплив рецептурно-технологічних факторів на міцність при стиску досліджених будівельних розчинів.....	93
Висновки за 4-м розділом.....	107
Розділ 5. Механохімічна активація змішаного цементу і її вплив на міцність при стиску і стиранисть бетону.....	108
5.1. Планування і реалізація трифакторного експерименту.....	109
5.2. Дослідження впливу рецептурно-технологічних факторів на	

міцність при стиску важкого бетону на змішаному в'язучому.....	111
5.3. Вплив технології та складу бетону на його стійкість до стирання.....	120
5.4. Технологічна схема одержання механоактивованого змішаного в'язучого та бетонної суміші на його основі.....	125
Висновки за 5-м розділом.....	131
Загальні висновки.....	132
Література.....	134
Додатки.....	147

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Розкриття потенційних можливостей мінеральних в'язучих шляхом підвищення їх активності дозволяє вирішувати дві важливі і взаємодоповнюючі задачі, а саме: а) підвищити механічні і експлуатаційні властивості бетону; б) знизити енерго- і матеріалоємність бетону і виробів із нього. До ефективних методів активації мінеральних в'язучих слід віднести більш тонкий помел, сумісне введення при їх помелі мінеральних добавок і поверхньо-активних речовин та ін. Значна увага приділяється підвищенню хімічної активності мінеральних в'язучих в процесі структуроутворення і тверднення. Видне місце в цьому ряду займають механохімічні способи активації мінеральних в'язучих. В результаті зіткнення твердих тіл в локальній зоні активації спостерігається емісія електронів, руйнування кристалічної решітки, розвиток пластичних деформацій, які супроводжуються підвищенням температури та зародженням мікротріщин. Як наслідок, це приводе до підвищення хімічної активності в'язучого, що обумовлює якісну зміну структури і покращення властивостей кінцевого продукту. Для досягнення високого ступеня активації тонкодисперсних часток в'язучого використовується устаткування, у якому ефективно здійснюється тонке подрібнення матеріалу до утворення значної питомої поверхні. Таким чином, одержання цементу з підвищеною активністю пов'язано із зростанням тонини помелу в'язучого. Кульові млини, які використовуються для помелу цементу, значно підвищують собівартість продукції за рахунок значного підвищення витрати електроенергії. Для вирішення цієї проблеми пропонується спосіб стираючого подрібнення, який реалізується в кульових млинах, змінити на другий спосіб тонкого помелу. Виходячи з того, що найбільш перспективним напрямом зниження собівартості активації цементу є зниження енергоємності самого процесу подрібнення, то використання таких агрегатів як струйні млини, може розглядатися як безальтернативний спосіб підвищення активності в'язучого. Перспективним напрямом можливо

рахувати механохімічну обробку портландцементу в спеціально сконструйованому роторному протитечійному млині, який є різновидом струйних млинів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертційна робота пов'язана з тематикою кафедри процесів і апаратів в технології будівельних матеріалів Одеської державної академії будівництва та архітектури «Механохімічна активація і інтенсифікація процесів структуроутворення композиційних будівельних матеріалів».

Метою роботи є забезпечення підвищення ефективності використання портландцементу в будівельному розчині та бетоні за рахунок його механохімічної активації в роторному протитечійному млині.

Завдання досліджень:

- визначити вплив механоактивації та кількості суперпластифікатору на зміну ефективної в'язкості цементовміщуючих композицій;
- дослідити вплив механоактивації портландцементу на зміну його питомої поверхні, нормальну густоту, терміни тужавлення, кількість хімічно зв'язаної води та кінетику екзотермічного розігріву тверднучої цементної композиції;
- визначити вплив механоактивації змішаного цементу і факторів складу будівельних розчинових сумішей на міцність при стиску будівельних розчинів;
- дослідити вплив механоактивації змішаного цементу і факторів складу бетонних сумішей на міцність при стиску і стиранисть бетону;
- здійснити впровадження результатів досліджень в дослідно-промислове виробництво 10 м³ бетонної суміші на активованому змішаному портландцементі для влаштування дороги у житловому масиві «Розенталь» (м. Одеса).

Об'єкт дослідження – будівельні розчини та бетони на механоактивованому змішаному портландцементі.

Предмет дослідження – процеси, які відбуваються при механохімічній активації змішаного в'язучого в будівельному розчині або бетоні.

Методи дослідження. Дослідження виконувалися з використанням методів планування експериментів та експериментально-статистичного моделювання.

Визначення ефективної в'язкості цементно-вміщуючих композицій, кількості хімічно зв'язаної води, нормальної густоти та термінів тужавлення цементного тіста, кінетики екзотермічного розігріву тверднучого цементного каменю, міцності будівельного розчину, бетону та його стиранності здійснювалися за стандартами та згідно з чинними нормами.

Наукова новизна отриманих результатів.

- виявлено прискорюючий вплив механохімічної активації змішаного в'язучого на терміни тужавлення та екзотермічний розігрів цементних композицій;
- теоретично обґрунтована і експериментально доведена правомірність запропонованої концепції зниження матеріалоемності бетонних виробів за рахунок механохімічної активації змішаного цементного в'язучого в роторному протитечійному млині;
- встановлено оптимальний термін активації змішаного портландцементу, який забезпечує досягнення максимальної міцності при стиску будівельного розчину і бетону та сприяє досягненню мінімальної стиранності бетону.

Практичне значення одержаних результатів роботи.

- розроблено конструкцію роторного протитечійного млину, який забезпечує ефективну механохімічну активацію змішаного в'язучого;
- оптимізовані склади будівельних розчинів на механоактивованому змішаному портландцементі за критерієм максимальної міцності при стиску;
- з використанням методів планування експериментів запропоновані оптимальні склади бетонів, суміші яких виготовлялись на механоактивованому змішаному портландцементі;
- оптимізовані склади бетонів за критерієм мінімальної стиранності бетону.

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі стану проблеми, обґрунтуванні та формулюванні мети та завдань досліджень.

Автором проаналізовані методи і способи активації мінеральних в'язучих, а також процеси, які виникають при цьому. Сформульовані наукові основи управління ефективною в'язкістю за допомогою роторного протитечійного млина. Обґрунтовано вибір та концентрацію суперпластифікуючої добавки С-3, кількості мікрокремнезему та базальтової фібри до бетону. Оптимізовані склади будівельних розчинів та важких бетонів на механоактивованому змішаному портландцементі за критеріями міцності при стиску та стираниності.

Основні наукові результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. В наукових роботах, які опубліковані в співавторстві, автору належить:

[1, 2, 3] – дослідження впливу механоактивації змішаного в'язучого на структурно-механічні властивості цементних композицій;

[4] – дослідження впливу активації в'язучого на міцність при стиску бетону;

[5, 6] – вплив режиму активації цементу на кількість хімічно зв'язаної води та термінів тужавлення цементного тіста;

[7, 8] – дослідження впливу механохімічної активації змішаного цементу на питому поверхню цементу та міцність цементного каменю.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи та її результати доповідались і обговорювались на конференціях та семінарах: міжнародний семінар «Моделювання та оптимізація будівельних композицій» (м. Одеса, ОДАБА, 2021р.); міжнародна науково-технічна конференція «Моделювання та оптимізація будівельних композицій» (м.Одеса, ОДАБА,2022р.); V міжнародна конференція «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» (м. Одеса, ОДАБА, 2022р.); міжнародна науково-технічна конференція «Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів» (м. Одеса, ОДАБА, 2023р.); науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу академії: ОДАБА, 2023р.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 8 наукових праць, з них 3 статті у наукових фахових виданнях України та 5 публікацій у матеріалах наукових конференцій України.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, основної частини (5 розділів), висновків, списку літературних джерел і одного додатку.

Робота викладена на 152 сторінках, які включають 110 сторінок основного тексту, 17 таблиць, 24 рисунків та 2-х додатків. Список використаних літературних джерел включає 145 найменувань.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ДОСЛІДЖУЄМОЇ ТЕМИ

1.1. Фактори, які визначають міцність цементних композитів

Відомо, що основною метою сучасної науки про цементні композити (цементний камінь, будівельні розчини, бетони) є створення їх з наперед заданими властивостями. Для будівельних матеріалів конструкційного призначення однією з цих властивостей є міцність, так як міцність є найбільш важливим показником, який визначає всі інші властивості матеріалу [1-5]. Хімічна взаємодія цементу з водою супроводжується утворенням нових гідратних речовин, які обумовлюють тужавлення і тверднення цементного тіста, розчинової або бетонної суміші [6-9]. Процес тверднення цементних композицій відбувається внаслідок комплексу складних хімічних і фізико-хімічних взаємодій цементу з водою [10-16]. Внаслідок замішування цементу водою фізичні і хімічні процеси сприяють перетворенню пластичного цементного тіста в міцний каменеподібний моноліт. Взаємодія цементу з водою супроводжується чисто фізичними процесами: а) адсорбцією; б) змочуванням і розподілом води замішування на поверхні часток цементу. Частки цементу пронизані порами, капілярами і мікротріщинами, які виконують роль «транспортних шляхів», по яким мігрують молекули води та іонів H^+ і OH^- . В результаті проникнення води в мікротріщини відбувається їх розклинювання внаслідок високого капілярного тиску, який розвивається по мірі міграції води. Розклинюючі деформаційні зусилля тим сильніші, чим вища гідрофільність мінералу, тобто хімічна спорідненість його з водою. Коли капілярний тиск плівок води перевищує сили зв'язку в кристалі, то можливий розрив твердого тіла по дефектам кристалічних решіток на частини. Внаслідок цього можлива адсорбційна пептизація, тобто диспергування зерен цементу без механічних впливів. Внаслідок міграції води в пори і капіляри зерен цементу відбувається розширення зони реакції гідратації, що може викликати напруження, яке іноді перевищує границю міцності твердого тіла. По

здатності до адсорбційної пептизації в процесі гідратації клінкерні мінерали розташовуються в наступному порядку: C_3A , C_4AF , C_3S , C_2S . Таким чином, найбільш впливовими на дію адсорбційної пептизації є мінерали C_3A і C_4AF . Значно слабше пептизуються мінерали C_3S і C_2S . Яскраво вираженою хімічною пептизацією є утворення високоосновної форми гідросульфоалюмінату кальцію. Вона відбувається внаслідок значного збільшення об'єму твердої фази внаслідок взаємодії C_3A з водою в присутності сульфату кальцію [17].

Гідратація портландцементу супроводжується розчиненням клінкерних мінералів у воді замішування. Взаємодія зерен цементу з водою починається з поверхні, і в розчин переходять молекули або іони клінкеру. При цьому, основні складові клінкеру при розчиненні у воді дисоціюють наступним чином: мінерали C_3S і C_2S - на іони кальцію і силікатні іони; мінерали C_3A і C_4FA - на іони кальцію, алюмінатні і феритні іони. Гідратація клінкерних мінералів супроводжується виникненням новоутворень у вигляді гідросилікатів, гідроалюмінатів і гідроалюмоферитів кальцію, $Ca(OH)_2$ та ін. В'язуча система стає пересиченою [18]. Гідратні утворення є менш розчинними, ніж вихідні, безводні мінерали. Новоутворення випадають з розчину у вигляді колоїдних часток - гелю [19]. Колоїдні частки з'єднуються в більш великі, утворюючи коагуляційну структуру.

Коагуляційна структура характеризується цілим рядом механічних показників - міцністю, пружністю, еластичністю, в'язкістю. Перераховані показники в значній мірі визначаються якістю міжчасткових контактів, які розділені тонкими прошарками води замішування. Коагуляційна структура характеризується тиксотропією, тобто властивістю відновлювати структуру після закінчення механічних виливів [20].

Коагуляційна структура характерна для цементно-водних систем від початку замішування цементу водою до кінця їх тужавлення. Цей проміжок часу є головним етапом структуроутворення цементного каменю. З пересичених розчинів виникає нова фаза, результатом якої є утворення так

званих "зародків кристалізації". Паралельно протікає процес перекристалізації. Він має місце за рахунок більш значної розчинності дрібних кристалів у порівнянні з більш крупними того ж хімічного складу. Таким чином, процес гідратування включає в себе дві стадії:

- а) розчинення вихідних тонкоподрібнених мінералів;
- б) появою кристалогідратів з пересиченого розчину

Внаслідок утворення в великій кількості кристалогідратів коагуляційна структура зміцнюється. Відбувається зрощення кристалогідратів між собою за рахунок зменшення кількості гелю. Тужавлення, яке характеризує кінцеву стадію утворення коагуляційної структури, переходить в процес тверднення з утворенням кристалізаційної структури. Процес становлення структури цементного каменю можна розділити на два етапи. Перший етап відповідає за формування каркасу кристалізаційної структури з появою контактів зрощування між кристалами новоутворень. Протягом другого етапу нові контакти поміж кристаликами новоутворень не виникають, а відбувається обростання продуктами новоутворень вже існуючого каркасу. З однієї сторони це приводить до підвищення міцності гідратного зростку, а з другої - викликає появу внутрішніх напружень. Слід відмітити, що якщо для коагуляційної структури властива зворотність (після руйнування структури можливе її відновлення), то для кристалізаційної – відновлення зруйнованої структури не відбувається [21]. Але саме кристалізаційна структура відноситься, на відміну від коагуляційної, до основного типу структур, яка визначає фізико-механічні властивості цементного каменю і бетону [21].

До основних факторів, які впливають на швидкість і ступінь гідратації цементу, відносяться:

- а) мінералогічний склад і тонина помелу в'язучого;
- б) вміст води замішування;
- в) наявність мінеральних добавок;
- г) температура тверднення цементного тіста

По швидкості гідратації основні мінерали портландцементного клінкеру розташовуються в наступній послідовності : C_3A , C_4AF , C_3S , C_2S [22]. Найбільший вплив на міцність і швидкість її зростання надає аліт (C_3S). Мономінеральне в'язуче, яке складається з C_3S , характеризується відносно високою швидкістю набору міцності при стиску, досягаючи в 28-и денному віці 40... 50 МПа, а після 3-х місяців тверднення – 60 МПа. Беліт твердіє повільніше. Міцність зразків з цементного каменю в 28-и денному віці не перевищує 10 МПа. В віці одного року міцність зразків досягає значення в 40 МПа. C_3A твердіє відносно швидко, але міцність при стиску зразків не перевищує в марочному віці 10 МПа. C_4AF в 3-х добовому віці набуває міцність до 25 МПа. Таким чином, можливо відмітити, що аліт є основним мінералом портландцементного клінкеру і який є основним носієм міцності цементного каменю [23].

Регулюючи тонину помелу цементу можна в широкому діапазоні регулювати як швидкість гідратації цементу так і його кінцеву міцність [24]. Так, цемент, який просіяний через сито з 10000 отворами на 1 см^2 , у 28-и добовому віці у 7 разів має міцність вищу у порівнянні із зразками на цементі, який просіяний через сито з 4900 отв/см². Практика показує, що оптимальним прийнято вважати помел цементу до питомої поверхні 450...500 м²/кг. Збільшення тонини помелу зверх 500 м²/кг приводе до підвищення як водопотреби бетонної суміші так і усадочних деформацій, а також до зниження морозостійкості цементного каменю і бетону на його основі.

На механічні властивості бетону надають вплив багато факторів, які можливо розділити на 4 класи. До них відносяться:

- 1) якість вихідних компонентів;
- 2) склад бетонної суміші;
- 3) якість ущільнення і умови тверднення;
- 4) вік бетону

По відношенню до якості вихідних компонентів (цемент, заповнювачі), слід відмітити:

1) якість в'язучого визначається насамперед його активністю. Чим вища активність цементу, тим в більшій мірі проявляється його клеюча здатність і тим вище міцність цементного каменю і бетону на його основі;

2) якість заповнювачів в основному характеризується міцністю зерен, чистотою поверхні, а також формою їх поверхні

Міцність заповнювачів в значній мірі впливає на міцність бетону в тому разі, коли їх міцність близька або нижче міцності цементного каменю або цементно-піщаного розчину. В випадку використання щільних заповнювачів, міцність яких значно перевищує міцність бетону, більш важливого значення набуває міцність зчеплення заповнювачів з цементним каменем. В цьому разі висока міцність заповнювача може бути і недовикористана, тому що руйнування може відбутися по контакту цементного каменю з заповнювачем. Роль заповнювача в бетоні значна, так як саме він створює кістяк бетону і тому помітно впливає на комплекс фізико-механічних характеристик його [25].

Склад бетонної суміші, тобто вміст цементу, води, дрібного і крупного заповнювача, в значній мірі впливає на механічні характеристики бетону. Кількість води замішування (при постійних витратах інших компонентів) сприяє одержанню різного водоцементного відношення, а отже, і різної клеючої здатності цементного тіста і, як наслідок, різної міцності цементного каменю [26]. Для різних складів бетону існує оптимальний вміст води, або оптимальне В/Ц, при якому міцність бетону максимальна. Оптимальне значення водоцементного відношення не є постійною величиною, а змінюється в залежності від виду цементу, його питомої поверхні, активності, витрати, ефективності ущільнення і ряду інших факторів.

Витрата цементу в складі бетонної суміші повинна бути тим більшою, чим вище міцність бетону. Максимальна міцність бетону досягається в тому разі, коли витрати цементу достатньо не тільки для покриття цементним тістом усієї поверхні дрібного і крупного заповнювача, але і для заповнення пор міжзернового об'єму. Слід відмітити що середня густина бетону зростає із

збільшенням витрати цементу, що, в свою чергу, викликає зростання і міцності бетону. Подальше зростання витрати цементу приводить до відносно незначного підвищення міцності бетону, що не є економічним технологічним впливом на якість бетону. Що стосується впливу об'ємної концентрації крупного заповнювача на міцність бетону, то слід відзначити наступне. Якщо використовується заповнювач із міцністю більшою, ніж міцність цементного каменю, то зростання його об'ємної концентрації створює контактне розміщення зерен. В цьому разі товщина прошарків із цементного каменю знижується, а міцність їх підвищується. Структура такого бетону складається з каркасу зерен заповнювача, які зцементовані в моноліт цементним каменем. В цьому випадку зниження товщини прошарку цементного каменю може привести до підвищення міцності бетону (на 15...20 %) у порівнянні з міцністю бетону, у якого об'ємна концентрація крупного заповнювача менша. Витрата дрібного заповнювача (до 5 мм) також впливає на механічні характеристики бетону. Кількість дрібного заповнювача залежить від величини об'ємної концентрації крупного заповнювача. Оптимальне співвідношення між ними повинно забезпечити мінімальний міжзерновий об'єм. В зв'язку з цим, витрата дрібного заповнювача, надає практично такий же вплив на міцність бетону, як і об'ємна концентрація крупного заповнювача [27].

Значний вплив на середню густину і міцність бетону надає якість ущільнення бетонних сумішей. Застосування відповідних засобів ущільнення, а також їх режимів залежить від легкоукладальності сумішей. Відомо [28], що легкоукладальність бетонних сумішей в значній мірі залежить від витрати води, або водоцементного відношення. В зв'язку з цим для кожного ступеня ущільнення бетонної суміші існує оптимальна витрата води і оптимальне водоцементне відношення. Логічно припустити, що чим менша витрата води замішування, тим інтенсивніше повинна ущільнюватися бетонна суміш і тим вище буде міцність бетону. Визначення ступеня ущільнення бетонної суміші досягається за рахунок використання коефіцієнта ущільнення $K_{ущ}$. Величина $K_{ущ}$ визначається відношенням експериментального значення середньої

густини бетонної суміші до її теоретичного значення. Як правило, якісне ущільнення бетонної суміші забезпечує досягнення $K_{ущ}$ до 0,95... 0,98.

Таким чином, на міцність цементного каменю та бетону на його основі впливають багато факторів. Частина із них можна віднести до основних (вид та марка цементу, температура, водоцементне відношення, склад бетону, засоби ущільнення), другу частину – до додаткових (умови тверднення бетону, вік, форма і розмір зразків).

В сучасних умовах вдосконалення технології бетону набуває вирішального значення. Провідне місце в досягненні амбітних цілей буде відведено тим технологічним прийомам, які в значній мірі сприятимуть зниженню енергоємності виробництва при одночасному підвищенню якості бетонних і залізобетонних виробів.

1.2. Вплив методів активації на процес структуроутворення цементних композитів

Зростання потенційних можливостей мінеральних в'язучих шляхом підвищення їх активності сприяє вирішенню цілого ряду задач, які пов'язані як із покращенням механічних і експлуатаційних характеристик, так і з зниженням енерго- і матеріалоємності матеріалів і виробів на їх основі [29, 30, 31]. Стосовно композиційних будівельних матеріалів існуючі групи методів активації можливо класифікувати наступним чином [32, 33]:

- а) з активацією окремих компонентів матеріалів суміші;
- б) з різнорівневою активація наявних структур в суміші;
- в) з активаційним вплив на ущільнену суміш [4, 5]

Необхідність методів механоактивації виникла з появою нових технологій в промисловості будівельних матеріалів, які включають використання високодисперсних систем, а також з конструюванням мелючого обладнання. До основних методів активації мінеральних в'язучих слід віднести:

- а) помол цементу в мелючих агрегатах [34];

б) введення поверхньо-активних добавок в процесі помолу клінкеру [35];

в) введення в процесі помолу мінеральних добавок [36]

Наукова теорія про фізичні і хімічні процеси, які відбуваються в результаті тонкого подрібнення неорганічних матеріалів, а також про їх особливі властивості, розроблена рядом науковців, які займаються даною проблемою [37, 38, 39].

Механохімічна активація цементу з використанням впливів удару або тертя на тверді матеріали ініціює зміну хімічних процесів - на цьому заснована наукова теорія механохімії [40]. Необхідно відмітити, що механохімічні реакції залежать від впливу цілого ряду факторів і при цьому:

- активуються під час удару або тертя електромагнітними хвилями і протікання їх аналогічно радіо -і фотохімічним реакціями;

- інтенсифікуються в результаті екзотермії внаслідок удару або тертя: механізм таких реакцій ідентичний звичайним хімічним реакціям;

- пов'язані з емісією електронів при випромінюванні подрібненого твердого матеріалу;

- зростають в результаті збільшення питомої поверхні речовини, при цьому кінетика реакцій залежить від інтенсивності механічного подрібнення;

- розриваються зв'язки при деформації твердих матеріалів, які проходять в період дії механічних сил та при релаксації деформаційно-напруженого стану подрібнюваних речовин, при цьому реакційна здатність залежить від енергетичного стану деформованих, внаслідок трибоактивації, речовин;

- ініціюються енергією дефектів і дислокаційних зміщень в зв'язку з виникненням спотворень, дефектів кристалічної решітки при диспергуванні;

- можуть залежати від ступеня подрібнення твердого матеріалу - розміру часток дисперсної фази.

Положеннями мікрореології мінеральні в'язучі системи представлені сукупністю компонентів різних фаз: твердою, рідкою та газоподібною.

Складовими фаз, підданих спільній дії пружних і в'язких сил, а також сил тертя є:

а) тверда фаза - порошкоподібні частки цементу, наповнювача, зерна заповнювачів;

б) рідка фаза - вода замішування, розчинові суміші;

в)газоподібна фаза - бульбашки повітря, повітряні порожнини [41, 42, 43]

На мікрорівні деформації розглядаються в таких об'ємах, розмір яких можна порівняти як з розміром дисперсних часток системи, так і з молекулярним або атомним розміром. Практично даний підхід застосовується при дослідженні властивостей мікрогетерогенних колоїдних складових розчинових або бетонних сумішей: часток в'язучого матеріалу, дрібнозернистого піску, мікроноповнювачів, мінеральних добавок [44, 45]. Такі системи характеризуються розвиненою поверхнею дисперсно-зернистих матеріалів, що є причиною взаємодії всередині фаз як між частками так і між фазами. Це є причиною утворення кластерів з неоднорідною будовою системи [46].

Дія зовнішніх механічних сил викликає переформування кластерних утворень (агрегатів) і, відповідно, призводить до зміни реологічних властивостей системи. Зміна швидкості і величини деформації дозволяють оцінити поведінку агрегованої системи на стадії її руйнування. При механічному впливі процес формування кластерних утворень в досліджуємих системах, зокрема, в в'язучій суспензії - мікрогетерогенній основі бетонних складів, спостерігається до моменту досягнення найбільш стійного об'єму фрактальних кластерів [47].

Основні показники властивостей макрореології - напруга зсуву, ефективна в'язкість, не дозволяють в повній мірі охарактеризувати складні процеси, які проходять в концентрованих дисперсно-зернистих системах (розчинових або бетонних сумішах) внаслідок дії механічних сил [48]. Основними технологічними операціями, які вимагають визначення

реологічних параметрів бетонних сумішей як на мікро-так і на макрорівні, є: перемішування, формування, укладання, транспортування. Для реалізації технологічних задач, які пов'язані зі зрушуючими впливами робочих органів машинних агрегатів, визначення додаткового реологічного показника системи дозволяє охарактеризувати реальні зміни в агрегованій структурі. Послідовне зростання показника фрактальності (мінливості) при використанні обводнених дисперсно-зернистих матеріалів: золи-ТЕС, цементу, молотого шлаку, піску викликає відповідне зменшення граничної напруги зсуву і ефективної в'язкості. При забезпеченні інших рівних умов, використання тонкодисперсних часток твердої фази різного виду матеріалів, які відрізняються природою, властивостями поверхневого шару, дозволяє значно змінювати рівні реологічних показників мінеральних паст [49].

Підвищення питомої поверхні тонкомелених часток цементу, піску, вапняку, шлаку в обводнених системах, які утворюють кластерну структуру, викликає зростання величини граничної напруги зсуву і ефективної в'язкості [50]. Зростання дисперсності твердої фази сприяє зміні геометричної будови агрегованих структур. Слід відзначити, що при цьому існує гранична величина питомої поверхні $S_{\text{пит}}=700 \text{ м}^2/\text{кг}$, вище якої подрібнювати матеріал технологічно неефективно в зв'язку із значним зростанням основних реологічних показників. В цьому разі агреговані системи з твердими частками більш високої дисперсності характеризуються максимальними показниками граничної напруги зсуву і ефективної в'язкості. Порушення суцільності твердого матеріалу при подрібненні супроводжується зростанням вільної поверхні, що викликає особливий енергетичний стан поверхневого шару.

Вільна поверхнева енергія є частиною повної енергії дисперсних матеріалів [40], яка встановлюється як сукупний ефект потенціальної енергії взаємодіючих твердих часток:

1) енергії, яка визивається коливаннями атомів; енергії, яка випромінюється електронними оболонками атомів і іонів;

2) кінетичною енергією мікрочасток при хаотичному русі на молекулярному і атомному рівнях;

3) внутрішньої ядерної енергії атомів;

4) енергії електромагнітних хвиль

Кластероутворення виникає внаслідок виникнення неврівноважених сил взаємодії між частками твердої фази. Неврівноважені сили створюються внаслідок флуктуації твердих часток за наступними параметрами: активності поверхневого шару, розміру, густині, міжчастковій відстані. Ще одним фактором, який викликає появу неврівноважених сил взаємодії сусідніх твердих часток, є поверхнева ліофілізація їх незалежно від типу дисперсійного середовища. Внаслідок прагнення грубодисперсних систем до переходу в стан термодинамічної рівноваги, а твердих часток - в стан механічної рівноваги, то здійснюється первинне формування мікрорівневої структури. В зв'язку з тим, що початкове утворення структури грубодисперсних сумішей відбувається без використання технологічних впливів і залежить від якості і кількості вихідних компонентів, то можливо зробити висновок про спадкове самостійне формування систем. Крім зростання поверхневої енергії в результаті подрібнення мінеральних компонентів спостерігається підвищення їх ізобарно-термічного потенціалу, а значить, і реакційної активності порошків. З цього випливає значне підсилення адгезії між мінеральними наповнювачами і в'язкими речовинами [51].

В роботі [52] запропонована модель "магмаплазми". Згідно поглядів авторів наукової статті, при інтенсивному механічному впливі на тверде тіло на дуже короткий час виникає високоенергетичний збуджений стан. Це призводить до відокремлення компонентів кристалічних решіток і вільних електронів. Фізичні процеси, які проявляються внаслідок механічної активації, настільки численні, що число механізмів, за якими ініціюються хімічні реакції, до кінця неясні. Можливо виділити три основних групи реакцій:

- до першої групи можливо віднести реакції, які викликаються короткочасними високозбудженими енергетичними станами і які не знаходяться в тепловій рівновазі із середовищем, тобто протікають в плазмі;

- до другої групи відносяться реакції, які збуджуються постплазматичними станами, мають різну тривалість життя і розсіюють свою енергію за різними механізмами;

- до третьої групи відносяться такі реакції, які ініціюються за рахунок енергії, яка акумулюється в твердій речовині в формі різноманітних дефектів кристалічних решіток.

Однією із найбільш важливих властивостей твердих тіл є їх поведінка при механічному впливі на них. Як відмічалось раніше, до механічних впливів на тверді тіла можна віднести зсув, стиск, розтягування, удари. Незалежно від характеру механічного впливу на першій стадії з'являється пружна деформація, яка призводить до зміни довжини зв'язків в твердому тілі.

Після перевищення межі пружності утворюється пластична деформація і тіло руйнується. Дослідженнями встановлено, що в області удару утворюється яскраво виражена розпорядкована структура. При повторюваному механічному впливі зона деформацій розширюється [53].

Підвищення інтенсивності механічного впливу викликає появу в області пластичних деформацій тріщин. Якщо тріщини повністю перетинають тверде тіло, то відбувається його руйнування. Тенденція до крихкого руйнування твердих тіл зростає з підвищенням інтенсивності механічних впливів. Таким чином слід відмітити, що поява тріщин є основним явищем при механічній активації [47]. Численні експерименти, пов'язані з дослідженням механоактивації мінеральних в'язучих при помолі, в тому числі і з використанням ПАР, свідчать про те, що використання поверхнево-активних речовин сприяє зниженню енергозатрат при помелі твердих речовин [54]. Механоактивація цементів може мати наступне практичне використання:

- виробництво швидкотверднучих цементів;

- виробництво високоміцних цементів;
- забезпечення високої якості бетонів при меншій витраті цементів

Механоактивація з успіхом використовується в технології виготовлення високоміцних будівельних матеріалів на основі вапна і кварцового піску. Використання дезінтеграторів суттєво прискорює розчинення SiO_2 , що призведе до підвищення швидкості реакцій взаємодії діоксида кремнію з вапном з утворенням гідросилікатів кальцію різної основності.

Використання механохімічної активації вапна та кварцового піску дозволило в широких об'ємах одержувати будівельний матеріал, який одержав назву "силікальцит" [55]. Використання силікальциту дозволяє вирішувати цілий ряд задач, а саме :

- одержання високоміцного бетону;
- одержання ніздрюватих бетонів із середньою густиною $\rho < 1$;
- розширити номенклатуру використання природних матеріалів і відходів виробництва, які внаслідок їх низької реакційної здатності не використовувались в технології виготовлення будівельних виробів;
- знизити температуру термообробки виробів широкої номенклатури

Значний вплив в технології бетону одержала віброактивація цементних розчинових та бетонних сумішей [56, 57]. Віброактивація сприяє значному підвищенню швидкості формуванню структури, зростанню ступеня гідратації і міцності. Значний вплив на вдосконалення технології бетону здійснюють фізичні і фізико-хімічні методи активації розчинової та бетонної суміші. До фізичних методів активації відноситься ультразвукова обробка води замішування та цементно-водних суспензій [58]. Використання ультразвукової обробки забезпечує як диспергацію часток в'язучого так гомогенізацію бетонної суміші. Слід відмітити суттєвий недолік застосовуваної технології активації бетонної суміші, який заключається в високій енергоємності та відносно низькій продуктивності.

В роботах [59, 60] приведені результати досліджень по вияву впливу магнітної обробки води на властивості будівельних розчинів та бетонів. Проведені експериментальні дослідження показали, що використання омагніченої води підвищує міцність бетону. Виявлено, що магнітна обробка води замішування найбільш ефективна для цементів з підвищеним вмістом мінералів C_3A та C_4AF . Ефект омагнічування води проявляється в підвищенні швидкості тверднення цементних композицій. До недоліків даної технології слід віднести велику розбіжність результатів досліджень по впливу омагнічування води замішування. Поряд з магнітною обробкою води замішування проведені дослідження по впливу постійного електричного поля на властивості цементного каменю та бетону. Експериментально встановлено, що вода замішування, після впливу на неї постійного електричного поля, сприяє підвищенню міцності бетону на 5...7 %.

Проведений літературний аналіз результатів досліджень по впливу різноманітних активаційних дій на в'язучі системи показує, що механохімічна активація є потужним засобом керування процесами гідратування, що в значній мірі дається взнаки на кінцевих властивостях будівельних розчинів і бетонів. Необхідно продовжувати пошук принципово нових способів активації мінеральних в'язучих, які дозволять вирішати ряд задач в області будівельного матеріалознавства.

1.3. Пластифікуючі та суперпластифікуючі добавки в цементних системах

Сучасне будівництво вимагає використання ефективних і високоякісних будівельних розчинів і бетонів, що має важливе економічне та народногосподарське значення в розвитку передових ресурсозберігаючих технологій [61, 62, 63]. Розвиток таких технологій неможливий без використання пластифікуючих добавок [64-70]. Механізм дії таких пластифікуючих добавок пов'язується з їх диспергуючою та дефлокуляційною здатністю [71, 72]. При введенні пластифікуючих добавок в цементне тісто

вони, запобігають злипанню окремих часток цементу, а також викликають деяке уповільнення коагуляції новоутворень [73]. Відомо, що пластифікуючі добавки розріджують бетонні суміші і тому необхідна рухливість їх досягається при менших витратах води замішування [74]. Проведена значна кількість досліджень, які розглядали вплив добавок пластифікуючої дії на реологічні показники бетонних сумішей і, як наслідок, на фізико-механічні характеристики бетонного каменю [75, 76, 77]. Серед великої кількості добавок, які використовуються в технології виготовлення бетонної суміші пластифікатори займають чільне місце [78, 79]. В технології виготовлення будівельних розчинів, бетонних або залізобетонних виробів доцільно працювати з рухливими сумішами з мінімально можливою витратою цементу та мінімальним водоцементним відношенням [80, 81]. Для вирішення такої задачі необхідно використовувати хімічні добавки, які регулюють легкоукладальність бетонної суміші [82, 83]. Хімічні добавки, які можуть ефективно регулювати реологічні характеристики бетонної суміші, в переважній більшості відносяться до поверхнево - активних речовин (ПАР) [84, 85].

Відмінною особливістю таких речовин є їх фізико-хімічна активність на границі розподілу фаз. В даному випадку під фазою розуміється частина системи, яка характеризується однаковим складом і властивостями. Розглянута фаза відділена від другої частини системи поверхнею розділу. В цементному тісті кожне зерно цементу є складовою твердої фази і не залежить від його розподілу в системі. При замішуванні цементу вода повинна рівномірно розподілятися по поверхні зерен в'язучого. Внаслідок наявності поверхневого натягу на границі розподілу часток цементу і води замішування діють значні сили зчеплення, які перешкоджають воді розтікатися по поверхні зерен цементу. При наявності в воді замішування навіть незначної кількості ПАР відбувається різке зниження поверхневого натягу води на межі розподілу фаз, що викликає полегшення розподілу води замішування на поверхні зерен цементу і покращує їх змочуванність [86]. Більш того, молекули ПАР

сприяють пептизації агрегатів із зерен цементу та знижують ефективну в'язкість цементоводної композиції. Все це прискорює процеси гідrataції зерен в'язучого.

Відомо, що використання пластифікаторів підвищує рухливість або знижує жорсткість бетонної суміші, що впливає на зменшення енерго- і трудовитрат при укладанні її в монолітні будівельні конструкції, а також сприяє інтенсифікації технологічного циклу та підвищенню якості продукції [87]. Більш того, використання пластифікуючих добавок за рахунок зменшення водоцементного відношення дозволяє підвищувати в значній мірі міцність і довговічність виробів [88].

Властивість доцільності ПАР на молекулярному рівні забезпечує дія двох складових частин:

- 1) полярна група з високим дипольним моментом значно підвищує гідrataцію (наприклад, OH^- , NH_2 , COOH^-);
- 2) неполярний гідрофобний радикал (наприклад, вуглеводневий) значно знижує розчинність сполук

В технології бетону широке розповсюдження одержали пластифікуючі добавки аніоноактивного типу, на долю яких приходиться біля 75 % пластифікаторів. Молекули аніоноактивних ПАР розміщують від одної до декількох полярних груп, які створюють при дисоціації в водному розчині довголанцюгові аніони, які характеризують їх поверхневу активність. Гідрофобною молекулярною складовою є граничні або негратичні алкілароматичні або аліфатичні ланцюги. На властивості адсорбційної і пластифікуючої дії ПАР в основному надають вплив наступні фактори: молекулярна маса, довжина і будова вуглеводного ланцюга. В зв'язку з тим, що ряд пластифікуючих добавок з підвищенням рухливості бетонної суміші викликають також підвищене повітровтягнення, що позначається на характеристиках затверділого бетону, то для оцінки пластифікуючого ефекту використовують поняття "ефективна пластифікуюча дія". Під цим поняттям

розуміється той пластифікуючий ефект, який досягається використанням пластифікатора без зниження міцності бетону.

Типовими представниками пластифікуючих добавок є лігносульфонати технічні (ЛСТ), пластифікатор форміатно-спиртовий (ПФС), синтетична поверхнево-активна добавка (СПД). Концентрація перерахованих добавок коливається в діапазоні від 0,05 до 0,8 % (в перерахунку на суху речовину від маси цементу). Використання таких поверхнево-активних речовин викликає уповільнення структуроутворення тверднучого цементного каменю. Це пов'язано з тим, що молекули перерахованих ПАР частково блокують дифузюю води замішування до поверхні зерен цементу через їх адсорбційну оболонку. Знижуючи швидкість протікання реакцій гідратації цементу добавки позитивно впливають на реологію бетонних сумішей.

Перспективним в технології будівельних розчинів та бетонів є використання органічних, відносних по хімічній будові до класу аніоноактивних, суперпластифікуючих (СП) добавок колоїдного розміру з великою кількістю полярних груп в ланцюзі [89, 90]. Відмінними особливостями суперпластифікуючих речовин по відношенню до звичайних пластифікаторів, є:

- а) хімічна будова молекул;
- б) характеристика молекулярно - масового розподілу;
- в) середньочислова молекулярна маса;
- г) структура основної частини молекули і розміщення на ній функціонально активних груп

Основною сировиною для отримання звичайних пластифікаторів є попутні чи побічні продукти ряду виробництв, які крім пластифікуючих компонентів вміщують баластові елементи. Внаслідок цього пластифікатори мають нестабільний склад, що негативно впливає на гідратацію цементу. Тому такі добавки практично завжди уповільнюють процеси тужавлення і подальше тверднення цементних сумішей на відміну від добавок суперпластифікаторів, які мало впливають на ці процеси. Суперпластифікатори, які випускаються за

спеціальною технологією зі строго нормованими показниками, не мають таких негативних якостей.

Аналіз наукових робіт по вивченню модифікаційного впливу суперпластифікаторів на характеристики цементних композитів показав, що важливим впливовим фактором на об'ємне зростання зародків кристалізації і кристалів є адсорбційна здібність СП. Внаслідок адсорбції сповільнюється зростання кристалічних новоутворень, формується більш дисперсна структура цементного каменю, яка є у багатьох випадках слабозакристалізованою [91].

Добавки СП, адсорбуючись в основному на активних центрах взаємодії, впливають на форму гідратних з'єднань: вони утворюються у виді упорядкованої голчастої форми, а також характеризуються анізотропними властивостями [92]. При цьому в значній мірі знижується мікроармуюча здатність такого виду гідратних утворень і, особливо кристалів мінералу еттрингіту. Обгороджуючи зародки кристалізації, введені суперпластифікуючі добавки обмежують їх зростання, внаслідок чого відбувається зростання пересичення, що, в свою чергу створює високодисперсні структури з більш високими показниками міцності. Дія добавок суперпластифікаторів на системи на основі цементу пов'язана з хіміко-мінералогічним складом в'язучого. СП, адсорбуючись в основному на гідратних утвореннях, по різному впливає на пластифікуючу дію тих чи інших мінералів клінкеру [93, 94]. Найбільш високою адсорбційною можливістю характеризується мінерал C_3A , найменшою - мінерал $\beta-C_2S$. Відомо, що при утворенні гідросилікатів в результаті хімічних реакція гідратації цементного в'язучого, в першу чергу відбувається адсорбція на продуктах новоутворень найбільш високомолекулярних складових компонентів пластифікуючих речовин [95].

Застосування суперпластифікаторів дозволяє зменшити на 20...30 % кількість води замішування, забезпечуючи при цьому необхідну рухливість бетонної суміші [96]. Пластифікуюча дія суперпластифікаторів лімітується 120-и...180-и хвилинами з моменту введення їх разом з водою замішування в склад бетонної суміші [97]. Ефект пластифікації СП визначається рядом

факторів, до яких відносяться довжина і будова вуглеводневого ланцюга. Згідно цих факторів найбільш ефективними є СП лінійної структури з радикалами великої молекулярної маси. До них відносяться радикали типу нафталіну, фенолу, меламіну, а також функціональні групи типу сульфо-аміно- і карбоксигрупи полікарбонівих кислот. Саме наявність таких радикалів надає суперпластифікаторам можливість взаємодіяти з мінералами портландцементу та продуктами їх новоутворень.

Суперпластифікатори вводять в склад бетонної суміші в кількості від 0,05 до 1,5 % маси цементу. Введення СП в склад бетонної суміші дозволяє одержувати не тільки високотехнологічні бетони, але і покращувати механічні характеристики бетону (міцність при стиску та розтягу), зносостійкість, водонепроникність та морозостійкість.

Застосування суперпластифікаторів в значній мірі вплинуло на розвиток технології бетону. Такі бетони відповідають спеціальним вимогам до функціональності і універсальності. До таких вимог відносяться цілий ряд характеристик бетону, а саме: висока міцність при стиску; низька проникність води; великий опір стираності; висока стійкість до перемінного замерзання та відтавання; висока хімічна стійкість; висока ударна стійкість і ряд других властивостей. Основою технічних рішень сучасних напрямків є створення високофункціональних і високотехнологічних бетонів з використанням багатокомпонентних в'язучих речовин, та комплексних модифікаторів поліфункціональної дії [98]. Згідно поглядів проф. Ушерова-Маршака О. В. [99] значні перетворення в області технології бетонів обумовлені за рахунок використання хімічних добавок різної природи. Проблеми, які вирішуються за допомогою добавок, полягають в досягненні такої технології, яка б забезпечувала необхідні властивості та ресурсозбереження бетонів. Використання суперпластифікуючих добавок забезпечує можливість регулювати склади, структуру і властивості як бетонної суміші так і бетону з урахуванням впливу різноманітних факторів: технологічних, кліматичних, експлуатаційних. Виробництво

суперпластифікаторів виділилось в прибуткову галузь. Нові технології бетонів об'єднують в собі використання високоефективних суперпластифікаторів у поєднанні з активними мінеральними добавками (мікрокремнеземом, зола-виносу та інш.). Внаслідок суміщення суперпластифікаторів з високодисперсними активними мінеральними добавками можливо отримувати високорухливі бетонні суміші, які не вимагають віброущільнення. Використання суперпластифікаторів дозволяє здійснювати бетонування конструкцій практично будь-яких конфігурацій, з високою інтенсивністю та мінімальними трудозатратами.

Проведений літературний аналіз показав, що актуальними, як із теоретичної так і практичної точок зору, є дослідження, які спрямовані на розроблення будівельних розчинів та бетонів з використанням пластифікаторів та суперпластифікаторів. Використання їх дозволить, в поєднанні з механоактивацією в'язучого ефективно керувати процесами структуроутворення тверднучих цементних композицій та забезпечити їм підвищені експлуатаційні властивості.

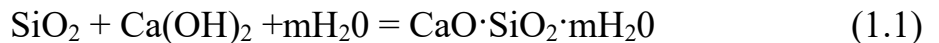
1.4. Мікрокремнезем як активна мінеральна добавка до будівельних розчинів та бетону

Мінеральні добавки широко використовуються в технології бетону у всьому світі. Умовно їх можливо розділити на інертні (пісок кварцовий, вапняк, гранітний відсів) і активні (мікрокремнезем, зола-виносу, мелений доменний шлак, перліт, діатоміт) добавки природного або штучного походження.

Традиційно мінеральні добавки використовують для слідуючих цілей: а) здешевити виготовлення бетону за рахунок часткової заміни ними цементу (до 80 % від його маси); змінити властивості бетону в необхідному напрямку (одержання високоміцних, корозійностійких бетонів, зменшення тепловиділення цементу в масивних конструкціях).

Технічний прогрес в області будівництва пов'язаний, в тому числі, в удосконаленні технологій виготовлення будівельних розчинів та бетонів високої якості і довговічності. Широкі можливості в цьому напрямку відкриваються за рахунок використання в технології бетону мікрокремнезему (МК), який є побічним продуктом при виплавці кремнієвих сплавів - феросиліцію, силікохрому, силікомарганцю [100, 101, 102].

Мікрокремнезем, який має в своєму складі не менше 85 % SiO_2 , відноситься до пуцоланових добавок з високою активністю [103, 104]. При введенні мікрокремнезему значно покращуються властивості портландцементного каменю та бетону на його основі [105-108]. Використання тонкодисперсних часток мікрокремнезему, розмір яких значно менший зерен цемент (питома поверхня часток досягає значень 15000... 25000 $\text{m}^2/\text{кг}$, що в 50...100 раз перевищує питому поверхню цементу) дозволяє отримувати бетони високої міцності [109]. Мікрокремнезем в такому виді активно вступає в реакцію взаємодії з $\text{Ca}(\text{OH})_2$, який є продуктом гідратації аліту C_3S , за реакцією:



Внаслідок реакції взаємодії активного кремнезему з гідроксидом кальцію утворюється важкорозчинний низькоосновний дрібнокристалічний гідросилікат кальцію [110, 111, 112].

Такий мікроскопічний розмір зерен мікрокремнезему сприяє утворенню ним пуцоланічного ефекту. Розрахунок показує, що при такому розмірі часток мікрокремнезему, 40 кг його (середнє дозування на 1 m^3 бетону) має площу поверхні близько 1 квадратного кілометра. Настільки розвинена поверхня SiO_2 сприяє більш значному пуцоланічному ефекту в порівнянні з другими активними мінеральними добавками.

При наявності мікрокремнезему спостерігається чітка зміна пористої структури цементного каменю в сторону зростання більш дрібних гелевидних пор [113]. По кількості вмісту хімічно зв'язаної води і ступеню гідратації

портландцементу добавка мікрокремнезему різко прискорює процес гідратації цементу, особливо на її ранній стадії [114]. Зростання ступеня гідратації та об'єму новоутворень в цементному каменю досягається за рахунок введення активних мінеральних добавок з високою пуцолановою активністю, що відмічається в роботах [115, 116]. Використання наночасток мікрокремнезему значно впливає на хімічні реакції, які протікають в процесі гідратації цементу і призводять до наслідків на макрорівні. Наявність МК відбивається на підвищенні міцності і других механічних характеристиках затверділого цементного тіста [117]. Основна причина такого впливу заключається в значному зростанні питомої поверхні новоутворень, які є результатом взаємодії SiO_2 з гідроксидом кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Результатом такої взаємодії є підвищення міцності наноструктури за рахунок зменшення розміру пор до 0,5... 5,0 нм в гелю CSH [118].

Розглядаючи вплив мікрокремнезему на міцність цементного каменю необхідно враховувати мінералогічний склад цементу. Перевагу, в цьому разі, необхідно надавати цементам з підвищеним вмістом C_3S , який при гідратації утворює гідроксид кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Поряд із впливом мікрокремнезему на міцність бетону при стиску, введення його в склад цементу викликає підвищення міцності бетону на розтяг, а також підвищує його тріщиностійкість. В роботі [119] відмічається, що використання мікрокремнезему є одним із найбільш перспективних напрямів в технології одержання бетонів з унікальними характеристиками. Нові можливості мікрокремнезему, як активної мінеральної добавки до бетону, відкриваються, при поєднанні його з ефективними суперпластифікаторами. Сумісна робота мікрокремнезему з суперпластифікуючими добавками забезпечує одержання бетонів з міцністю при стиску до 150 МПа. Поряд з цим такі бетони характеризуються підвищеними характеристиками по довговічності, водонепроникності, корозійній стійкості [120].

Вилив мікрокремнезему на цементний камінь є позитивним фактором, так як зерна мікрокремнезему заповнюють простір поміж відносно крупними

частками цементу, що знижує міжзернову пористість в'язучого і, таким чином, ущільнює структуру цементного каменю, зменшуючи при цьому кількість ослаблених (дефектних) участків. Природно, це приведе до підвищення опору цементним каменем проникності води і підвищенню стійкості у всіх середовищах, де експлуатується цементний бетон. Більш того, хімічна взаємодія мінералів цементу з мікрокремнеземом в присутності води замішування приведе до значного зростання міцності як цементного каменю так і бетону на його основі. Слід відмітити, що ефект від дії мікрокремнезему підвищується в присутності суперпластифікаторів, так як наявність мікрокремнезему в цементі викликає зростання водопотреби цементного тіста.

При таких позитивних характеристиках мікрокремнезему слід відмітити, що працювати з ним досить складно, так як він представляє собою тонкодисперсний пилячий матеріал. Тому в світовій практиці найшла застосування технологія введення МК в склад бетонної суміші разом з водою замішування, тобто в виді суспензії. Слід відмітити, що суміш води і мікрокремнезему нестійка і схильна до швидкого осідання. Для запобігання цьому в суміш вводять стабілізатори, які фіксують частки мікрокремнезему в воді і перешкоджають загусанню суспензії при зберіганні. Проте і наявність стабілізаторів не нашло широкого використання в практиці внаслідок надзвичайно високої ціни - майже 800 євро за 1 тону 40% -ої суспензії мікрокремнезему.

Таким чином, для раціонального використання мікрокремнезему необхідно ретельно підходити до питання однорідності розподілу тонкодисперсних часток мікрокремнезему в об'ємі бетонної суміші, використовуючі для цього ефективно бетонозмішуваче устаткування.

Літературний огляд, пов'язаний з використанням мікрокремнезему як активної мінеральної добавки до цементних бетонів показує, що роль МК в процесі тверднення цементного каменю є багатоплановою і дозволяє вирішувати ряд задач, а саме:

- а) підвищувати щільність і міцність цементного каменю і бетону;

б) виконуючи роль центрів кристалізації, наночастки мікрокремнезему сприяють підвищенню як швидкості так і ступеня гідратації цементу

1.5. Застосування фібри для дисперсного армування цементних композитів

Перспективним матеріалом для використання в будівельній практиці в останні десятиріччя стає фібробетон. Фібробетон - це матеріал, в якому поєднуються висока тріщиностійкість, міцність, висока надійність і довговічність [121-129]. Широкий спектр наукової інформації, яка пов'язана з дослідженням експлуатаційних характеристик дисперсно-армованих бетонів, віддзеркалений, зокрема, в роботах [130-136]. В цих роботах дослідження по вивченню експлуатаційних характеристик дисперсно-армованих бетонів проводилися з використанням різного виду фібри: полімерних волокон, скловолокон, сталльної проволки, базальтових волокон. Дисперсно-армований бетон, з використанням перерахованих видів фібри, в значній мірі визначає прогрес в будівельній індустрії: Введення в склад бетонної суміші фібри [137] в значній мірі компенсує недоліки цементного бетону, а саме:

- а) відносно низьку міцність на розтяг при згині;
- б) усадку і повзучість

Дисперсне армування бетону вирішує також проблеми, які пов'язані із зниженням маси виробів або елементів конструкції. Важливою перевагою використання дисперсної арматури є надання підвищеної, в порівнянні із стрижневою арматурою, ударної стійкості бетону. Відмова від використання стрижневої арматури підвищує довговічність фібробетону, так як її наявність провокує корозію залізобетону. В той же час одержання фібробетонів необхідної якості можливо досягнути тільки за рахунок використання оптимального (для даного виду конструкцій, умов експлуатації, тощо) виду дисперсної арматури. Важливим фактором, при цьому, є забезпечення рівномірного розподілу волокнистої арматури. Саме при цьому забезпечується зниження вірогідності утворення тріщин, підвищення міцності на розтяг і, в

кінцевому випадку, підвищення терміну безвідмовної роботи виробу або конструкції. Важливою перевагою фібри перед стрижневою арматурою є її здатність покращувати властивості бетону у всіх трьох напрямках. Внаслідок цього фібробетони можливо віднести до конструкційних матеріалів з властивими тільки їм характеристиками структури [138]. Відносна легкість досягнення необхідного результату не сприяло створенню ефективної технології виготовлення фібробетонів з наперед заданими властивостями, яка б в повній мірі відповідала економічності дисперсного армування.

До факторів, які впливають на якість фібробетонів, відносяться [139]:

а) рецептурний склад бетонної суміші (активність і витрата цементу; водоцементне відношення, наявність поверхнево-активних речовин; використання активних мінеральних добавок та ін.);

б) однорідність розподілу фібри в об'ємі цементного каменю та бетону;

в) забезпечення сумісності (температурної, фізичної, хімічної) роботи волокнистої арматури з бетоном

До показників, які впливають на якість фібробетону, слід віднести процентний вміст волокнистої арматури, а також її показники: модуль пружності, довжина волокон, їх діаметр.

Вперше інформація про фібробетони з'явилася на початку ХХ століття (інж. Некрасов В. П.), який проводив дослідні роботи, пов'язані з використанням в стислих і розтягнутих зонах залізобетонних виробів сталюого дроту малих діаметрів. Доцільність використання сталюого дроту в той період розглядалась також і в роботі Г. Портера [140], де ним зроблений висновок про якісний вплив сталюого фібри на механічні показники бетону. Пізніше з'явилась велика кількість досліджень, які були пов'язані з використанням дисперсної арматури не тільки із сталі, але й з інших матеріалів - із пластику, скла, базальту. Так, в роботі [141] приводиться інформація про використання в бетоні волокна з різними геометричними розмірами як по довжині так і по поперечному перерізу: круглі, плоскі, призматичні, хвилеподібні. Автором наведені результати досліджень по виявленню

процентного впливу армуємих волокон на властивості бетону. Досліджувався бетон з високим вмістом волоком в бетоні – від 3 до 12 %; середнім - від 1 до 3 % та низьким: в діапазоні від 0 до 1 % (в перерахунку на 1 м³ бетонної суміші). Підсумком результатів досліджень був висновок про те, що введення в склад бетонної суміші армуючої фібри приводе до значного зростання ударної міцності бетону. В 70-х роках ХХ сторіччя, в зв'язку з бурхливим розвитком будівництва, виникла необхідність в будівельних матеріалах з високими характеристиками на ударну стійкість, стираниість, морозостійкість. Використовувану на сьогоднішній день фібру можна класифікувати наступним чином :

а) за використанням матеріалом - на металічні (в основному сталіні) та неметалічні (синтетичні, скляні, базальтові, вуглецеві) ;

б) за походженням - на природні (рослинні волокна, азбестові, базальтові) та штучні (полімерні - поліпропілен, нейлон, поліамід, сталіні, вуглецеві);

в) за модулем пружності волокон - а) високомодульні (сталіні, вуглецеві, скляні) і низькомодульні (поліпропіленові, нейлонні, віскозні)

Підвищення ефекту від використання фібри може бути досягнуто за наступних умов:

- висока адгезія волокон до цементного каменю;

- однорідність розподілу волокон в об'ємі будівельного розчину або бетону;

- однаковість фізико-механічних властивостей фібри;

- високої хімічної стійкості фібри по відношенню до цементного каменю

Серед основних видів фібр, які в значних об'ємах використовуються для армування бетонів, є сталіна фібра. Використання її підвищує механічні і деформативні показники бетону до 300 %. Найбільш ефективно її використання в конструкціях, які схильні до тріщиноутворення в процесі експлуатації. Армовані таким чином конструкції характеризуються підвищеною корозійною стійкістю, морозостійкістю, термостійкістю та

водонепроникністю. До основних проблем, з якими стикаються виробничники, є складність при перемішуванні бетонної суміші внаслідок утворення "їжаків". Для мінімізації утворення комків із сталюї фібри та забезпечення її рівномірного розподілу в об'ємі бетонної суміші максимальний розмір крупних волокон зазвичай обмежують. Одна із основних переваг сталюї фібри перед другими (наприклад, поліпропіленовою) полягає в відносній простоті її виготовлення. Для вирішення проблеми адгезій до цементного каменю сталюа фібра виготовляється з виступами і впадинами на поверхні. Введення в склад бетонної суміші сталюї фібри призводить до підвищення міцності при стиску на 10...35 %, а міцності при згині - до 200 % (в порівнянні з бетоном без використання фібри). Як показує досвід, оптимальна кількість сталюї фібри складає від 1 до 1,5 % на 1 м³ бетону.

Відмінними властивостями фібробетонів є їх висока анізотропність, що дозволяє розглядати їх як важливу групу конструкційних матеріалів з покращеними фізико-механічними властивостями. З цієї точки зору дуже ефективним армуючим компонентом для будівельних розчинів та бетонів є скляна фібра. Слід відмітити, що скловолокно є матеріалом з високою міцністю при розтягуванні і має відносно високий модуль пружності $(50...85) \cdot 10^3$ МПа. Більш того, коефіцієнти лінійного температурного розширення бетону і фібри приблизно однакові ($\approx 14 \cdot 10^{-6} \cdot 1/^\circ\text{C}$). Скловолокно за своєю міцністю на розтяг відповідає міцності дроту із високовуглецевої сталі, одержаної холоднотянутим способом [142]. Скловолокно сприймає розтягуючі напруження в бетоні і запобігає виникненню в ньому тріщин. Експериментально встановлено, що раціональний вміст скловолокна складає 3...7 % (від маси цементу).

Наявність скловолокна в бетоні надає йому високу ударну стійність. Слід відмітити, що скловолокно характеризується зниженою лугостійкістю, тому тривала експлуатація цементного бетону сприяє деструкції волокна і його руйнування. Більш того, скляне волокно має гладку, не жорстку поверхню і

тому воно характеризується відносно невисокою адгезійною міцністю до цементного каменю.

В значних об'ємах в практиці виготовлення фібробетонів використовується поліпропіленове волокно. Таке волокно має значну перевагу перед іншими видами фібри. Серед головних переваг слід відзначити:

- а) температура займання волокна ≈ 500 °С;
- б) температура розм'якшення - до 170 °С;
- в) пластичність волокна - до 20 % до моменту розриву

Поліпропіленове волокно є лугостійким, кислотостійким, має високу стійкість до солей і не піддається корозії [143]. Використання поліпропіленової фібри приводе до підвищення опору стираності бетону, а такого покращує його ударну стійкість .

Останнім часом в будівельній практиці одержали розповсюдження фібробетони з використання в якості фібри базальтового волокна. Характерними особливостями базальтового волокна є високий модуль пружності, висока адгезія до цементного каменю, хімічна стійність в лужному середовищі. Крім цих позитивних характеристик базальтова фібра надає бетону високу тріщиностійкість, ударну стійність та високу стійкість до корозії [144].

Проведений літературний огляд, який присвячений питанням дисперсного армування бетонів показав, що їх високі фізико-механічні характеристики пов'язані насамперед з адгезією волокон з цементною матрицею. Властивості фібробетону, крім цього, є функцією виду і якості застосовуваних волокон, а також залежить від їх концентрації в цементному камені бетону.

1.6. Теоретичні передумови досліджень та наукова гіпотеза

Підвищення ефективності використання потенційних можливостей портландцементу в будівельних розчинах та бетонах є досить важливою і складною задачею. У низці всіляких методів вирішення цієї задачі особливе

місце, зокрема, відводиться технологічним засобам, які сприяють зростанню енергетичного стану поверхневого шару часток в'язучого. До впливових технологічних засобів слід віднести механохімічну активацію їх поверхневого шару за рахунок використання спеціального обладнання. Зростання активності поверхневого шару пов'язано, при цьому, не тільки із зростанням реакційної поверхні часток в'язучого, а також за рахунок трансформації їх поверхні у зоні удару. Забезпечення зміни енергетичного стану поверхні часток цементу в процесі їх механоактивації може підсилитися за рахунок введення в склад цементу кварцового піску. Можливо припустити, що сумісна активація портландцементу з добавкою кварцового піску (змішаний цемент) забезпечить зміну енергетичного стану не тільки зерен цементу, а і поверхневого шару зерен піску. Аналіз літературних джерел свідчить про те, що виготовлення бетонної суміші з використанням суперпластифікуючих добавок, мікрокремнезему та базальтової фібри сприяють одержанню бетону з підвищеними механічними характеристиками. Розгляд відомих закономірностей утворення структури цементного каменю та бетону на його основі дозволяє висунути гіпотезу про доцільність вирішення задачі, пов'язаної із забезпеченням підвищення ефективності використання змішаного портландцементу в будівельному розчині та бетоні за рахунок його механохімічної активації. Застосування суперпластифікатора, мікрокремнезему та базальтової фібри в сукупності з механоактивацією дозволить підвищити потенційні можливості змішаного цементу і, як наслідок, покращити механічні властивості бетону.

Висновки за 1-м розділом

1. Для будівельних розчинів та бетонів конструкційного призначення однією із найбільш важливих характеристик є міцність при стиску, так як вона, в основному, визначає всі інші властивості матеріалу.

2. Механохімічна активація мінеральних в'язучих речовин є одним із самих потужних засобів прискорення процесів гідратоутворення, що в значній мірі дається взнаки на кінцевих властивостях будівельних розчинів і бетонів.

3. Актуальними, як із теоретичної так і практичної точок зору, є дослідження, які спрямовані на створення будівельних розчинів і бетонів з використанням потужних суперпластифікаторів. Впровадження їх в технологію дозволить ефективно керувати процесами гідратації цементних композицій, забезпечуючи їм підвищені експлуатаційні можливості.

4. Використання мікрокремнезему в технології будівельних розчинів та бетонів сприяє підвищенню як швидкості так і ступеню гідратації цементу, що позначається на зростанні їх міцності та довговічності.

5. Дисперсно-армований бетон з використанням різних видів фібри, а саме полімерної, скляної, сталевий та базальтової, визначає прогрес в будівельній індустрії. Введення до складу бетонної суміші фібри в значній мірі компенсує недоліки бетону, до яких можливо віднести підвищену усадку і повзучість, а також відносно низьку міцність на розтяг при згині та ударну стійкість.

РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ, ЯКІ ВИКОРИСТОВУВАЛИСЯ В ЕКСПЕРИМЕНТАХ ТА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Основні етапи і блок-схема досліджень

Детальний аналіз складних систем з обов'язковим визнанням основоположних елементів і зв'язків між ними необхідно застосовувати не тільки до вивчаємого об'єкту, але і до самого процесу дослідження. Такий аналіз дозволяє забезпечити не тільки логіку дослідження, але і обґрунтувати його як план виконання так і істотні моменти, які потребують значного інтелектуального навантаження.

Наукове дослідження, як правило, дотримується циклічної схеми [145], згідно якої новий її цикл, який збагачується новою науковою інформацією, проходить на більше якісному рівні. Виходячи з цього проведення наукових досліджень в дисертаційній роботі було умовно розбито на чотири етапи, які відображені в блок-схемі досліджень, рис.2.1.

На першому етапі досліджень проведено літературний огляд наукових публікацій, які присвячено питанню механохімічних методів активації тверднення портландцементу та його різновидів, а також пошуку факторів, які впливають на кінетику структуроутворення цементних композитів. На основі аналізу апріорної інформації, яка наведена в першому розділі дисертаційної роботи, були сформульовані цілі і задачі досліджень.

На другому етапі були вибрані оптимальні режими механохімічної активації портландцементу з добавкою кварцового піску в роторному протитечійному млину. Були визначені залежності впливу активації змішаного в'язучого на зміну його питомої поверхні, ефективної в'язкості, нормальної густоти, термінів тужавлення, кількості хімічно зв'язаної води та кінетики екзотермічного розігріву цементного тіста.

Третій етап досліджень присвячений визначенню впливу механохімічної активації змішаного портландцементу на міцність при стиску

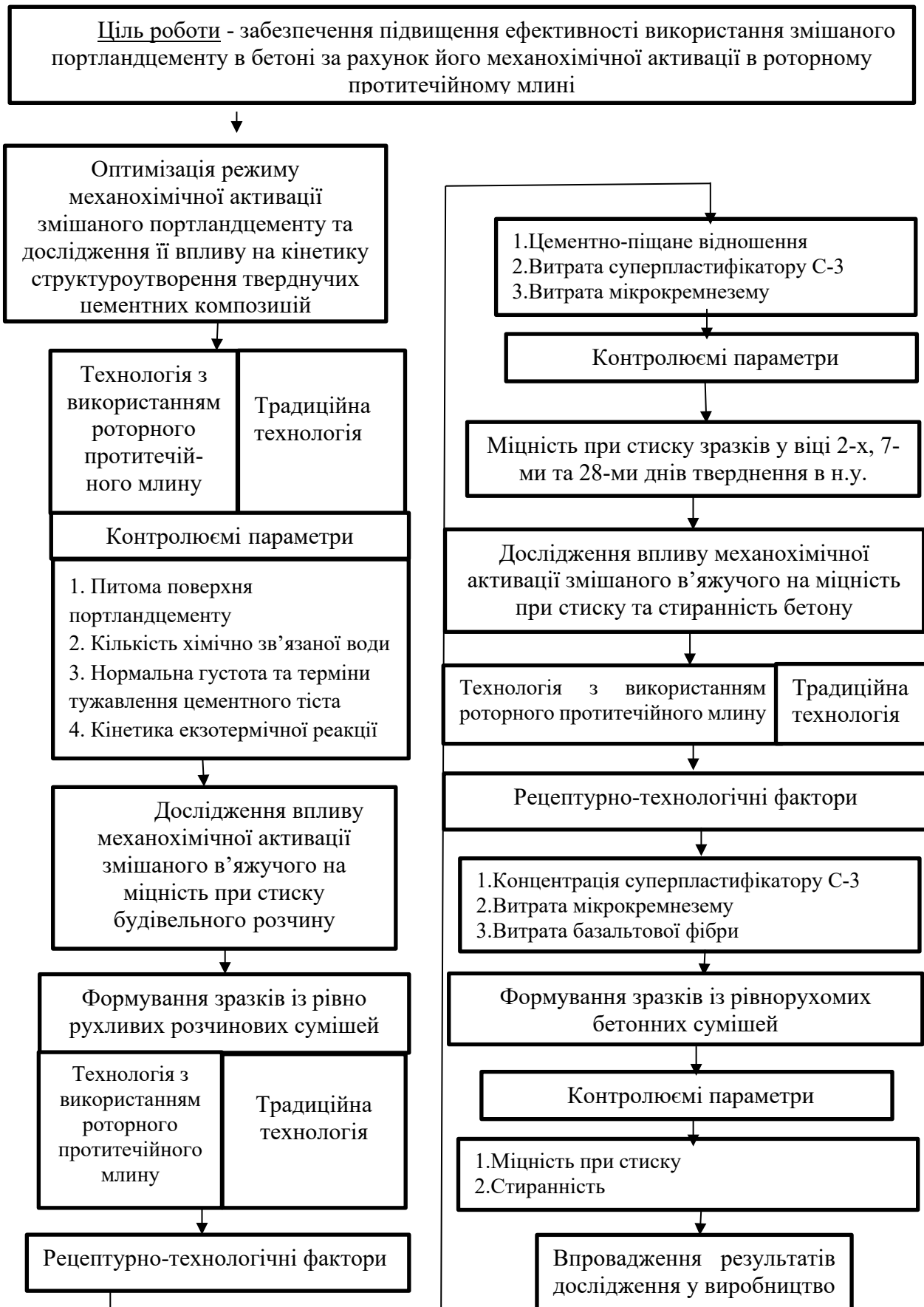


Рис.2.1. Загальна блок-схема досліджень

будівельного розчину у 2-х, 7-ми та 28-ми денному віці.

На четвертому етапі досліджень в якості основного об'єкту був вибраний важкий бетон на змішаному в'язучому. Досліджувався вплив механохімічної активації змішаному цементу на:

- 1) міцність бетону при стиску в 2-х денному та 28-ми денному віці;
- 2) стиранність бетону в 28- и денному віці

Використовувався трифакторний план, де в якості незалежних перемінних приймалися:

- а) суперпластифікатор С-3;
- б) мікрокремнезем;
- в) базальтова фібра

Для контролю готувалися бетонні суміші на неактивованому портландцементі. Аналіз одержаних математичних моделей дозволив оптимізувати витрати незалежних перемінних факторів (X_1 , X_2 , X_3) для одержання бетонів з покращеними показниками міцності при стиску та стиранності. Розроблена технологічна схема виготовлення бетонних сумішей на змішаному в'язучому з використанням роторного протитечійного млину та здійснено дослідно-промислове впровадження результатів дисертаційної роботи в виробництво.

2.2. Характеристика матеріалів, використаних в експериментах

Мінеральні в'язучі.

Для проведення експериментальних досліджень використовувалися два виду цементу:

- 1) сульфатостійкий шлакопортландцемент ССШПЦ М400-Д60. Виробник: ТОВ «Цемент», Одеса;
- 2) портландцемент ПЦ П/А-Ш-500. Виробник: ПрАТ «Кривий Ріг Цемент»

Дані цементи були обрані як одні з найбільш поширених як на ринку Одеського регіону так і Україні в цілому та в зв'язку з їх високими експлуатаційними характеристиками.

Крупний заповнювач. В якості крупного заповнювача в експериментах використовувався гранітний щебінь Гніванського кар'єру Вінницької області фракцій 5-10 і 10-20 мм у співвідношенні 50 до 50 % (по масі).

Насипна густина щебеню складала 1375 кг/м³. Щебінь відповідає всім вимогам ДСТУ Б В.Ч.7-75-98 “Щебінь та гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови”.

Дрібний заповнювач. В якості дрібного заповнювача використовувався кварцовий пісок Олександрівського кар'єру Одеської області з Мкр.=2,5. Вміст S_iO₂ в піску складав 96,9 %. Пісок відповідає всім вимогам ДСТУ Б В.2.7-32-95 «Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови».

Мікрокремнезем. В якості активної мінеральної добавки в дослідженнях використовувався мікрокремнезем Нікопольського заводу феросплавів. Хімічний склад та фізичні властивості мікрокремнезему наведені в табл.2.1, 2.2.

Таблиця 2.1

Хімічний склад мікрокремнезему, %

S _i O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	C	S
90...94	0,68...0,82	0,69...0,99	0,85...1,02	1,01	0,61...0,7	1,23...1,40	0,98...1,05	0,26...0,3

Таблиця 2.2

Фізичні властивості мікрокремнезему

Розмір часток	< 1 мкм
Середня густина:	
- неущільнений	від 130 до 350 кг/м ³
- ущільнений	від 480 до 720 кг/м ³
- суспензія	від 1520 до 1440 кг/м ³
Питома поверхня	від 13000 до 30000 м ² /кг

Поверхнево-активна добавка. Для пластифікації розчинної і бетонної суміші використовувався суперпластифікатор С-3 (ТУ 3-14-625-89).

Фібра. Для волоконного армування використовувалася базальтова фібра РБР-18 з довжиною волокна від 18 до 24 мм. Модуль пружності волокна до 50 ГПа, міцність на розтяг до 3000 МПа. Волокна мають 100 % стійкість до води. Температура експлуатації даного волокна знаходиться в межах до +700 °С.

2.3. Методи досліджень цементного тіста, розчину та бетону

2.3.1. Державні стандарти для визначення фізико-механічних характеристик тверднучого цементного тіста, будівельного розчину та бетону

ДСТУ Б В.2.7-185:2009 Цементи. Методи визначення нормальної густоти, строків тужавлення та рівномірності зміни об'єму .

ДСТУ Б В.2.7-187:2009 Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск.

ДСТУ Б В.2.7-239:2010 Будівельні матеріали. Розчині будівельні. Методи випробувань (60583).

ДСТУ Б В.2.7-225:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення тепловиділення при твердінні.

ДСТУ Б В.2.7-214:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками.

ДСТУ Б В.2.7-170:2008 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності.

ДСТУ Б В.2.7-114:2002 Суміші бетонні. Методи випробувань.

ДСТУ Б В.2.7-116:2008 Будівельні матеріали. Суміші бетонні та бетон. Загальні технічні умови.

2.4. Визначення ефективної в'язкості цементовміщуючих композицій

В дослідженнях для визначення впливу рецептурних факторів на зміну ефективної в'язкості цементовміщуючих композицій використовувалася методика, яка пов'язана з визначенням швидкості вільного падіння кульки у в'язкій рідині (закон Стокса).

Швидкість вільного падіння кулі у в'язкій рідині виражається наступним рівнянням:

$$V = 2(d - \rho)r^2 \frac{g}{9}, \quad (2.1)$$

де: V - швидкість поступального рівномірного руху кульки віскозиметра;

r - радіус кульки; g - прискорення вільного падіння; d - істинна густина матеріалу кульки; ρ - істинна густина рідини.

Ефективна в'язкість рідини визначається за формулою:

$$\eta = \frac{2r^2(d-\rho)g}{gV(1+2.4\frac{r}{R})(1+3.3\frac{r}{L})}, \quad (2.2)$$

де: R – радіус циліндру;

L – висота в'язкої рідини.

Принципова схема віскозиметра для визначення в'язкості цементовміщуючої композиції наведена на рис.2.2



Рис.2.2. Принципова схема віскозиметру

Віскозиметр включає в себе постійний магніт 1, стальну кульку 2 діаметром 8,3 мм, циліндр з цементовміщуючою композицією 3.

База L між рисками складає 40 мм. Датчик магнітного поля 4 фіксує за допомогою мікроконтролера 5 і цифрового індикатора 6 термін часу проходження стальною кулькою базової відстані L. Точність виміру проходження кульки базової відстані складає $8 \cdot 10^{-6}$ сек.

2.5. Конструкція роторного протитечійного млину для активації змішаного цементу

В дисертаційній роботі для механохімічної активації змішаного портландцементу використовувався роторний протитечійний млин, принципова схема якого приведена на рис.2.3

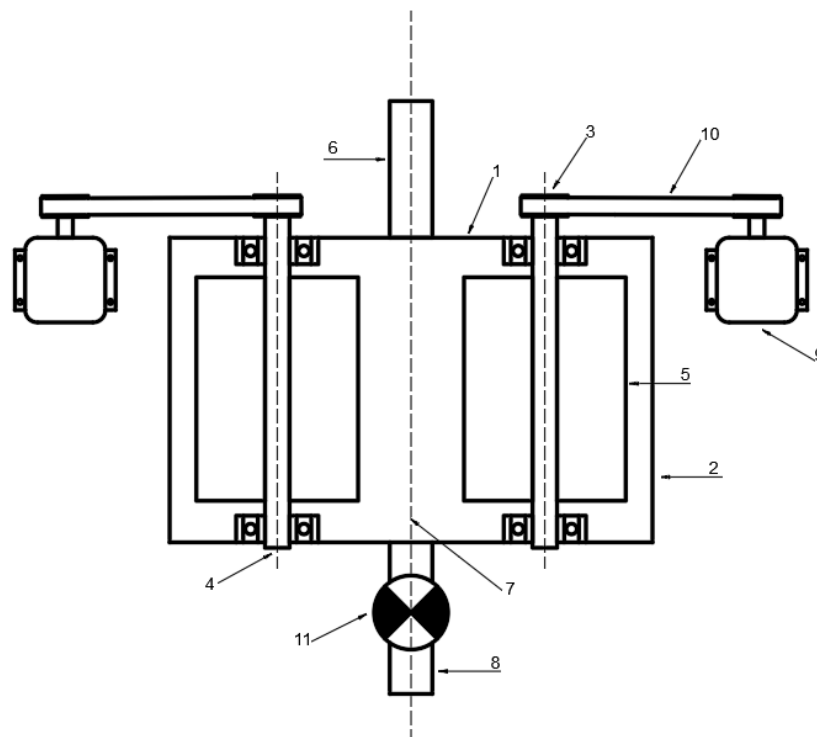


Рис.2.3 Принципова схема роторного протитечійного млину

1 - корпус млина, 2 – циліндри, 3 -вертикальні ротори, 4- вал, 5 – пластини, 6 - живильний патрубок, 7 – зона помелу, 8 – патрубок, 9 - електричний двигун, 10 - гумовий ремінь, 11 - дозатор

Створений дослідно-промисловий роторний протитечійний млин по своїм характеристикам перевершує аналоги і досить ефективно активує змішаний портландцемент.

В корпусі млина 1, який має вигляд двох зварених між собою циліндрів 2, встановлено два вертикальних ротори 3. Кожний із роторів складається з валу 4, до якого кріпляться пластини 5 у кількості чотирьох штук зі звичайної будівельної сталі. У верхній частині корпусу знаходиться живильний патрубок 6, через який подається суміш для активації. У нижній зоні млина, на одній вісі з живильним патрубком, знаходиться патрубок для виходу активованого матеріалу 8, а також дозатор 11 який регулює тонину помелу. Ротори зв'язані з електричними двигунами 9 за допомогою гумових ременів 10. Після запуску млина ротори починають обертатися назустріч один одному із швидкістю 11000 об/хв. При обертанні роторів перед пластинами створюється область підвищеного повітряного тиску, який змушує рухатись змішаний портландцемент по роздільним траєкторіям. Розігнаний кожним ротором до повної швидкості змішаний цемент зустрічається в контактній зоні 7, де внаслідок зіткнення дисперсних часток відбувається активація їх поверхонь. Після заданого терміну активації змішаний цемент переміщується в нижню частину млина, де через вивантажний патрубок виходить до накопичувального бункера і потім далі на ваговий дозатор.

2.6. Методика визначення стиранності бетону

Для визначення стиранності бетону використовувався круг стирання ЛКІ-2. Одночасно на крузі стирання випробувалися два зразки – куби з розміром ребра 7,07 см. Зразки встановлювалися в спеціальні гнізда круга стирання. Після встановлення зразків на стираючий круг по центру кожного зразку прикладають вертикальне зусилля в 60 КПа і рівномірним шаром висипають першу порцію промитого і висушеного кварцового піску. Після встановлення зразків і нанесення на стиральний диск кварцового піску (20 г)

включають привід круга і проводять стирання. Через кожні 30 м шляху стирання пройденого зразками (28 оборотів на стираючому крузі), диск зупиняють. З нього видаляють залишки абразивного матеріалу і перетвореного в порошок бетону і насипають на нього нову порцію піску і знову включають привід стираючого круга. Вказану операцію повторюють п'ять разів, що становить один цикл випробувань (150 м шляху випробування). Після кожного циклу випробування зразки виймають із гнізд, повертають на 90° в горизонтальній площині (навколо вертикальної осі) і проводять наступні цикли випробувань. Після чотирьох циклів випробування повітряно-сухі зразки протирають сухою тканиною і зважують. Стирання бетону характеризується втратою маси зразка, яку визначають з похибкою до 0,1 г/см² для окремого зразка, за формулою:

$$G = \frac{m_1 - m_2}{F}, \quad (2.3)$$

де m_1 - маса зразка до випробування, г;

m_2 - маса зразка після чотирьох циклів випробування, г;

F - площа стирання грані зразка, см²

Марка стиранності бетону G визначається у відповідності від величини стиранності на крузі ЛКІ-2:; G_1 - не більше 0,7 г/см²; G_2 – не більше 0,8 г/см²; G_3 – не більше 0,9 г/см².

2.7. Математичні плани проведених досліджень і фактори, які варіювалися в них

Процес експериментальних досліджень та обробці їх результатів проходив з використанням методик математичного планування експерименту. Використання даних методик в значній мірі дозволило скоротити кількість необхідних випробувань для виявлення впливу тих чи інших факторів на властивості будівельного розчину або бетону, а також забезпечити необхідну точність результатів досліджень. Після першого і другого етапу досліджень (п.2.1) були проведені основні експериментальні дослідження (3 і 4 етапи)

будівельних розчинів і бетонів з використанням механоактивованого змішаного портландцементу (змішаного в'язучого).

На третьому етапі з використанням планового експерименту досліджувалися міцнісні характеристики будівельних розчинів в 2-х, 7-ми та 28-ми добовому терміну тверднення на механоактивованому змішаному в'язучому (80 % портландцементу + 20 % кварцового піску). Для контролю проводився плановий експеримент з використанням будівельних розчинів на немеханоактивованій суміші портландцементу (80 %) з добавкою 20 % кварцового піску.

Плановий експеримент проводився за 15-и точковим симетричним планом. В експериментах варіювалися наступні фактори складу:

X_1 – цементно-піщане відношення від 1:3 до 1:1;

X_2 – кількість суперпластифікатору С-3 – $0,75 \pm 0,75\%$ (від маси цементу в змішаному в'язучому);

X_3 – кількість мікрокремнезему – $5 \pm 5\%$ (від маси цементу в змішаному в'язучому).

Всі досліджені на даному етапі розчинові суміші характеризувалися однаковою рухливістю, яка складала 130 мм розпливу конусу (після 30-и струшувань на струшуючому столику). План експерименту і склади досліджених будівельних розчинів приведені в табл.2.3.

На четвертому етапі досліджувалися властивості важких бетонів на механоактивованому змішаному в'язучому. Проводився 3-х факторний експеримент за 15-ти точковим симетричним планом, табл. 2.4. Для контролю проводився плановий експеримент на портландцементі, який механоактивації не підлягав.

В експериментах варіювалися такі фактори складу:

X_1 – суперпластифікатор С-3 - $0,75 \pm 0,75\%$ (від маси цементу в змішаному в'язучому);

X_2 – мікрокремнезем в кількості $5 \pm 5\%$ (від маси цементу в змішаному в'язучому);

X_3 – базальтова фібра 1 ± 1 % (від маси цементу в змішаному в'язучому)

Таблиця 2.3

План експерименту і склади досліджених будівельних розчинів

№ п/п	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3	Склад будівельного розчину на один заміс, г			
				в'язуче /кв. пісок	С-3, %	МК, %	В'язуче, г	Кварцовий пісок, г	Супер пластифікатор С-3, г	Мікрокрем незем, г
1	-	-	-	0,33	0	0	500	1500	0,0	0
2	-	+	-	0,33	1,5	0	500	1500	6,0	0
3	0	0	-	0,50	0,75	0	667	1333	3,75	0
4	+	-	-	1,00	0	0	1000	1000	0,0	0
5	+	+	-	1,00	1,5	0	1000	1000	12,0	0
6	-	0	0	0,33	0,75	5	500	1500	3,0	20
7	0	-	0	0,50	0	5	667	1333	0,0	25
8	0	0	0	0,50	0,75	5	667	1333	3,75	25
9	0	+	0	0,50	1,5	5	667	1333	7,5	25
10	+	0	0	1,00	0,75	5	1000	1000	6,0	40
11	-	-	+	0,33	0	10	500	1500	0,0	40
12	-	+	+	0,33	1,5	10	500	1500	6,0	40
13	0	0	+	0,50	0,75	10	667	1333	3,75	50
14	+	-	+	1,00	0	10	1000	1000	0,0	80
15	+	+	+	1,00	1,5	10	1000	1000	12,0	80

Фактори X_1 і X_2 (витрата С-3 і мікрокремнезему) збігаються з аналогічними факторами на третьому етапі досліджень, так як корегування їх кількості могло в значній мірі віддзеркалюватися на міцнісних характеристиках затверділого будівельного розчину. Велика вірогідність того, що дані фактори в значній мірі впливають і на механічні характеристики бетону. Дослідження властивостей сумішей і бетонів на даному етапі роботи проводилися на двох аналогічних серіях зразків: першої – з застосуванням механохімічної активації змішаного в'язучого в роторному протитечійному млину протягом 300 сек, другий – за традиційною технологією. Всі досліджені

склади мали рівну рухливість ($OK = 6 \pm 1$ см), що відповідає реальній рухливості бетонних сумішей, які використовуються у будівельній практиці.

План експерименту, проведеного на четвертому етапі досліджень, і склади досліджених бетонів (для обох серій зразків) наведені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

План експерименту і склади досліджених бетонів (кг/м³)

№ п/п	Рівні факторів			Змішане в'язуче		Кварцовий пісок	Гранітний щебінь 5-10 і 10-20мм	Суперпласти - фікатор С-3	Мікро-кремнезем	Базальтова фібра
	X ₁	X ₂	X ₃	Портландцемент	Кварц. пісок					
1	-	-	-	400	80	690	1175	0	0	0
2	-	+	-	400	80	675	1150	0	40	0
3	0	0	-	400	80	683	1163	3	20	0
4	+	-	-	400	80	690	1175	6	0	0
5	+	+	-	400	80	675	1150	6	40	0
6	-	0	0	400	80	683	1163	0	20	4
7	0	-	0	400	80	690	1175	3	0	4
8	0	0	0	400	80	683	1163	3	20	4
9	0	+	0	400	80	675	1150	3	40	4
10	+	0	0	400	80	683	1183	6	20	4
11	-	-	+	400	80	690	1175	0	0	8
12	-	+	+	400	80	675	1150	0	40	8
13	0	0	+	400	80	683	1163	3	20	8
14	+	-	+	400	80	690	1175	6	0	8
15	+	+	+	400	80	675	1150	6	40	8

Витрата змішаного в'язучого в бетоні складала 480 кг/м³, що відповідає середній витраті в'язучого на 1м³ бетону в промисловому будівництві.

2.8. Обробка результатів експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження і обробка їх результатів виконувалися із застосуванням комп'ютерних технологій. Зібрання, аналіз і сортування одержаних експериментальних даних виконувались за рахунок програм, які входять в комплект програм Microsoft Office 2003. Редагування рисунків і графіків виконувалось з використанням професійних графічних редакторів. Побудова і статистичний аналіз поліноміальних моделей виконувалися за

стандартними методиками з використанням діалогової системи COMPEX, яка розроблена на кафедрі процесів і апаратів в технології будівельних матеріалів ОДАБА (проф. Вознесенській В. А.). Всі моделі побудовані зі ступенем ризику $\alpha=0,2$.

Математична модель із усіма оцінками коефіцієнтів перевірялася на адекватність по критерію Фішера. Передбачувана здатність математичних моделей оцінювалась на збіг розрахункових і експериментальних значень розглядаємої властивості в контрольних точках.

Комплекс використовуваних методик і матеріалів, а також технології, дозволили виконати заплановані задачі і досягти поставленої цілі – забезпечити підвищення ефективності використання портландцементу в бетоні за рахунок його сумісної з кварцовим піском механохімічної активації в роторному протитечійному млину.

Висновки за 2-м розділом

1. В дисертаційній роботі наведені основні характеристики і властивості використаних в дослідженнях матеріалів для приготування цементного тіста, будівельних розчинів та бетонів: сульфатостійкого шлакопортландцементу СС ШПЦ М400-Д 60; портландцементу ПЦ II/A-Ш-500; гранітного щебеню, кварцового піску, мікрокремнезему, базальтової фібри та суперпластифікатору С-3.

2. Описані методи досліджень ефективної в'язкості, фізико-механічних властивостей і структури будівельних розчинів і бетонів.

3. Описана загальна блок -схема досліджень.

4. Наведено план експерименту і склади досліджених будівельних розчинів для визначення їх впливу на міцність розчину в 2-х, 7-и та 28-и добовому віці.

5. Приведено 3-х факторний математичний план і склади досліджених бетонів для визначення їх впливу на міцність при стиску та стиранність бетону у 2-х та 28-и добовому віці.

6. Експериментальні дослідження і обробка їх результатів здійснювалися із застосуванням комп'ютерних технологій.

РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ МЕХАНОХІМІЧНОЇ АКТИВАЦІЇ НА ВЛАСТИВОСТІ ЦЕМЕНТУ ТА ЦЕМЕНТОВМІЩУЮЧИХ КОМПОЗИЦІЙ

За рахунок активації портландцементу, та його різновидів можливо вирішувати наступні задачі, а саме:

- а) підвищити механічні і експлуатаційні характеристики бетону;
- б) суттєво знизити їх енергетичні витрати та матеріалоемність

Як відмічалось раніше, підвищення хімічної активності цементу досягається за рахунок:

- а) зростання тонини помелу в'язучого;
- б) введення в процесі помелу в'язучого поверхньо-активних речовин;
- в) помелу в'язучого в середовищі з регулюємою температурою

Серед методів підвищення активності в'язучих особливе місце займають механохімічні способи активації мінеральних в'язучих, які досить легко ув'язуються з другими способами фізико-хімічних методів активації. Перспективним направленням слід вважати механохімічну обробку цементу в трибозмішувачах оригінальних конструкцій, які досить ефективно забезпечують зростання поверхневої енергії тонкодисперсних часток в'язучого. Внаслідок механічної дії на дисперсні частки в'язучого на їх поверхні виникають, хоч і на дуже короткий час, високоенергетичні збуджені стани. Виходячи з цього, можливо припустити, що, незалежно від характеру механічного впливу на частки в'язучого, в початковий момент виникає пружна деформація, яка призводить до зміни довжини зв'язків у твердому тілі. Перевищення пружної деформації викликає розвиток пластичної, незворотньої деформації і руйнування. В момент хаотичних переміщень часток, які летять з великою швидкістю, в місцях їх зіткнень в зонах субмікроскопічної деформації відбувається акумулювання енергії. Внаслідок цього процесу в місцях контактів утворюються, на дуже короткий час, збуджені стани, які в значній мірі послаблюють кристалічні решітки. Цей

процес супроводжується руйнуванням поверхневої структури досліджуваного в'язучого, яке пов'язується з викидом із неї атомів та електронів.

Утворені в наслідок механічних впливів пружні напруження досягають на дуже короткий час значних величин, що викликає інтенсивне збурювання. Наслідком інтенсивного збурювання є міграція дислокацій. Експериментальні дослідження показали, що в області удару утворюється яскраво виражена розпоряджена структура. При циклічній ударній обробці зона деформації розширюється, що характерно для твердих тіл, які характеризуються пластичними властивостями. Виникаюча в такий спосіб структура поверхні матеріалу залежить від параметрів обробки. Таким чином можливо констатувати, що внаслідок механообробки на всій поверхні дисперсного матеріалу утворюється гранична зона, упорядкованість якої безперервно знижується. Зростання інтенсивності механічної обробки тонкодисперсних часток приводить до того, що первісні пластичні деформації змінюються появою тріщин з утворюванням, так званих, «свіжих поверхонь». Для досягнення високого ступеня активації тонкодисперсних часток в'язучого використовується устаткування, у якому ефективно здійснюється подрібнення матеріалу до утворення значної питомої поверхні. В цьому разі використовуються в основному однокамерні барабанні і вібраційні кульові млини. Такі млини по ефективності значно поступаються високопродуктивним багатоканальним млинам, які використовуються на цементних заводах. Експлуатація таких млинів з використанням повітряних сепараторів і замкнутого циклу виробництва цементу не забезпечує оптимального співвідношення між витратою енергії і заданою тониною помелу в'язучого. Таким чином можливо констатувати, що використання однокамерних барабанних і вібраційних кульових млинів характеризується відносно низьким коефіцієнтом корисної дії, так як на долю зростання питомої поверхні в'язучого витрачається не більше 6...10 % від всієї підведеної енергії. Слід відмітити також, що і питома продуктивність багатоканальних кульових млинів значно вища, ніж у помольного обладнання малої

потужності. Таким чином, домел цементу в таких непродуктивних помольних агрегатах є економічно недоцільною дією. Енергоефективність подрібнення зерен цементу методом тертя стає вичерпаною вже на границі питомої поверхні в $300 \text{ м}^2/\text{кг}$. Одержання цементу з більшою питомою поверхнею з використанням однокамерних барабанних і вібраційних кульових млинів в умовах діючих виробництв стає економічно недоцільним завданням. Так як одержання високоактивного цементу пов'язано із зростанням тонини помелу рядового цементу, то кульові млини, які використовуються для цієї операції, значно підвищують собівартість продукції. Спроби підвищити величину питомої поверхні портландцементу на такому устаткуванні приводять як до зниження продуктивності млинів, так і до значного підвищення витрати електроенергії. Для вирішення цієї проблеми пропонується метод стираючого подрібнення, який реалізується в кульових млинах, замінити на другий спосіб подрібнення. Виходячи із того, що найбільш перспективним напрямом зниження собівартості активації цементу є зниження енергоємності самого процесу подрібнення, то використання таких агрегатів як струменеві млини, може розглядатися, як безальтернативної спосіб підвищення активності в'язучого.

Саме в струменевих млинах полідисперсні зерна цементу подрібнюються, в основному, за рахунок вільного удару об помольні органи або за рахунок безперервних хаотичних зіткнень в повітряному потоці. Такі зіткнення викликають інтенсивне руйнування зерен цементу по місцям структурних дефектів. Виготовлений дослідно-експериментальний роторний протитечійний млин, принципова схема якого наведена в 2-му розділі дисертаційної роботи, був використаний, зокрема, на другому етапі досліджень (згідно загальної блок-схеми, рис.2.1) для визначення впливу механоактивації на зміну питомої поверхні цементу, ефективної в'язкості цементного тіста, кількості хімічно зв'язаної води, нормальної густоти та термінів тужавлення, а також кінетики екзотермічного розігріву цементних композицій.

3.1. Вплив терміну активації цементу в роторному протитечійному млину на зміну його питомої поверхні

Відомо, що однією із характеристик цементу, яка впливає на властивості цементного каменю та бетону на його основні, є його питома поверхня. Вона визначається як сумарна зовнішня поверхня тонкодисперсних часток в одиниці маси в'язучого. Звісно, що чим тонше помел цементу, тим більша його питома поверхня. Таким чином, основні властивості цементу, в том числі активність і швидкість тверднення, визначаються не тільки мінералогічним складом цементу, наявністю тих чи інших добавок, але і питомою поверхнею цементу, його гранулометричним складом. Багаторічний досвід дозволив зробити висновки про те, що зростання тонини помелу цементу в значно більшій мірі впливає на його швидкість тверднення, ніж другі технологічні прийоми (введення ПАР, зміна В/Ц, введення активних мінеральних добавок і др.).

Для проведення досліджень по визначенню впливу терміну активації на зміну питомої поверхні в'язучого використовувався сульфатостійкий шлакопортландцемент ССШПЦ М400-Д60 з питомою поверхнею 415 м²/кг. Активація цементу здійснювалася в протитечійному млині протягом 60, 180, 300 і 600 сек. Приведені в табл.3.1. експериментальні дані свідчать про те, що механохімічна обробка в'язучого в протитечійному млині приводе до зростання його питомої з 415 м²/кг (активація відсутня) до 450 м²/кг (активація протягом 600 сек).

Таблиця 3.1

Вплив терміну активації цементу на зміну його питомої поверхні

Фізична властивість в'язучого	Термін активації в'язучого, сек				
	0	60	180	300	600
Питома поверхня, м ² /кг	415	430	440	445	450

Слід відмітити досить інтенсивне зростання питомої поверхні цементу в перші 60 сек активації - від 415 до 430 м²/кг. В подальшому зростання питомої поверхні сповільнюється, досягаючи 445 м²/кг через 300 сек активації. Подальша активація цементу (від 300 до 600 сек) викликає зростання питомої поверхні цементу не більше ніж на 5 м²/кг (з 445 до 450 м²/кг).

3.2. Вплив терміну активації в'язучого на зміну ефективної в'язкості цементного тіста

Для визначення впливу терміну активації в'язучого на зміну ефективної в'язкості цементного тіста використовувався сульфатостійкий шлакопортландцемент ССШПЦ М400-Д60. Питома поверхня цементу складала 415 м²/кг. Ефективна в'язкість визначалася згідно методики, наведеної в § 2.4 дисертації. Експериментальні дані, які відображають вплив терміну активації цементу в роторному протитечійному млині відображено в табл. 3.1. Замішування механоактивованого цементу здійснювалося як чистою, водопровідною водою, так і водними розчинами суперпластифікуючої добавки С-3. Концентрація водних розчинів вибиралася таким чином, щоб вміст С-3 (в перерахунку на суху речовину) коливався в діапазоні: 0 – контроль (С-3 відсутній); 0,5 %; 1,0 % та 1,5 % (вміст С-3 в % від маси цементу), табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Вплив терміну активації цементу на зміну ефективної в'язкості (сП) цементного тіста

№ з/п	Концентрація С-3, %	Термін активації, сек					В/Ц
		0	60	180	300	600	
1	0	198	210	217	223	230	0,35
2	0,5	185	192	201	208	214	0,35
3	1,0	160	170	182	190	193	0,35
4	1,5	150	154	161	170	177	0,35

Графічне відображення результатів впливу термінів активації цементу в роторному протитечійному млині на зміну ефективної в'язкості цементного тіста наведено на рис. 3.1.

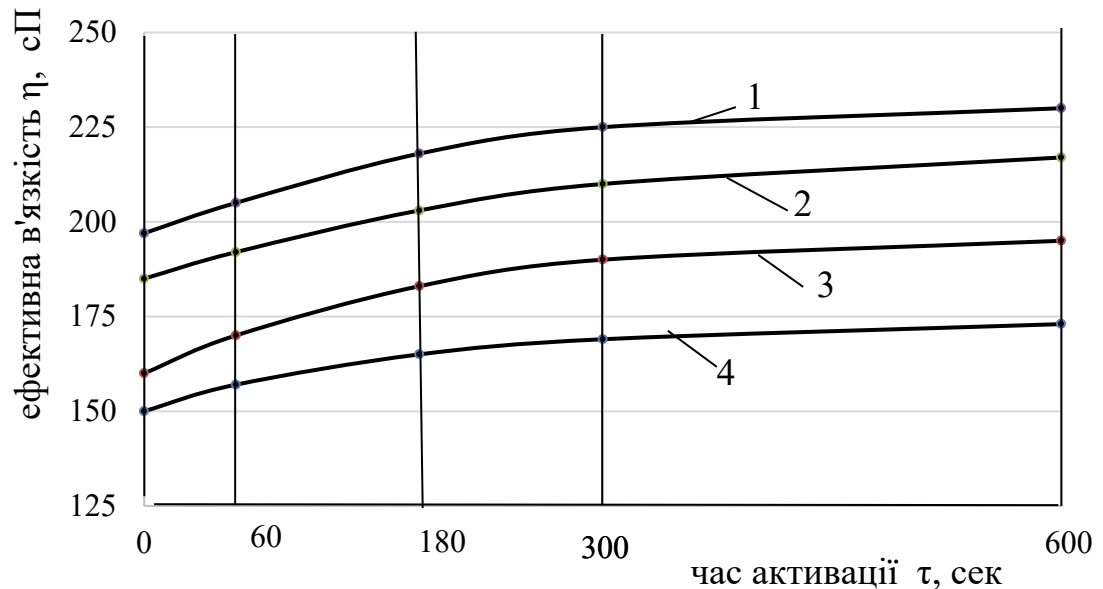


Рис. 3.1. Вплив терміну активації цементу (τ) на зміну ефективної в'язкості цементного тіста (η)

1,2,3,4 – витрата суперпластифікатора С-3 (від маси цементу) –
0; 0,5; 1,0 та 1,5 % відповідно

Аналізуючи результати досліджень, слід відмітити:

1) механохімічна обробка цементу в роторному протитечійному млині в діапазоні часу від 0 до 300 сек, для всіх вивчених концентрацій суперпластифікатора С-3 в цементному тісті, свідчить про те, що активація сприяє підвищенню ефективної в'язкості тіста на 16...21 %;

2) введення в воду замішування суперпластифікатора С-3 сприяє зниженню ефективної в'язкості тіста, цемент якого не підлягав механоактивації, з 198 сП (С-3 відсутній) до 146 сП (вміст С-3 складає 1,5 % від маси цементу), тобто майже на 32 %;

3) для цементу, який був активований протягом 300 сек, введення в воду замішування суперпластифікатору С-3 приведе до зниження η з 230 сП (С-3 відсутній) до 177 сП (витрата С-3 складає 1,5 % від маси цементу), тобто майже на 30 %. Таким чином, результати експериментальних досліджень свідчать про те, що керуючи терміном активації та концентрацією суперпластифікатору С-3 можна в широкому діапазоні змінювати ефективну в'язкість цементного тіста

3.3. Вплив терміну активації в'язучого на кількість хімічно зв'язаної води в цементному камені

В дослідженнях, які пов'язані з визначенням механізму гідратації активованого цементу, до першочергових задач відносять вивчення кінетичних параметрів процесів структуроутворення до яких відноситься, зокрема, кількість хімічно зв'язаної води. Як відзначалося раніше, в результаті зіткнення двох твердих тіл в локальній зоні спостерігається руйнування кристалічної решітки, яке супроводжується зародженням мікротріщин в зернах цементу. Зіткнення часток в'язучого в локальній зоні приведе до зростання питомої поверхні цементу. Зростання питомої поверхні викликає появу нової кількості активних центрів в одиниці об'єму, що веде до зміни умов контактування часток цементу як між собою так і з дисперсійним середовищем. Таким чином, взаємодія часток цементу при їх зіткненні викликає аморфізацію їх поверхонь, що приведе до підвищення їх реакційної здатності. Кількість води, яка хімічно зв'язується в наслідок взаємодії з портландцементом, якісно характеризує його процес гідратації.

Метод визначення кількості хімічно зв'язаної води припускав виготовлення із цементного тіста з В/Ц=0,29 (нормальна густота) зразків (по одному для кожного терміну активації в'язучого). Зразки витримувалися в нормальних умовах протягом 1, 3, 7 та 28-и днів. Через задані терміни тверднення зразки тонко подрібнювалися, а тонкодисперсна суміш підлягала нагріву до температури 105...110 °С. При заданій температурі

зразки витримувалися протягом 24 годин. Висушену навіску (приблизно 5 г) поміщали в фарфоровий тигель і піддавали прожарюванню до постійної маси при температурі 1000 °С. Кількість хімічно зв'язаної води розраховувалася за формулою:

$$B = \frac{a-b}{a} 100, \quad (3.1)$$

де: а – маса абсолютно сухого зразка до прокалювання, г;

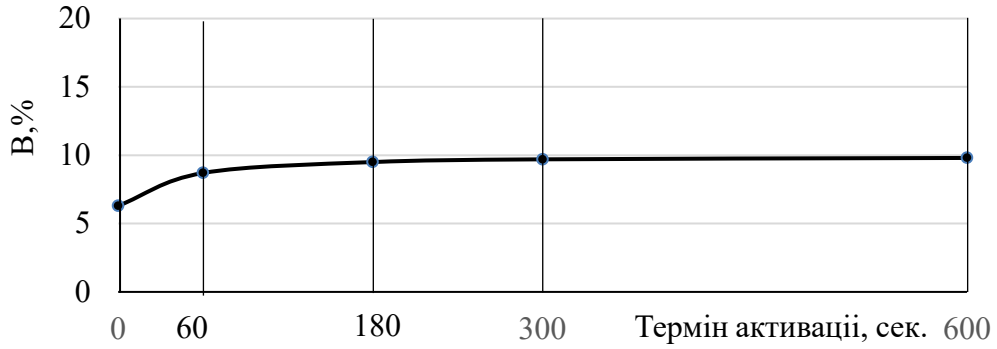
в – маса прокаленого зразка, г

Активація цементу здійснювалась в роторному протитечійному млині протягом 60, 180, 300 та 600 сек. Для контролю використовувався цемент, який механохімічній активації не підлягав. В результаті проведених дослідів виявлено, що цементний камінь на механоактивованому цементі характеризується підвищеною кількістю хімічно зв'язаної води в порівнянні з цементним каменем, в'яжуче якого активації не підлягало, рис.3.2. Аналіз графічних залежностей свідчить про те, що термін активації в'яжучого впливає на кількість хімічно зв'язаної води, досягаючи максимального значення при 10-хвилинній механохімічній обробці цементу. Слід відзначити, що основна кількість хімічно зв'язаної води забезпечується в період до 300 секунд. Подальше зростання терміну активації цементу викликає незначне підвищення кількості хімічно зв'язаної води в цементному камені. Так наприклад, кількість хімічно зв'язаної води для цементного каменю на 28 –у добу тверднення після 300-х секундної активації в'яжучого складає 16,3 %, а після активації протягом 600 секунд - не перевищує 17 % (зростання – 4 %). В той же час активація в'яжучого протягом 300 секунд викликає зростання кількості хімічно зв'язаної води, у порівнянні з цементним каменем на в'яжучому, яке механоактивації не підлягало, більше ніж на 25 % - з 13 до 16,3 %.

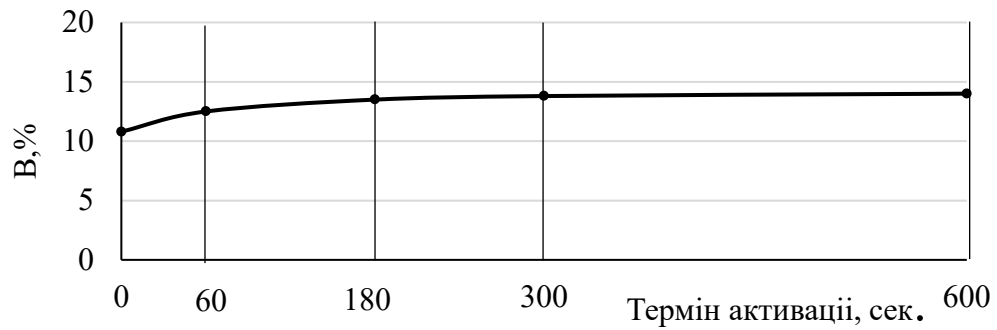
Одержані експериментальні результати свідчать про те, що механохімічна активація цементу викликає підвищення швидкості реакції

гідратації цементу, що відображається на зростанні кількості хімічно зв'язаної води.

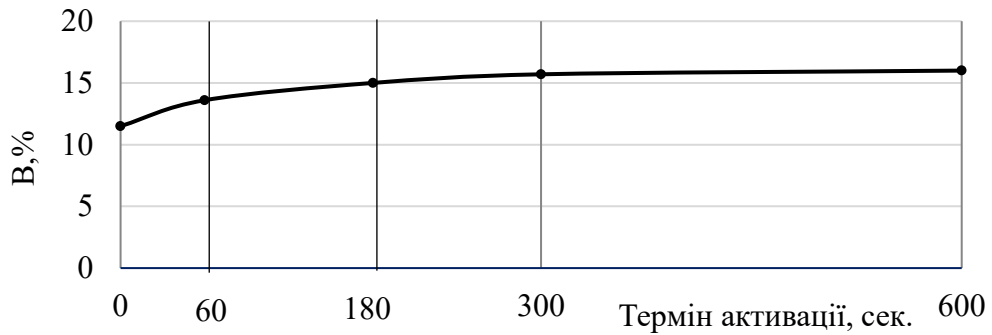
а)



б)



в)



г)

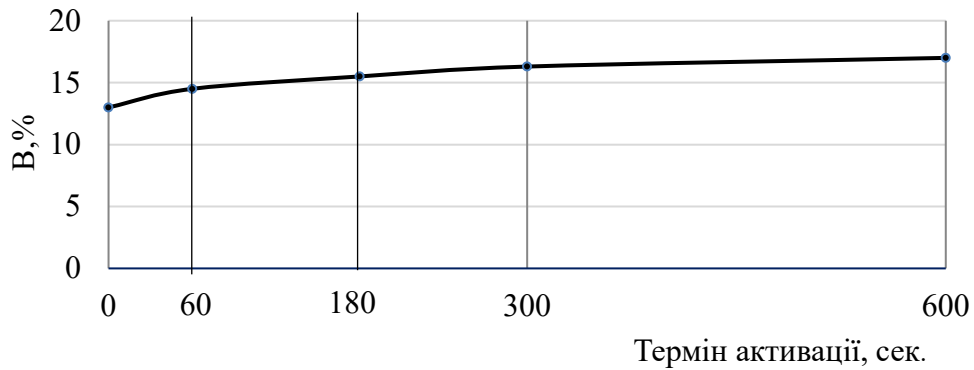


Рис. 3.2 Вплив терміну активації цементу на кількість хімічно зв'язаної води в цементному камені, у віці: а, б, в, г – 1, 3, 7 і 28 діб відповідно

3.4. Вплив механохімічної активації цементу на екзотермічний розігрів тверднучого цементного каменю

В практиці визначення екзотермії цементу найбільше розповсюдження одержали три основних типу калориметричних установок, які моделюють тепловиділення в'язучого в процесі його гідратації. Для масивних конструкцій тепловиділення визначається за допомогою адіабатичних колориметрів. Принцип роботи таких колориметрів полягає у підтримці температури навколишнього середовища рівній температурі тверднучого зразка, що дозволяє визначити тепловиділення бетону без тепловтрат. В адіабатичних колориметрах це досягається за допомогою підігріву середовища, яке оточує цементовміщуючий зразок. Такий колориметр вимагає створення електронної системи, яка відслідковує рівність температури зразка і оточуючого середовища(як правило, води), що значно ускладнює проведення експерименту.

Ізотермічний метод тепловиділення дозволяє здійснювати визначення кінетики екзотермічних реакцій гідратації цементу в умовах постійної, незмінної температури тверднучої цементноводною системи. Такий спосіб визначення тепловиділення в найбільшій мірі підходить для немасивних конструкцій, в яких майже все тепло від екзотермії цементу розсіюється в навколишнє середовище.

Найбільше розповсюдження одержав термосний спосіб визначення екзотермічного розігріву тверднучих цементно-водних композицій внаслідок відносної простоти проведення експерименту. Необхідною умовою визначення екзотермічного розігріву при термосному методі є сталість температури навколишнього середовища. Температура зразка, яка на початку експерименту повинна дорівнювати температурі навколишнього середовища, буде змінюватися мимоволі в результаті одночасного протікання двох процесів:

- 1) екзотермічної реакції при твердненні цементу;
- 2) теплообміну між зразком і середовищем

Екзотермія тверднучого цементного тіста, а потім і каменю, обумовлює зростання температури, теплообмін з навколишнім середовищем, зниження. Прийнята методика передбачає що температура досліджуємого зразка однакова у всіх точках його об'єму. Для підтримки постійної температури по периметру зразка необхідно поміж зразком із цементного тіста і середовищем створити високий термічний опір. Для цієї цілі використовувався термос (посудина Дюара), який представляє собою скляну колбу з подвійними стінками, між якими створюється вакуум. В процесі визначення екзотермічного розігріву цементного тіста температура коливання в приміщенні не перевищує $\pm 1,5$ °С.

Для визначення екзотермічного розігріву готувались зразки із цементного тіста з В/Ц = 0,29.

Приготовлене тісто укладалося в ємність об'ємом 200мл. В центрі зразка розміщались мідна трубка, заповнена наполовину моторним маслом. Фіксація температури тверднучого цементного тіста, а потім каменю, здійснювалася через кожних дві години до того моменту, коли наступний показник розігріву не змінювався по абсолютній величині, або був нижчим попереднього.

Механоактивація цементу здійснювалася в роторному протитечійному млину протягом 60, 180, 300 і 600 секунд. Для контролю виготовлявся зразок із в'язучого, яке не піддавалося механохімічній активації.

Результати екзотермічного розігріву тверднучого цементного каменю приведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Вплив активації на екзотермічний розігрів цементної композиції

Термін активації цементу, сек.	Початкова тем-ра цем. тіста, °С	Температура екзотермічного розігріву цементного тіста, через, год											
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
0	20,6	20,6	20,6	20,7	21,0	22,0	26,2	30,0	34,8	44,5	53,8	53,6	53,1
60	20,4	20,4	20,4	21,0	21,8	22,7	26,9	32,8	39,2	50,2	59,2	59,2	58,6
180	20,5	20,5	20,7	21,8	22,6	25,8	31,4	38,0	49,1	61,0	60,8	60,4	59,4
300	20,3	20,3	20,3	23,2	26,1	31,5	40,6	51,	64,3	64,3	64,0	63,8	63,6
600	20,5	20,5	20,5	23,9	28,4	34,0	42,4	57,8	66,2	66,2	66,1	66,0	65,5

Графічне відображення екзотермічного розігріву тверднучого цементного каменю, в залежності від терміну механохімічної активації цементу, відображено на рис.3.3.

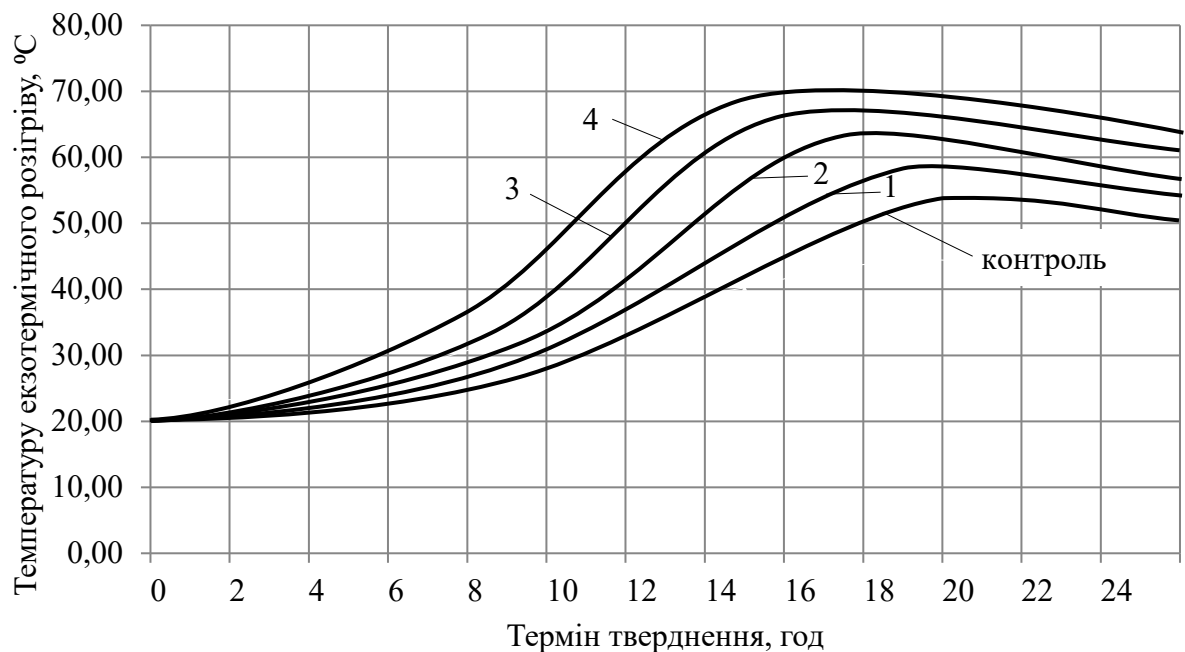


Рис.3.3. Вплив терміну механохімічної активації цементу на екзотермічний розігрів цементного тіста: 1, 2, 3, 4 – термін механохімічної активації портландцементу протягом 60, 180, 300 та 600 сек відповідно;

контроль – механохімічна активація цементу відсутня

Одержані експериментальні результати свідчать про те, що активація цементу в роторному протитечійному млину суттєво впливає на кінетику екзотермічного розігріву тверднучого цементного каменю. Слід виділити якісний вплив зростання терміну активації (до 300-х сек) на величину максимального розігріву тверднучого цементного каменю. Зростання терміну активації цементу до 600 сек продовжує викликати зростання екзотермічного розігріву цементу, але в значно меншій мірі, ніж при активації цементу в діапазоні часу до 300 секунд. Так, якщо зростання терміну активації від 0 до 300 сек сприяє зростанню максимальної температури розігріву від 53,8(контроль) до 64,0 °С, то подальша активація цементу від 300 сек до 600 сек викликає зростання температури розігріву цементного каменю не більше ніж на 1,9 °С. Результати експериментальних досліджень свідчать про те, що оптимальний термін активації цементу складає 300 сек. Збільшення терміну активації в'язучого понад 300 сек незначно впливає на зростання екзотермічного розігріву цементного каменю і тому є неефективним.

3.5. Вплив активації цементу на його нормальну густоту та терміни тужавлення

Водопотребу цементів визначають кількістю води замішування в процентах від маси цементу, яка потрібна для створення тіста нормальної густоти. Нормальна густота є поняття умовним і визначається глибиною занурення в цементне тісто сталюого циліндру діаметром 10 мм на приборі Віка.

Механоактивація цементу здійснювалася в роторному протитечійному млину протягом 60, 180, 300 та 600 секунд. Для контролю використовувався цемент, який активації не підлягав. В результаті проведених експериментів виявлено, що термін механоактивації цементу впливає на його нормальну густоту, яка зростає з 28 % (механоактивація відсутня) до 29 % (активація в'язучого впродовж 300 секунд), табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Вплив терміну активації на нормальну густоту цементу

Вид випробування	Термін активації в'язучого, сек				
	0	60	180	300	600
Нормальна густота, %	28,0	28,4	28,7	29,0	29,2

Зростання терміну активації цементу від 300 до 600 секунд практично не впливає на зростання нормальної густоти, що є підтвердженням раніше наданих висновків що кореспондується з раніше наданими висновками щодо оптимального терміну активації в'язучого, а саме, 300-т секунд.

Представляв інтерес виявити вплив механоактивації в'язучого на терміни тужавлення цементного тіста нормальної густоти. Для цього використовувалося цементне тісто, яке було виготовлене з використанням механоактивованого цементу. Термін активації складав 60, 180, 300 та 600 секунд. Для контролю готувалося цементне тісто з використанням в'язучого, яке не підлягало механохімічній активації.

Таблиця 3.5

Вплив механоактивації цементу на терміни тужавлення цементного тіста нормальної густоти

Термін активації, сек.	Початок тужавлення, год-хв	Кінець тужавлення, год-хв
0	2-55	4-50
60	2-25	4-20
180	2-05	4-00
300	1-55	3-40
600	1-50	3-30

Результати експериментальних досліджень свідчать про те, що механоактивація в'язучого викликає зростання швидкості тверднення цементного тіста, що проявляється у скороченні термінів його тужавлення,

табл.3.5 Слід відзначити, що механоактивація в'язучого протягом перших 300-т секунд викликає скорочення термінів тужавлення цементного тіста (в порівнянні з контролем) в середньому на одну годину. Подальша механоактивація в'язучого до 600 секунд практично не позначається на скороченні термінів тужавлення і не перевищує 5...10 хвилин.

Таким чином можливо відмітити, що механохімічна активація сприяє скороченню термінів тужавлення цементного тіста, що є позитивним фактором при масовому виробництві бетонних та залізобетонних виробів.

Висновки за 3-м розділом

1. Тривалість механохімічної активації цементу в роторному протитечійному млину впливає на зміну його питомої поверхні: від 415 м²/кг (механохімічна активація відсутня) до 450 м²/кг (активація цементу протягом 600 сек).

2. Механохімічна активація цементу викликає підвищення ефективної в'язкості цементного тіста для всіх вивчених концентрацій суперпластифікатору С-3 (від 0 до 1,5 % від маси цементу) в середньому на 16 ...21 %.

3. Механохімічна активація цементу (600 сек) сприяє зростанню кількості хімічно зв'язаної води в цементному каменю в 28-и добовому віці з 13 % (активація відсутня) до 17 %, тобто більше ніж на 30 %.

4. Механохімічна активація цементу сприяє більш інтенсивному розігріву тверднучого цементного тіста в калориметрі. Більш того, активація цементу підвищує також максимальну температуру розігріву цементного каменю - з 53,8 °С (активація цементу відсутня) до 64 °С (активація цементу протягом 300 сек).

5. Механохімічна активація цементу протягом 600 сек сприяє скороченню термінів тужавлення цементного тіста: початок тужавлення - з 2 год 55 хв до 1 год 50 хв; кінець тужавлення - з 4 год 50 хв до 3 год 30 хв.

РОЗДІЛ 4. ВПЛИВ МЕХАНОАКТИВАЦІЇ ЗМІШАНОГО В'ЯЖУЧОГО НА МІЦНІСТЬ ПРИ СТИСКУ БУДІВЕЛЬНОГО РОЗЧИНУ

Проведенні раніше дослідження фізико-механічних властивостей цементу та тверднучих цементних композицій на його основні показали, що механоактивація в'язучого викликає прискорення процесів структуроутворення. Зростання швидкості процесів структуроутворення виражається в інтенсифікації процесів гідратування (кількість хімічно зв'язаної води), прискоренні термінів тужавлення та кінетики екзотермічного розігріву.

Незалежно від характеру механічного впливу на зерна портландцементу на першій стадії активації виникають пружні деформації, які приводять до зміни довжини зв'язків в цементному камені. Після перевищення границі пружності виникають процеси, які пов'язані, в основному, з утворенням пластичних деформацій, які викликають руйнування. Внаслідок ударної обробки, яка повторюється, відбувається розширення зони деформації. Підвищення інтенсивності механічної обробки викликає появу тріщин в області пластичних деформацій. При такому процесі руйнуються сили міжатомних зв'язків, що, як правило, приводе до утворення так званих "свіжих поверхонь". Якщо тріщина повністю перетинає цементний камінь, то відбувається його руйнування. Як правило, розповсюдження тріщини відбувається тоді, коли запас внутрішньої енергії пружної потенціальної енергії є достатньою для того, щоб скомпенсувати вільну поверхневу енергію утворених поверхонь руйнування. Саме внаслідок цього тенденція до крихкого руйнування цементного каменю підвищується із зростанням інтенсивності механічних впливів. Таким чином, активаційні впливи на портландцемент показують, що активація є досить ефективним засобом керування як кінетикою структуроутворення так і кінцевими властивостями цементного каменю. Це дозволяє зробити висновок, що запропонований механізм механоактивації варто віднести до явища, які пов'язані із проявом

активації поверхні тонкодисперсних часток в'язучого. Зіткнення часток цементу в активаційній зоні веде до модифікації їх поверхні, що викликає зміну фізико-механічних процесів і явищ на кордоні розподілу фаз. Сукупні процеси, які є функцією трибохімічних ефектів, прискорюють гідратаційні реакції тонкодисперсних часток в'язучого з водою. В силу того, що продукти новоутворень з'являються практично відразу після розчинення в'язучого, то можливо припустити, що в процесі активації цементу виникають нові складові, які на правах самостійних структурних елементів беруть участь у наступних етапах гідратування.

Можливості підвищення міцності цементного каменю, особливо в ранні терміни тверднення, можуть бути здійснені шляхом цілеспрямованої зміни його структури. Така зміна може бути досягнена за рахунок активації зерен цементу в процесі механообробки, особливо в присутності зерен кварцового піску.

4.1. Вплив витрати кварцового піску на міцність активованого змішаного цементу

Використання кварцового піску в якості мінеральної добавки до цементу має давню історію. Цементний камінь, який має в своєму складі кварцовий пісок, характеризується незначними об'ємними деформаціями і має високу корозійну стійкість. Вміст меленого кварцового піску в цементі, який використовується для виготовлення виробів, тверднучих в нормальних умовах, складає 20...40 %. Термінологічно таке в'язуче може трактуватися як «композиційний цемент», або «змішаний цемент». Кварцовий пісок, який використовувався в якості добавки – наповнювача до портландцементу, характеризувався вмістом кремнієїкислоти (SiO_2) не менше 90 %, а вміст пилевидної фракції ($< 0,05$ мм) не перевищував 3-х %. В якості в'язучого використовувався портландцемент М500 (ПрАТ «Кривий Ріг Цемент»). В умовах традиційної технології виготовлення бетонних і залізобетонних виробів мелений кварцовий пісок практично не вступає в хімічну взаємодію з

гідроксидом кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2$, який виділяється в процесі гідратації цементу. В таких умовах тверднення цементу кварцовий пісок виконує тільки роль затравки. На поверхні зерен кварцового піску висаджуються продукти гідратації цементу в виді кристалогідратів. Наявність затравки, таким чином, провокує процес гідратації, що викликає підвищення швидкості тверднення системи.

Представляв інтерес вивчити вплив механохімічної обробки не тільки портландцементу, а також цементу з добавкою кварцового піску (кількість - від 10 до 50 % маси цементу) на міцність цементного каменю в 28-и добовому віці. Механохімічна активація портландцементу, а також суміші (портландцемент + кварцовий пісок) в роторному протитечійному млині здійснювалась протягом 60, 180, 300 і 600 секунд. Одержане цементно-піщане в'язуче після механоактивації в подальшому буде трактується як змішаний цемент. Для контролю використовувався портландцемент з добавкою немеленого кварцового піску в кількості від 10 до 50 % маси цементу. Одержана, таким чином, суміш механоактивації не підлягала.

Досліджувалася міцність при стиску зразків – балочок розміром 4x4x16 см, які були виготовлені з використанням змішаного цементу. Витрата води визначалася розпливом цементного розчину на приборі Суттарда в діапазоні 90 ± 5 мм.

Наведені в таблиці 4.1 експериментальні дані свідчать про те, що активація змішаного цементу викликає підвищення міцності при стиску цементного каменю в зоні максимуму з 52 МПа (термін активації 60 секунд) до 62 МПа (термін активації 300 секунд) тобто майже на 20 %. Зростання терміну активації до 600 секунд незначно впливає на зростання міцності цементного каменю і не перевищує 3 %.

Слід відмітити про неоднозначний вплив витрати кварцового піску на міцність цементного каменю для різних технологій виготовлення в'язучого. Так, якщо для контрольних зразків характерно зниження міцності при стиску при зростанні вмісту в цементі кварцового піску, то для цементного каменю

на активованому змішаному в'язучому спостерігається підвищення міцності із зростанням витрати кварцового піску.

Таблиця 4.1

Вплив терміну активації змішаного в'язучого на міцність при стиску зразків-балочок 4x4x16 см

№ п/п	Вміст кварцового піску в змішаному в'язучому, %	Міцність при стиску зразків на змішаному в'язучому, МПа				
		Термін активації змішаного в'язучого, сек				
		0	60	180	300	600
1	0	47,2	52,3	54,1	57,0	59,1
2	10	46,4	53,1	56,3	60,2	61,3
3	20	44,3	52,4	57,0	62,5	63,1
4	30	40,6	47,2	51,3	55,4	56,3
5	40	35,8	40,3	43,6	47,8	48,3
6	50	28,7	32,3	34,6	37,5	38,3

Максимальна міцність досягається при наявності в змішаному в'язучому 20 % кварцового піску. Міцність при стиску цементного каменю в цьому разі досягає значення 62,5 МПа (термін активації змішаного в'язучого складає 300 секунд), що на 10 % перевищує міцність цементного каменю на бездобавочному механоактивованому цементі. Проведений комплекс експериментальних досліджень дозволив зробити висновок про те, що оптимальним за складом є активоване змішане в'язуче, яке включає в себе 80 % портландцементу та 20 % кварцового піску. Термін активації змішаного в'язучого складає 300 сек.

Графічне відображення впливу терміну активації і вмісту кварцового піску в в'язучому на міцність цементного каменю, наведено на рис. 4.1.

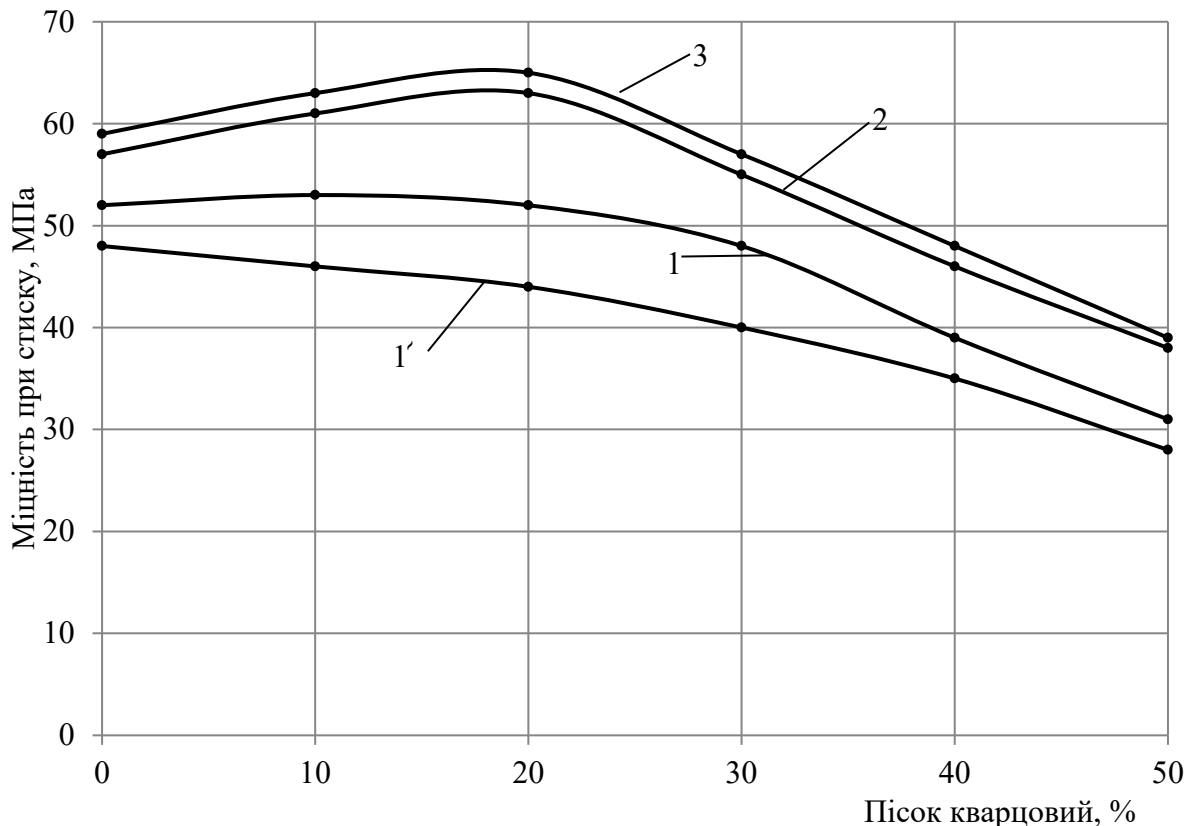


Рис 4.1. Вплив вмісту кварцового піску в змішаному в'язучому на міцність цементного каменю в 28-и добовому віці:

- 1 – активація змішаного в'язучого протягом 60 сек;
- 2 – активація змішаного в'язучого протягом 300 сек;
- 3 – активація змішаного в'язучого протягом 600 сек;
- 1' – цементно-піщана суміш, яка механоактивації не підлягала (контроль)

4.2. Планування і реалізація трифакторного експерименту

Аналіз літературних джерел та експериментальних даних, які наведені в 3-му розділі дисертаційної роботи свідчать про те, що активація цементу в протитечійному млині приводе до покращення властивостей тверднучого цементного тіста (скорочення термінів тужавлення, зростання кількості хімічно зв'язаної води, інтенсифікація екзотермічного розігріву). Особливо ефективна активація цементу з добавкою 20 % кварцового піску. Одержане

таким чином активоване змішане в'язуче забезпечує міцність цементного каменю при стиску ($V/C=0,29$) в 28-и добовому віці, яка більш ніж на 30 % перевищує міцність каменю на бездобавочному цементі, який механоактивації не підлягав. З великою вірогідністю можливо вважати, що введення до складу розчинової суміші активної мінеральної добавки та суперпластифікатору значно підсилять ефект від активації змішаного в'язучого на підвищення міцності будівельного розчину. Експериментальні дослідження проводились з використанням 3-факторного Д-оптимального математичного плану.

В експерименті варіювалися наступні рецептурно-технологічні фактори:

X_1 - цементно-піщане відношення від 1:3 до 1:1;

X_2 – кількість суперпластифікатору С-3 (від маси цементу) – $0,75 \pm 0,75$ %;

X_3 – кількість мікрокремнезему (від маси цементу) - 5 ± 5 %

В якості в'язучого в експерименті використовувалася активована суміш портландцементу ПЦ II/A-III-500 – 80 % та кварцового піску – 20 %. Для контролю використовувався розчинові суміші аналогічних складів, але без механоактивації змішаного в'язучого.

Пластифікація розчинової суміші досягалася за рахунок введення до її складу разом з водою змішування суперпластифікатору С-3. Кількість С-3 варіювалася в діапазоні від 0 до 1,5 % маси портландцементу (в перерахунку на суху речовину).

Використання в планованому експерименті мікрокремнезему пов'язано з тим, що аморфний кремнезем є ефективною мінеральною добавкою до цементу, виконуючи при цьому роль центрів кристалізації новоутворень цементного каменю. Крім цього, мікрокремнезем, вступаючи в хімічну взаємодію з вільним гідроксидом кальцію $Ca(OH)_2$, який виділяється внаслідок гідратації клінкерних матеріалів, сприяє зменшенню його кількості, а також ущільнює структуру цементного каменю.

План експерименту та значення рецептурних факторів приведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

План експерименту та склади будівельних розчинів

№ п/п	Рівні незалежних факторів			X ₁	X ₂	X ₃
	X ₁	X ₂	X ₃	Змішане в'язуче Кварцовий пісок	С-3, %	Мікрокремнезем, %
1	-	-	-	0,33	0	0
2	-	+	-	0,33	1,5	0
3	0	0	-	0,50	0,75	0
4	+	-	-	1,00	0	0
5	+	+	-	1,00	1,5	0
6	-	0	0	0,33	0,75	5
7	0	-	0	0,50	0	5
8	0	0	0	0,50	0,75	5
9	0	+	0	0,50	1,5	5
10	+	0	0	1,00	0,75	5
11	-	-	+	0,33	0	10
12	-	+	+	0,33	1,5	10
13	0	0	+	0,50	0,75	10
14	+	-	+	1,00	0	10
15	+	+	+	1,00	1,5	10

План експерименту та показники міцності при стиску будівельного розчину наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

План експерименту та міцність будівельного розчину при стиску

№ п/п	Рівні незалежних факторів			Відгуки					
	X ₁	X ₂	X ₃	R _{ст} ^к , МПа			R _{ст} ^{м.а} , МПа		
				2 доби	7 діб	28 діб	2 доби	7 діб	28 діб
1	-	-	-	9,8	14,2	19,7	18,2	22,0	25,6
2	-	+	-	15,7	21,9	28,4	25,5	31,0	35,8
3	0	0	-	20,2	28,4	37,2	32,3	38,3	45,3
4	+	-	-	21,7	31,2	40,9	32,0	40,1	48,0
5	+	+	-	33,9	38,4	47,0	41,2	49,3	57,8
6	-	0	0	13,0	18,3	24,5	22,5	27,8	31,6
7	0	-	0	19,0	27,3	36,3	30,6	39,6	47,1
8	0	0	0	22,0	30,8	39,7	36,1	42,6	50,7
9	0	+	0	26,8	35,2	45,5	40,8	49,4	57,2
10	+	0	0	28,0	38,0	46,8	41,0	48,4	57,9
11	-	-	+	11,4	15,4	21,6	19,8	24,4	27,6
12	-	+	+	18,1	24,3	32,6	30,1	35,9	42,0
13	0	0	+	24,7	33,7	44,0	40,0	45,0	55,4
14	+	-	+	33,5	33,5	35,2	35,2	44,6	53,9
15	+	+	+	45,1	45,1	45,6	45,6	54,8	64,8

Примітка: $R_{ст}^к$ – міцність при стиску зразків із будівельного розчину на немеханоактивованому в'язучому у віці 2-х, 7-и та 28 діб тверднення в н.у.;

$R_{ст}^{м.а}$ – міцність при стиску зразків із будівельного розчину на механоактивованому в'язучому у віці 2-х, 7-и та 28 діб тверднення в н.у.

Витрата води змішування для кожної строчки планового експерименту приймалася з розрахунку одержання діаметру розпливу конуса на

струшуючому столику в діапазоні 130 ± 2 мм (після 30 струшувань). Заданий діаметр розпливу конусу розчинової суміші приймався однаковим для двох порівнюваних технологій.

4.3. Вплив рецептурно-технологічних факторів на міцність при стиску досліджених будівельних розчинів

Міцність при стиску досліджених в обох серіях зразків (на активованому змішаному в'язучому і на портландцементі, який активації не підлягав) визначалася у віці 2-х, 7-и та 28-и днів тверднення в нормальних умовах. Обрання саме таких термінів тверднення пов'язане з урахуванням технологічних процесів виготовлення розчинових сумішей як для широкої номенклатури збірних залізобетонних виробів так і для монолітного застосування. Визначення міцності при стиску будівельного розчину у ранньому віці (2-х та 7-и днів) говорить на користь застосованої технології пов'язаної з активацією в'язучого в роторних протитечийних млинах. Це підтверджується також результатами досліджень, які наведені в п.4.1 дисертації.

Експериментально - статистичні моделі, які відображають вплив варійованих факторів складу на міцність при стиску будівельного розчину мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 R_{\text{ст}}^{\text{M.2}} = & 36,3 + 7,9X_1 - 4,6X_1^2 + 0,3X_1X_2 + 0,2X_1X_3 \\
 & + 4,7X_2 - 0,6X_2^2 + 0,5X_2X_3 \\
 & + 2,2X_3 - 0,2X_3^2
 \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned}
 R_{\text{ст}}^{\text{M.7}} = & 43,1 + 9,6X_1 - 5,1X_1^2 - 0,1X_1X_2 + 0,3X_1X_3 \\
 & + 5,0X_2 - 1,3X_2^2 + 0,4X_2X_3 \\
 & + 2,4X_3 - 1,5X_3^2
 \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned}
 R_{\text{CT}}^{\text{M.28}} = & 51,2 + 12,0X_1 - 6,6X_1^2 - 0,5X_1X_2 + 0,6X_1X_3 \\
 & + 5,5X_2 - 0,8X_2^2 + 0,6X_2X_3 \\
 & + 3,1X_3 - 1,0X_3^2
 \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned}
 R_{\text{CT}}^{\text{K.2}} = & 22,1 + 7,7X_1 - 1,7X_1^2 + 1,4X_1X_2 + 0,2X_1X_3 \\
 & + 4,4X_2 + 0,8X_2^2 \\
 & + 1,4X_3 + 0,3X_3^2
 \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned}
 R_{\text{CT}}^{\text{K.7}} = & 31,1 + 9,2X_1 - 3,0X_1^2 + 0,3X_1X_2 + 0,7X_1X_3 \\
 & + 4,3X_2 + 0,7X_2X_3 \\
 & + 1,8X_3 - 0,1X_3^2
 \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned}
 R_{\text{CT}}^{\text{K.28}} = & 40,3 + 10,6X_1 - 4,8X_1^2 - 0,6X_1X_2 + 0,5X_1X_3 \\
 & + 4,4X_2 + 0,4X_2^2 + 0,7X_2X_3 \\
 & + 2,3X_3 + 0,1X_3^2
 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Примітка: $R_{\text{CT}}^{\text{M.2}}$, $R_{\text{CT}}^{\text{M.7}}$, $R_{\text{CT}}^{\text{M.28}}$ – міцність будівельного розчину на механоактивованому змішаному в'язучому; $R_{\text{CT}}^{\text{K.2}}$, $R_{\text{CT}}^{\text{K.7}}$, $R_{\text{CT}}^{\text{K.28}}$ – контроль

Аналіз математичних моделей (4.1-4.6) свідчать про те, що згідно величин коефіцієнтів при варійованих факторах як на механоактивованому в'язучому так і на в'язучому, яке механоактивації не підлягало, найбільший вплив на міцність при стиску будівельного розчину для всього досліджуваного періоду тверднення надає вміст змішаного в'язучого в ньому. Яскравим підтвердженням впливу витрати змішаного в'язучого на міцність будівельного розчину є експериментальні дані, які графічно

відображені на рис.4.2...4.4. Так, наприклад, для будівельного розчину в 2-х добовому віці (в складі якого відсутні суперпластифікатор С-3 і

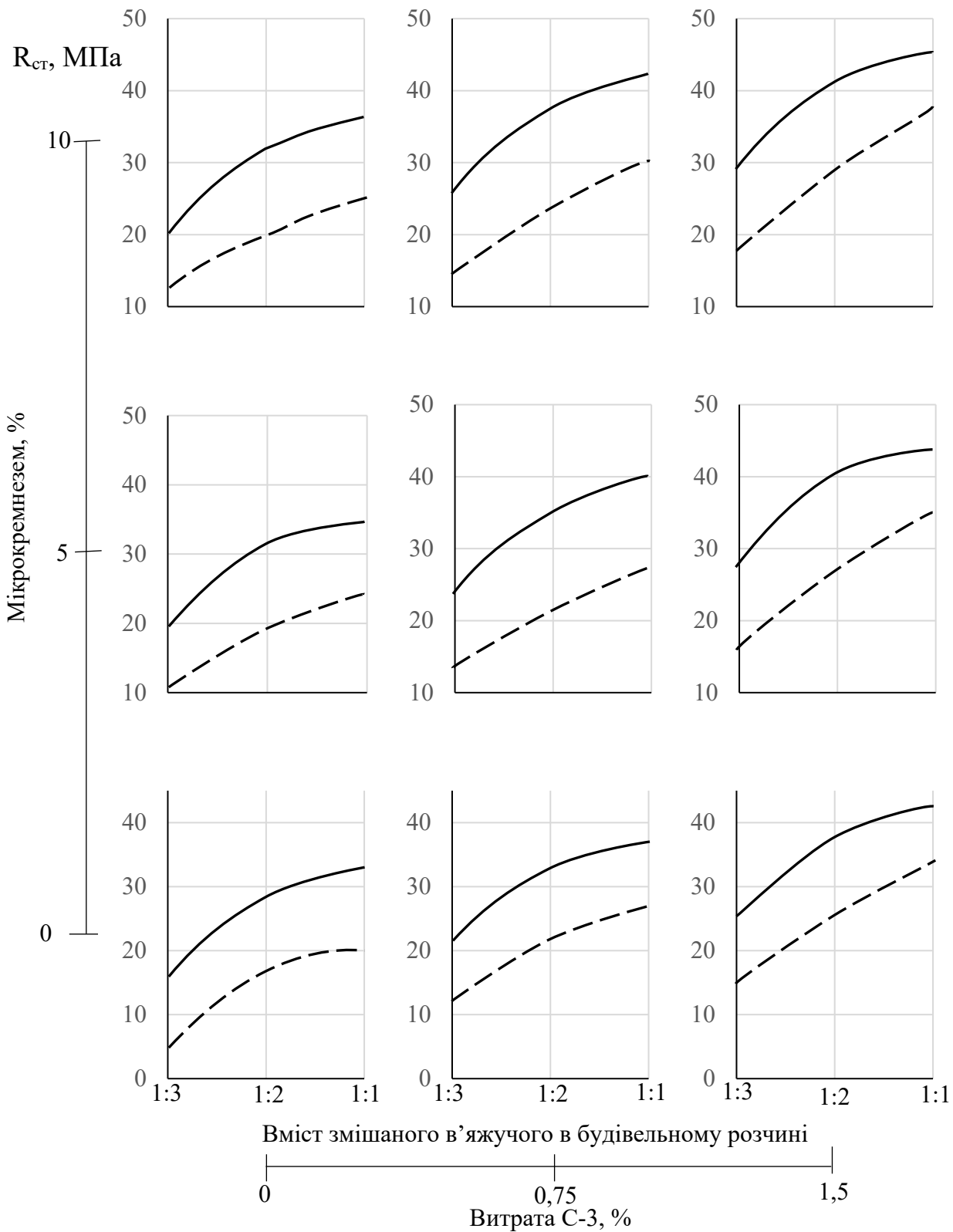


Рис.4.2 Вплив вмісту змішаного в'язучого на міцність при стиску будівельного розчину в 2-х денному віці:

- - розчин на механоактивованому змішаному в'язучому;
- - - - - контроль

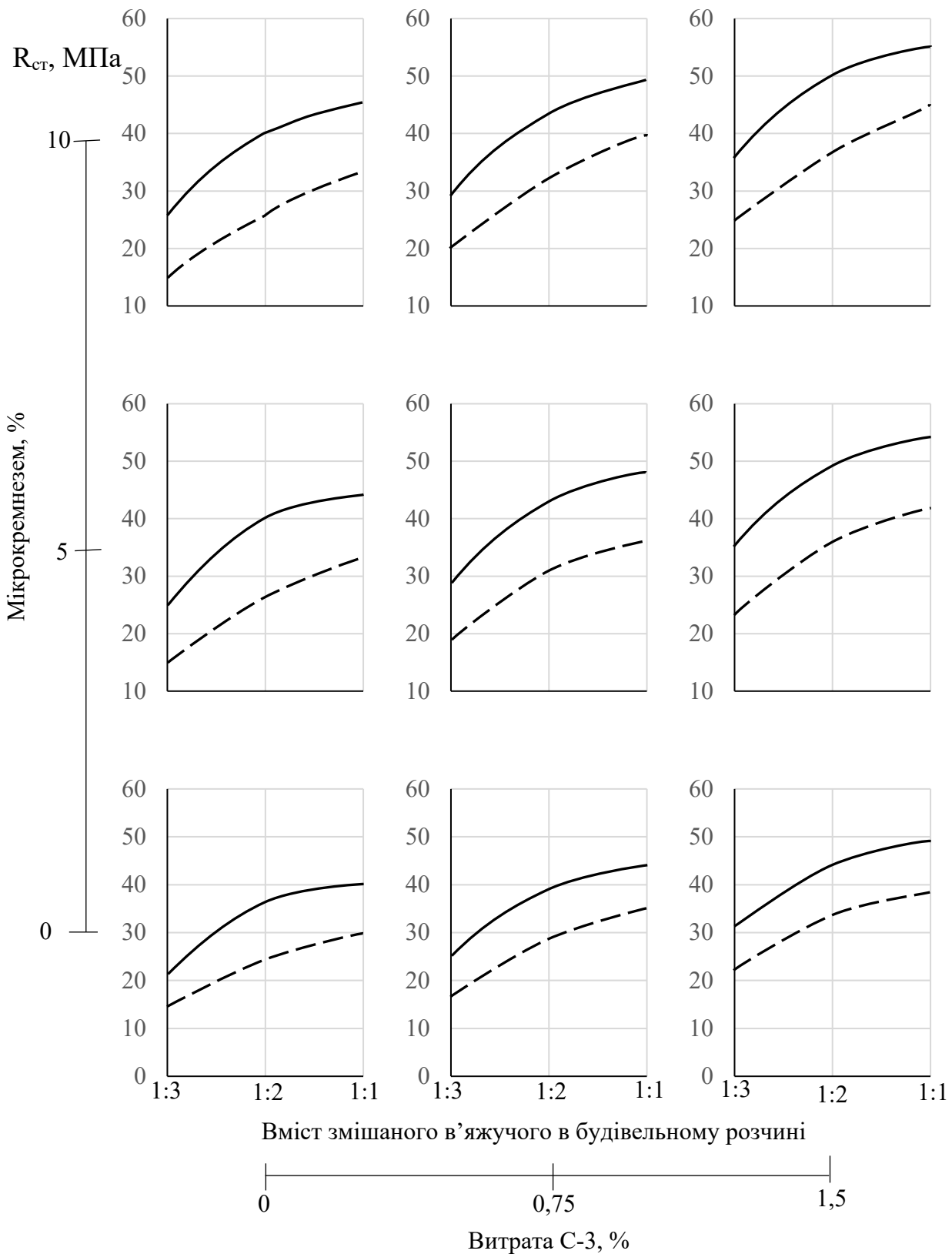


Рис.4.3 Вплив вмісту змішаного в'язучого на міцність при стиску будівельного розчину в 7-х денному віці:

- - розчин на механоактивованому змішаному в'язучому;
- - - - - контроль

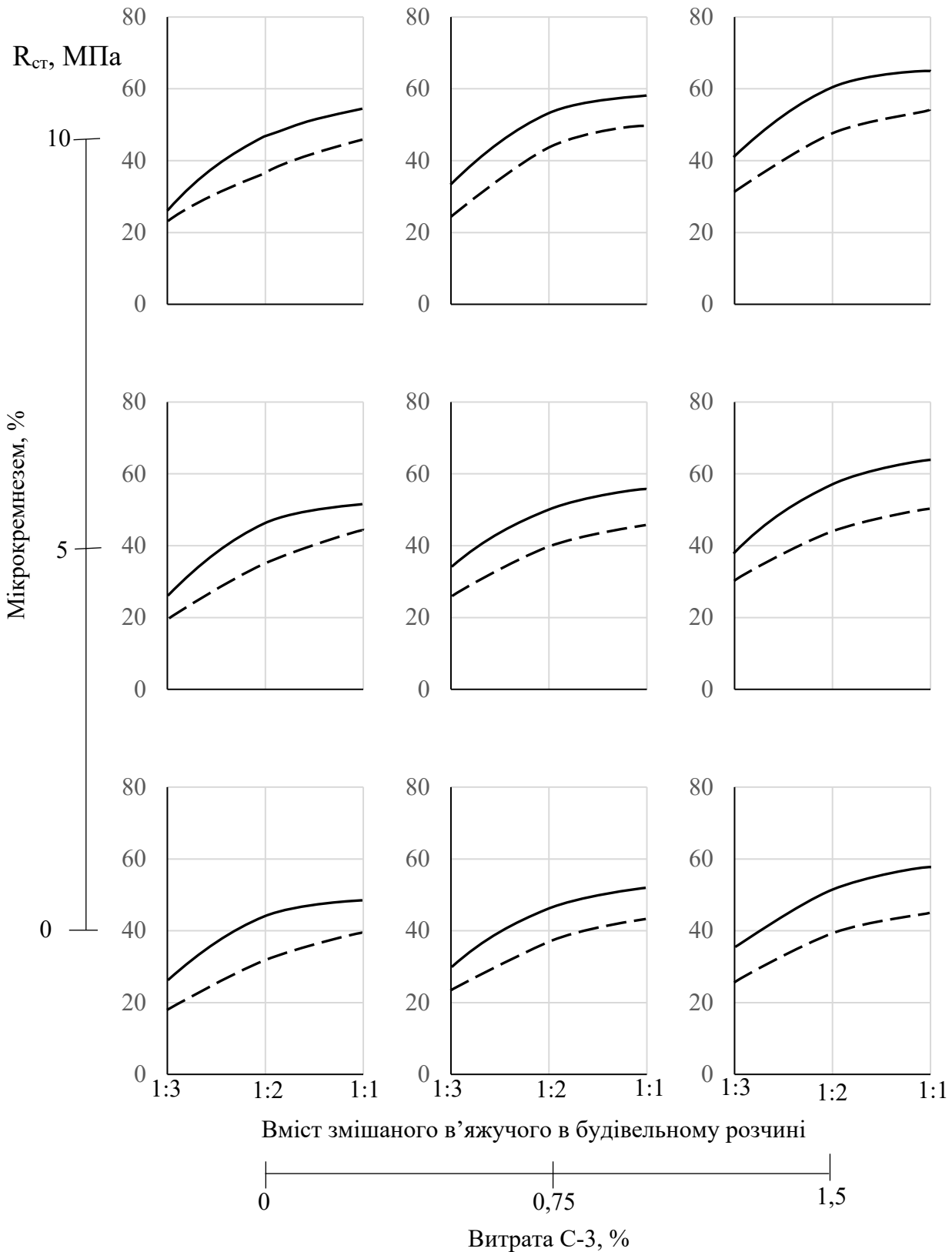


Рис.4.4 Вплив вмісту змішаного в'язучого на міцність при стиску будівельного розчину в 28-и денному віці:

- - розчин на механоактивованому змішаному в'язучому;
- - - - - контроль

мікрокремнезем), рис.4.2, зростання кількості змішаного активованого в'язучого від -1 до +1 (реальна витрата в'язучого від 440 кг/м³ до 850 кг/м³) викликає зростання міцності будівельного розчину з 17 МПа до 32 МПа, тобто майже на 90 %.

Для будівельного розчину в 7-и добовому віці, рис.4.3., зростання витрати активованого змішаного в'язучого від 440 до 850 кг/м³ (фактори X_2 і X_3 знаходяться на рівні -1) забезпечує зростання міцності розчину з 21 МПа до 40 МПа. В марочному віці зростання витрати змішаного цементу в тій же кількості викликає зростання міцності будівельного розчину від 27 МПа до 43 МПа, тобто майже на 60 %. Слід відмітити також позитивний вплив добавки мікрокремнезему на зростання міцності при стиску будівельного розчину. Так, для будівельного розчину в 2-х добовому віці, введення до його складу 5 % мікрокремнезему ($X_1 = -1$; $X_2 = -1$) приводе до підвищення його міцності з 17 до 19 МПа, тобто майже на 12%. Зростання добавки мікрокремнезему до 10% забезпечує одержання розчину з міцністю при стиску 20 МПа.

Для будівельного розчину в 2-х добовому віці на в'язучому, яке не піддавалося механоактивації, рис. 4.2, зростання кількості в'язучого від -1 до +1 (реальна витрата в'язучого від 440 кг/м³ до 850 кг/м³) викликає зростання міцності будівельного розчину з 6 МПа до 20 МПа. (фактори X_2 і X_3 знаходяться також на рівні -1). В марочному віці зростання витрати в'язучого від 440 кг/м³ до 850 кг/м³ (фактори X_2 і X_3 знаходяться також на рівні -1) викликає зростання міцності будівельного розчину з 19 МПа до 40 МПа. Введення в будівельний розчин (склад 1:3) 10 % мікрокремнезему забезпечує зростання міцності розчину в 28-и добовому віці з 19 МПа до 21 МПа. Таким чином можливо відмітити, що тільки за рахунок корегування технологією, витратою змішаного цементу та мікрокремнезему можливо корегувати міцністю будівельного розчину при стиску в марочному віці в діапазоні від 19 МПа до 52 МПа, рис. 4.4.

Введення до складу розчинової суміші суперпластифікатору С-3 приведе до зниження витрати води замішування. Підтвердженням вищесказаного є експериментальні данні, які наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Витрата води замішування в залежності від складу розчинової суміші

Склад будівельного розчину	Витрата С-3 (сухого), %/г			Ø розпливу конусу суміші, мм
	0	0,75	1,5	
	0	1,5	3,0	
250 г змішаного в'язучого + 750 г кварцового піску 1:3	130	110	100	130
334 г змішаного в'язучого + 667 г кварцового піску 1:2	138	115	108	130
500 г змішаного в'язучого + 500 г кварцового піску 1:1	155	143	131	130

Графічне відображення витрати води замішування в залежності від кількості суперпластифікатору С-3 в суміші наведено на рис.4.5.

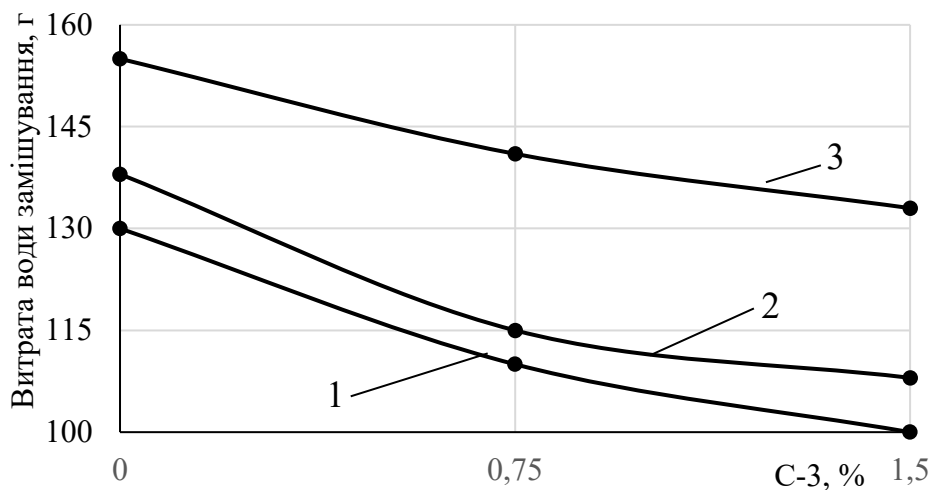


Рис.4.5 Вплив витрати суперпластифікатору на водовміст розчинової суміші з діаметром розпливу конуса 130 мм: 1, 2, 3 – склад розчину 1:3; 1:2; 1:1 відповідно

Аналіз експериментальних даних свідчить про те, що на кількість води замішування розчинової суміші заданого розпливу ($\phi=130$ мм), крім впливу

витрати механоактивованого змішаного в'язучого надає також витрата суперпластифікатору С-3.

Аналіз експериментальних даних, наведених на рис. 4.5 свідчить про те, що зростання концентрації С-3 від 0 до 1,5 % (від маси цементу в змішаному в'язучому) викликає зниження витрати води замішування (при умові одержання сумішей з рівною рухливістю) в середньому на 20..30 % (в залежності від складу розчинової суміші). Зниження витрати води замішування позитивно впливає на зростання міцності будівельного розчину.

Підтвердженням цьому є графічні залежності, які наведені на рис.4.6-4.8. Так, для будівельного розчину складу 1:3 в 2-х добовому віці, рис.4.6., зростання витрати суперпластифікатору С-3 від 0 до 1,5 % (діапазон від -1 до +1) викликає зростання міцності будівельного розчину при стиску з 19 МПа до 28 МПа. Для будівельного розчину (склад 1:2) зростання витрати С-3 від -1 до +1 приведе до підвищення міцності розчину з 29 МПа до 38 МПа, тобто більше ніж на 30 %. Для будівельного розчину (склад 1:1) зростання концентрації суперпластифікатора від 0 до 1,5 % забезпечує зростання його міцності при стиску з 35 МПа до 43 МПа, тобто майже на 23 %. Зростання міцності будівельного розчину з підвищенням концентрації С-3 в ньому спостерігається також і для розчину в 7-и добовому віці, рис.4.7. Так, в розчині (склад 1:3) підвищення вмісту С-3 від 0 до 1,5 % сприяє підвищенню міцності розчину з 21 МПа до 31 МПа, тобто майже на 45 %. Для складу будівельного розчину 1:1 зростання міцності не є настільки значним і не перевищує 25 %. Позитивний вплив суперпластифікатора на міцність спостерігається також і для будівельного розчину у віці 28 днів, рис.4.8. Експериментальні результати свідчать про те, що зростання міцності розчину складу 1:3 досягає 40 % при підвищенні концентрації С-3 від 0 до 1,5 %. Для розчину складу 1:1 підвищення концентрації С-3 від 0 до 1,5 % забезпечує зростання міцності каменю з 48 МПа до 57 МПа, тобто більше ніж на 18 %.

Аналогічний вплив на міцність будівельного розчину надає суперпластифікатор С-3 також і у випадку застосування мікрокремнезему

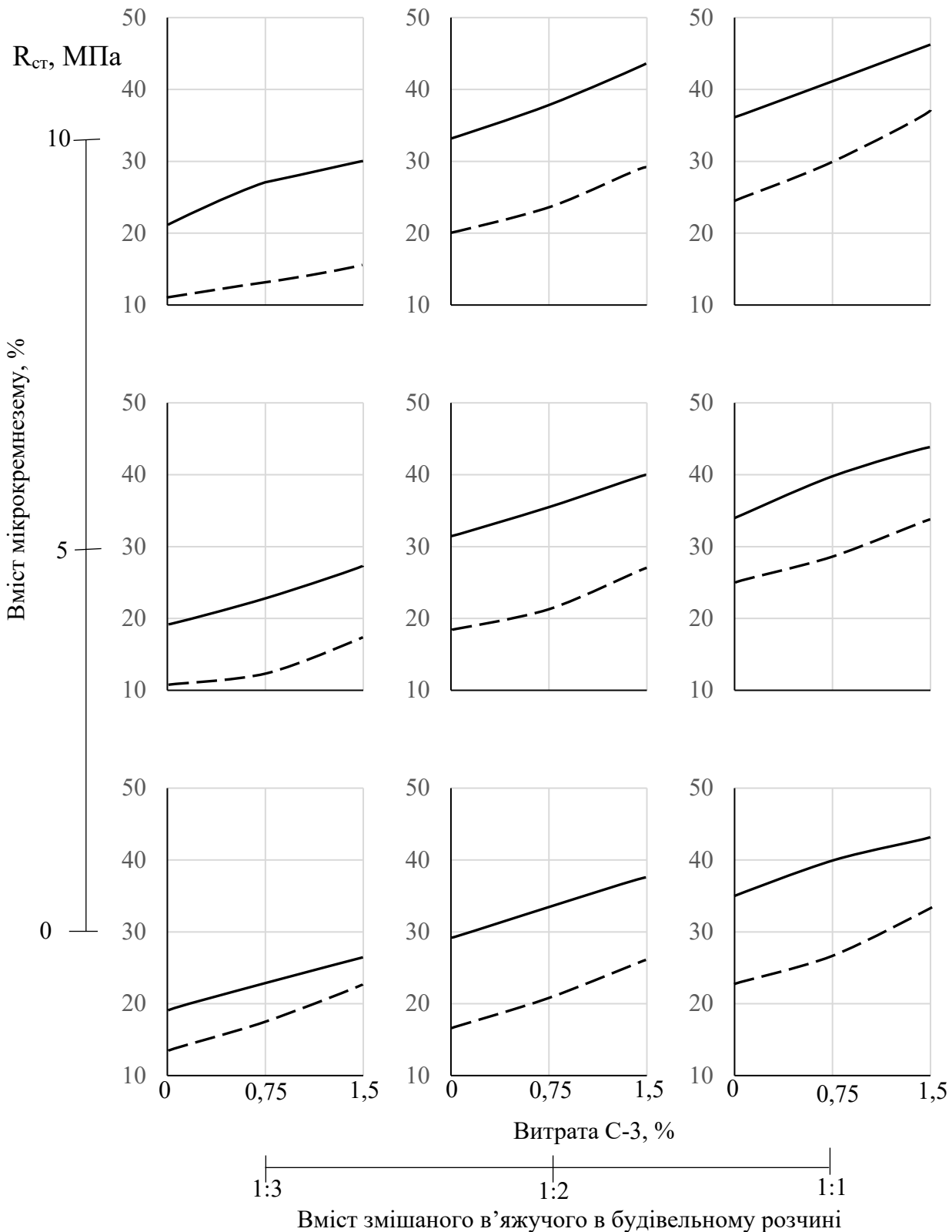


Рис.4.6 Вплив витрати суперпластифікатора С-3 на міцність при стиску будівельного розчину в 2-х денному віці:

- - розчин на механоактивованому в'язучому;
- - - - - контроль

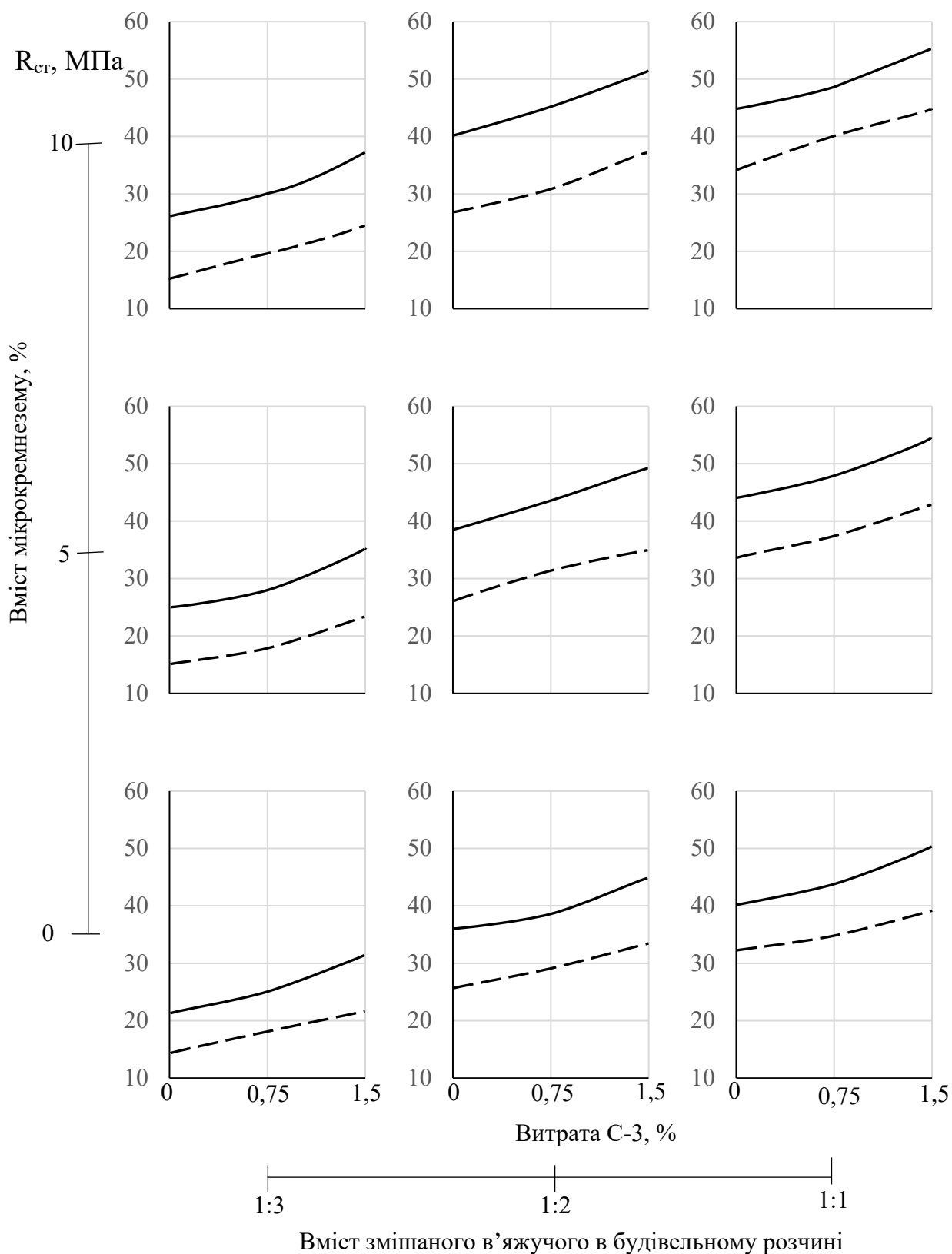


Рис.4.7 Вплив витрати суперпластифікатора С-3 на міцність при стиску будівельного розчину в 7-х денному віці:

- - розчин на механоактивованому в'язучому;
- - - - - контроль

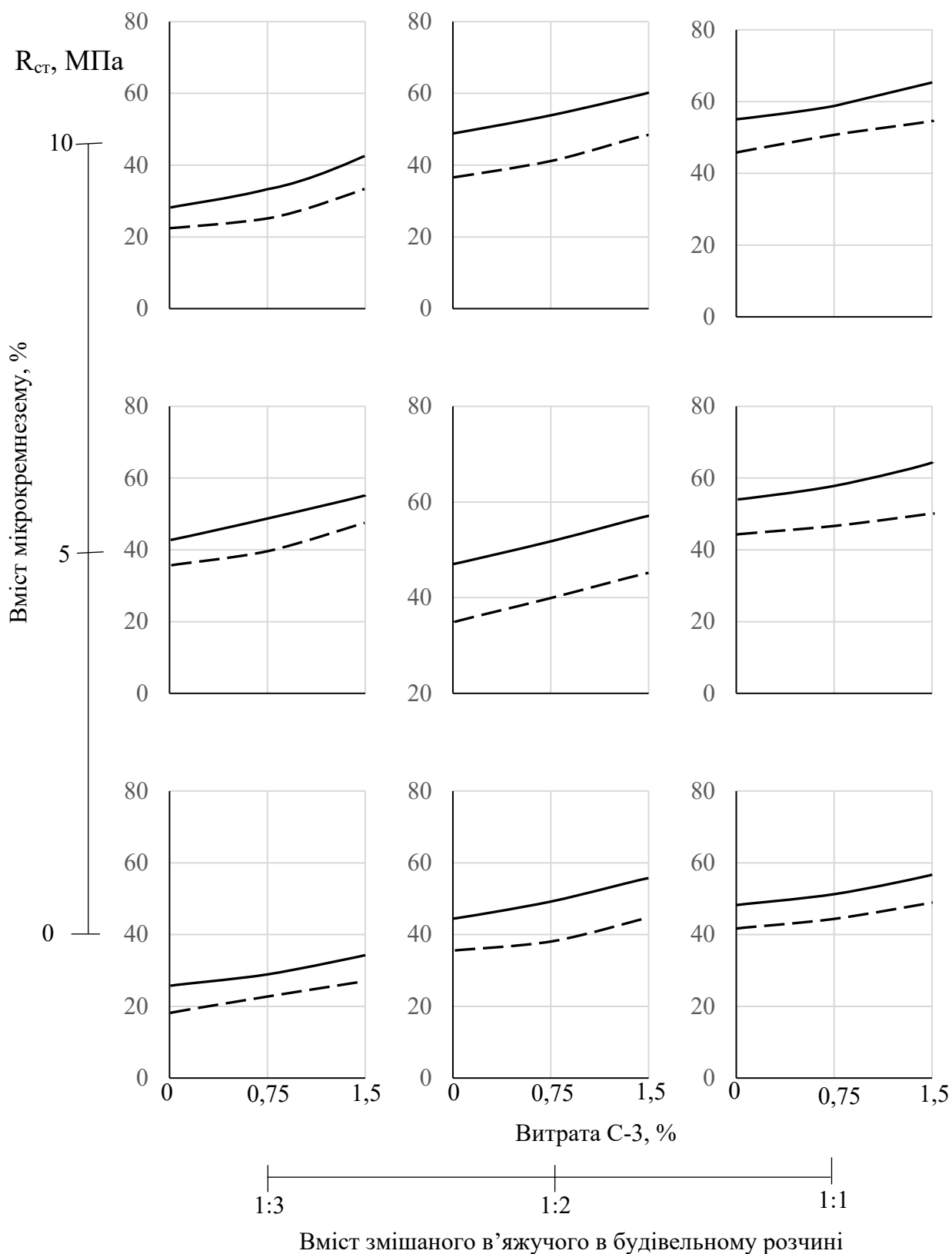
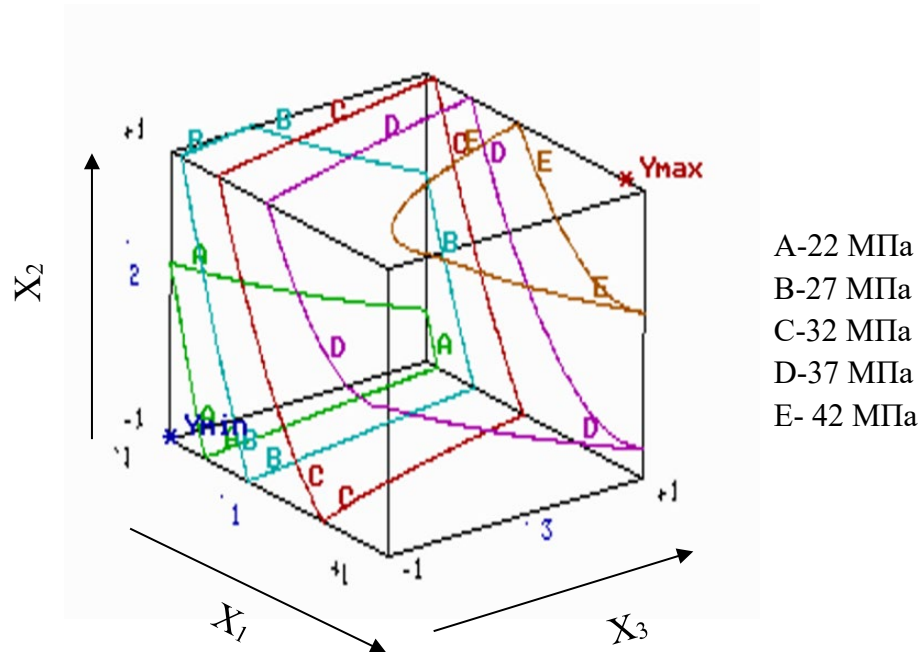


Рис.4.8 Вплив витрати суперпластифікатора С-3 на міцність при стиску будівельного розчину в 28-и денному віці:

- - розчин на механоактивованому в'язучому;
- - - - - контроль

для других досліджуваних відношень в'язучого до кварцового піску.

а)



б)

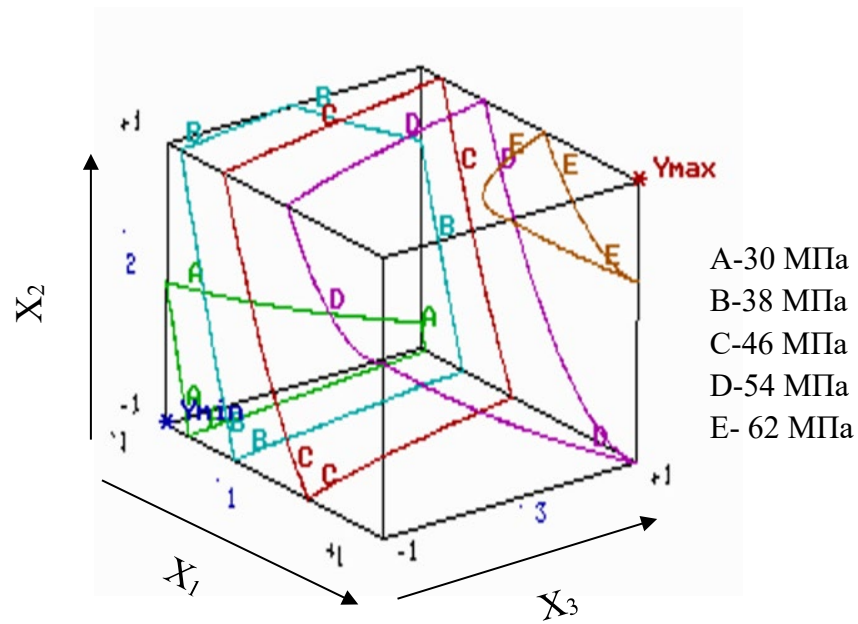
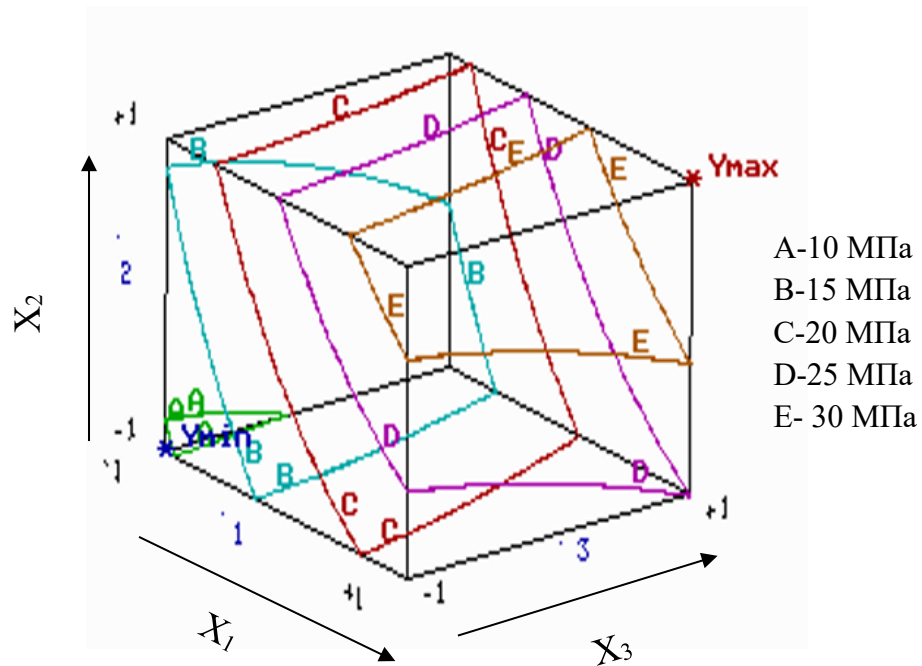


Рис.4.9. Вплив цементне-піщаного відношення (X_1), суперпластифікатора С-3 (X_2) і мікрокремнезему (X_3) на міцність будівельного розчину при стиску на механоактивованому змішаному в'язучому:

а) – у 2-х добовому віці; б) – у 28 -и добовому віці

а)



б)

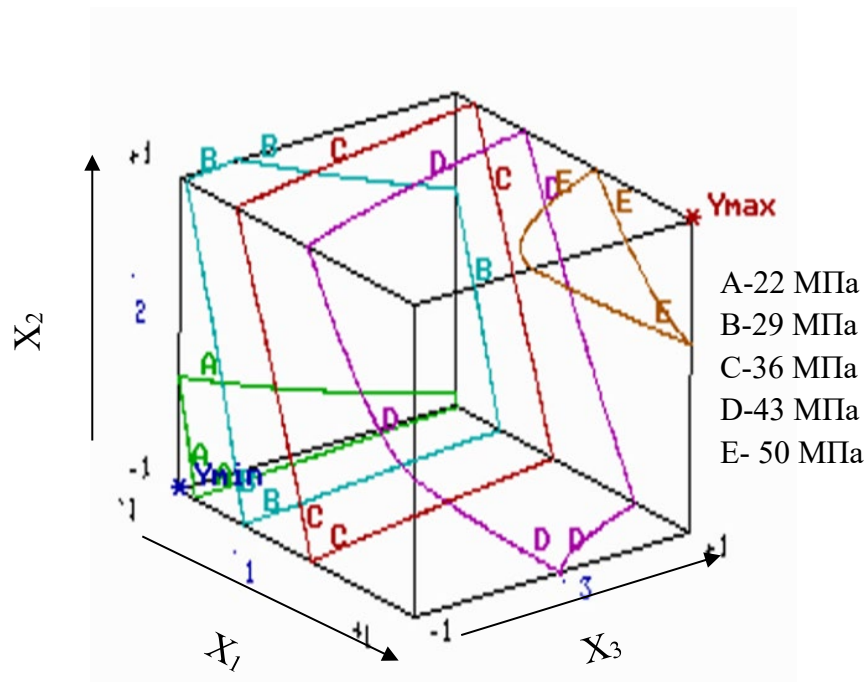


Рис.4.10. Вплив цементне-піщаного відношення (X_1), суперпластифікатору С-3 (X_2) і мікрокремнезему (X_3) на міцність будівельного розчину при стиску на в'язучому, яке не підлягало маханоактивації (контроль)
 а) – у 2-х добовому віці; б) – у 28-и добовому віці

Підтвердженням цьому є приведені на рис.4.9 та 4.10 діаграми у

вигляді кубів, які свідчать про те, що сумісний вплив факторів X_1 , X_2 та X_3 надає значний вплив на зростання міцності при стиску будівельного розчину як у 2-х добовому так і в 28-и добовому віці.

Висновки за 4-м розділом

1. Сумісна активація портландцементу (80 %) та кварцового піску (20 %) протягом 300 сек сприяє підвищенню міцності цементного каменю в 28-и добовому віці (в порівнянні з міцністю цементного каменю в аналогічному віці на бездобавочному портландцементі, який механоактивації не підлягав) в середньому на 30...32 %.

2. Аналіз математичних моделей свідчить про те, що згідно величин коефіцієнтів при варійованих факторах найбільший вплив на міцність при стиску будівельного розчину у 2-х, 7-и та 28-и добовому віці надає вміст в ньому змішаного в'язучого. Зростання його вмісту від 440 до 850 кг/м³ викликає зростання міцності при стиску розчину на 60...62 % . Наступним за впливом на міцність розчину є витрата суперпластифікатору С-3. Зростання його кількості в розчиновій суміші (від 0 до 1,5 % маси цементу) сприяє зростанню міцності будівельного розчину на 20...25 %. Мінімальний вплив на міцність будівельного розчину при стиску надає мікрокремнезем. Зростання його кількості від 0 до 10 % маси цементу викликає підвищення міцності розчину на 10...12 %.

3. Найбільший приріст міцності при стиску будівельного розчину за рахунок тільки механоактивації змішаного в'язучого спостерігається в 2-х добовому віці і коливається від 35 % (склад розчину 1:1) до 93 % (склад 1:3). Зростання терміну тверднення розчину нівелює підвищення міцності при стиску від механоактивації, але і в 28-и добовому віці будівельний розчин на механоактивованому в'язучому на 22...35 % перевищує міцність при стиску розчину, змішане в'язуче якого механоактивації не підлягало.

4. Сумісний вплив механоактивації змішаного в'язучого в присутності суперпластифікатору С-3 (1,5 %) та мікрокремнезему (10 %) приводе до підвищення міцності при стиску будівельного розчину в марочному віці в порівнянні з контролем (будівельний розчин на немеханоактивованому в'язучому с тим же цементно-піщаним відношенням, без добавки С-3 та мікрокремнезему) в середньому на 60 %.

РОЗДІЛ 5. МЕХАНОХІМІЧНА АКТИВАЦІЯ ЗМІШАНОГО ЦЕМЕНТУ І ЇЇ ВПЛИВ НА МІЦНІСТЬ ПРИ СТИСКУ І СТИРАННІСТЬ БЕТОНУ

Використання в технології виготовлення бетонів мінеральних добавок з метою регулювання їх властивостей та економії в'язучого є одним із найбільш ефективних технологічних прийомів, якій з успіхом застосовується в будівельній практиці. Серед мінеральних добавок природного походження особливе місце займають кварцові піски, які при спільному подрібненні з портландцементом утворюють змішаний цемент. Такий цемент сприяє формуванню більш щільної дрібнопористої структури цементного каменю, підвищенню його водонепроникності та морозостійкості. Покращення властивостей цементного каменю на змішаному в'язучому обумовлено на наш погляд, тим, що частки кварцового піску мають достатню високу міцність, рівномірно розподіляються в процесі активації в'язучого в порожнинах між зернами цементу, виконуючи роль центрів кристалізації. Після завершення процесу гідратації тонкомелені зерна кварцового піску залишаючись в цементному камені, зміцнюють його структуру. Наявність значної кількості центрів кристалізації забезпечує утворення щільної структури наповненого цементного каменю. В технології бетонних сумішей значна увага приділяється як вивченню їх властивостей так і раціональним способам їх виготовлення для отримання бетонів заданої якості.

В практиці приготування бетонних сумішей широке розповсюдження одержали швидкісні змішувачі різних конструкцій, робота яких викликає активацію в'язучого. Перспективним напрямом слід вважати механохімічну активацію портландцементу в трибозмішувачах особливих конструкцій – струйних млинах, які досить ефективно забезпечують зростання поверхневої енергії часток в'язучого. Виходячи з того, що найбільш перспективним напрямом зниження собівартості активації цементу є зниження енергоємності самого процесу тонкого подрібнення, то використання таких агрегатів може розглядатися як безальтернативний спосіб підвищення

активності в'язучого. Як відмічалось в п.4.2. значно ефективною слід рахувати механохімічну активацію змішаного цементу в роторному протитечійному млині. Особливо ефективна активація цементу з добавкою 20 % кварцового піску.

5.1. Планування і реалізація трифакторного експерименту

Представляв інтерес виявити вплив рецептурно-технологічних факторів на міцність при стиску важкого бетону в ранньому (2 доби) та марочному віці (28 діб). Крім міцності при стиску програмою досліджень передбачалося також визначення стиранності бетону в 28-и добовому віці. Для досягнення заданої цілі проводився 3-х факторний експеримент за 15-и точковим симетричним планом, табл.5.1. Для контролю проводився плановий експеримент на портландцементі, який механоактивації не підлягав.

В експериментах варіювалися такі фактори складу:

X_1 – суперпластифікатор С-3 в кількості $0,75 \pm 0,75$ % (від маси цементу в змішаному в'язучому);

X_2 – мікрокремнезем в кількості 5 ± 5 % (від маси цементу в змішаному в'язучому);

X_3 – базальтова фібра в кількості 1 ± 1 % (від маси цементу в змішаному в'язучому)

Кількісні значення факторів X_1 і X_2 (витрата С-3 і мікрокремнезему) збігаються із кількісними значеннями аналогічних факторів на першому етапі досліджень, так як корегування їх вмісту в заданих діапазонах в значній мірі віддзеркалювалося на міцнісних характеристиках затверділого будівельного розчину. Велика вірогідність того, що дані фактори в значній мірі будуть впливати на і механічні характеристики бетону. Дослідження властивостей бетонних сумішей і бетонів на даному етапі роботи проводились на двох аналогічних серіях зразків: першої – з застосуванням механохімічної активації змішаного в'язучого в роторному протитечійному млину протягом 300 сек і другій – за традиційною технологією. Всі досліджені склади

бетонної суміші мали рівну рухливість ($OK=6\pm 1$ см), що відповідає популярній рухливості бетонної суміші, яка широко використовується в будівельній практиці.

Таблиця 5.1.

План експерименту і склади досліджених бетонів (в перерахунку на 6 л бетонної суміші), кг

№ п/п	Рівні факторів			Змішане в'язуче	Кварцовий пісок	Гранітний щебінь фр.5-10 і 10-20мм	Суперпластифікатор С-3	Мікрокремнезем	Базальтова фібра
	X ₁	X ₂	X ₃						
1	-	-	-	2,879	4,140	7,050	0	0	0
2	-	+	-	2,879	4,050	6,900	0	0,240	0
3	0	0	-	2,879	4,098	6,978	0,018	0,120	0
4	+	-	-	2,879	4,140	7,050	0,036	0	0
5	+	+	-	2,879	4,050	6,900	0,036	0,240	0
6	-	0	0	2,879	4,098	6,978	0	0,120	0,024
7	0	-	0	2,879	4,140	7,050	0,018	0	0,024
8	0	0	0	2,879	4,098	6,978	0,018	0,120	0,024
9	0	+	0	2,879	4,050	6,900	0,018	0,240	0,024
10	+	0	0	2,879	4,098	7,098	0,036	0,120	0,024
11	-	-	+	2,879	4,140	7,050	0	0	0,048
12	-	+	+	2,879	4,050	6,900	0	0,240	0,048
13	0	0	+	2,879	4,098	6,978	0,018	0,120	0,048
14	+	-	+	2,879	4,140	7,050	0,036	0	0,048
15	+	+	+	2,879	4,050	6,900	0,036	0,240	0,048

Активований змішаний цемент одержувався внаслідок обробки в протитечійному млині протягом 300 сек суміші портландцементу ПЦ ІІ/А – ІІІ – 500 (80 %) та кварцового піску (20 %). Витрата змішаного в'язучого складала 480 кг/м³ бетону, що відповідала середній витраті в'язучого в промисловому будівництві. План експерименту, а також склади досліджених бетонів (в перерахунку на 6 л бетонної суміші) для обох серій зразків, наведені в табл.5. Показники міцності бетону при стиску наведені в табл. 5.2.

Таблиця 5.2.

План експерименту та міцність бетону при стиску

№ п/п	Рівні варіювання			Відгуки			
	X ₁	X ₂	X ₃	$f_{ск.сиве.к}$, МПа		$f_{ск.сиве.а}$, МПа	
				2 доби	28 діб	2 доби	28 діб
1	-	-	-	24,2	39,5	36,5	50,6
2	-	+	-	26,9	44,2	40,5	57,5
3	0	0	-	28,6	48,5	44,6	65,4
4	+	-	-	33,5	53,6	49,6	68,1
5	+	+	-	37,8	60,0	56,9	74,6
6	-	0	0	25,0	39,5	37,5	51,7
7	0	-	0	28,0	44,2	42,3	60,1
8	0	0	0	29,8	47,7	44,7	62,5
9	0	+	0	32,2	51,0	51,0	66,7
10	+	0	0	35,8	55,9	55,4	71,5
11	-	-	+	25,6	41,4	38,9	52,6
12	-	+	+	27,3	43,1	42,8	59,2
13	0	0	+	30,8	50,	48,7	65,5
14	+	-	+	34,5	53,8	52,8	68,9
15	+	+	+	39,7	61,0	60,4	75,9

Примітка: $f_{ск.сиве.к}$ – міцність при стиску зразків із бетону на немеханоактивованому в'язучому у віці 2-х та 28-и діб тверднення в н.у.;

$f_{ск.сиве.а}$ – міцність при стиску зразків із бетону на механоактивованому в'язучому у віці 2-х та 28-и діб тверднення в н.у.

5.2. Дослідження впливу рецептурно-технологічних факторів на міцність при стиску важкого бетону на змішаному в'язучому

Проведений раніше комплексний аналіз літературних даних показав, що при зіткненні часток твердої фази, в локальній зоні контакту, реалізується

комплекс фізичних, хімічних і механічних процесів, які можуть повністю змінити властивості поверхневого шару тонко дисперсних зерен. Досить часто зіткнення часток в турбулентному потоці приводе до модифікації енергетичного стану їх поверхонь без руйнування. Більш того, на поверхні і в об'ємі часток утворюється сітка мікротріщин, яка викликає зростання їх поверхневої енергії. Модифікація поверхні часток цементу підсилюється наявністю в турбулентному потоці зерен кварцового піску. Таким чином, після механохімічної активації такі цементні композиції відрізняються якісним складом від композицій, які отримані за традиційною технологією. Модифікація поверхні часток в змішаному в'язучому за рахунок їх зіткнень припускає, що незалежно від їх початкового якісного складу (хімічно активні або хімічно інертні), після активації всі частки стають більш хімічно активними. Це дозволяє констатувати, що механоактивація приводе до ліофілізації поверхонь тонкодисперсних часток твердої фази, яка, в свою чергу, веде до зниження поверхневої енергії.

Механоактивований змішаний цемент складається із тонкомелених полімінеральних і мономінеральних зерен цементу та подрібнених зерен кварцового піску різних розмірів. Поверхня зерен змішаного в'язучого покрита сіткою мікротріщин, що припускає зростання площі взаємодії їх та локалізації продуктів новоутворень в районі виходу тріщин на поверхню. Аморфізація поверхневого шару сприяє більш інтенсивному протіканню хімічної взаємодії між зернами цементу і подрібненого кварцового піску.

Як вже зазначалося, міцність при стиску досліджених в обох серіях зразків важкого бетону на механоактивованому змішаному в'язучому, звичайному (немеханоактивованому цементу з добавкою 20% немеленого кварцового піску), визначалася у віці 2-х та 28-и діб тверднення. Це дозволило провести порівняння міцності бетонів аналогічних складів, але приготовлених за різними технологіями: з механоактивацією змішаного в'язучого і традиційною (контроль). Дані про міцність при стиску досліджених бетонів в 15-и експериментальних точках математичного плану

наведені в табл. 5.2. Експериментального – статистичні моделі, які відображають вплив варійованих факторів складу на міцність при стиску бетону у 2 – х добовому віці мають вигляд:

$$f_{\text{ск.сиве.к.2}}(\text{МПа}) = 29,4 + 5,2X_1 + 1,1X_1^2 + 0,6X_1X_2 + 0,1X_1X_3 + 1,7X_2 + 0,3X_2^2 + 0,7X_3 + 0,4X_3^2 \quad (5.1)$$

$$f_{\text{ск.сиве.а.2}}(\text{МПа}) = 45,7 + 7,9X_1 + 0,4X_1^2 + 0,9X_1X_2 + 0,3X_1X_3 + 3,2X_2 + 0,6X_2^2 + 1,6X_3 + 0,6X_3^2 \quad (5.2)$$

Розгляд даних табл.5.2 та математичних моделей (5.1, 5.2) дозволяє зробити висновок про те, що згідно коефіцієнтів при змінних факторах (X_1, X_2, X_3) найбільший вплив на міцність бетону при стиску у 2–х добовому віці як на механоактивованому змішаному в’язучому так і на в’язучому, яке механоактивації не підлягало, надає витрата суперпластифікатору С-3. Зростання витрати С-3 від 0 до 1,5 % викликає підвищення міцності бетону на 40...42 %. В значно меншій мірі на міцність бетону впливає вміст мікрокремнезему в в’язучому. Його наявність підвищує міцність бетону в 2-х добовому віці в середньому на 12...15 %. Ще в меншій мірі на зростання міцності бетону надає витрата базальтової фібри. Зростання вмісту фібри від 0 до 2-х % сприяє підвищенню міцності бетону при стиску на 5...7 %.

Максимальну міцність бетону при стиску $f_{\text{ск.сиве.к.2}} = 39,4$ МПа і $f_{\text{ск.сиве.а.2}} = 60,8$ МПа показують склади в точках з однаковими координатами:

$X_1=+1; X_2=+1; X_3=+1$, тобто при максимальних витратах суперпластифікатору С-3, (1,5 %) , мікрокремнезему (10 %) і базальтової фібри (2 %).

Найменша міцність бетону при стиску $f_{\text{ск.сиве.к.2}} = 24,2$ МПа і $f_{\text{ск.сиве.а.2}} = 35,6$ МПа мають склади з координатами: $X_1 = -1; X_2 = -1; X_3 = -$

0,9 (контроль) і $X_1 = X_2 = X_3 = -1$ (бетон на механоактивованому в'язучому);
рис.5.1.

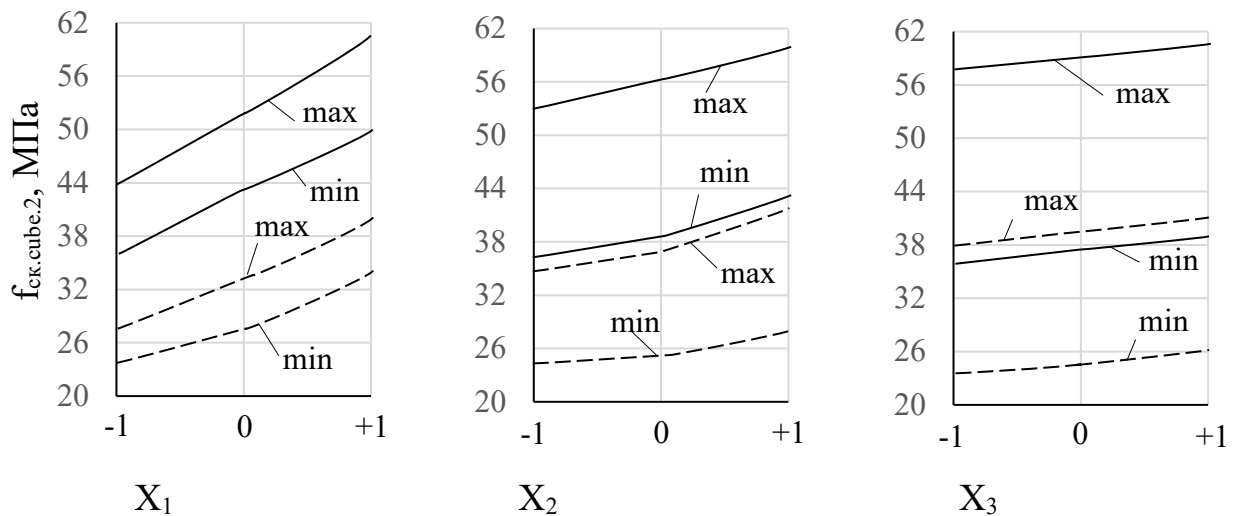


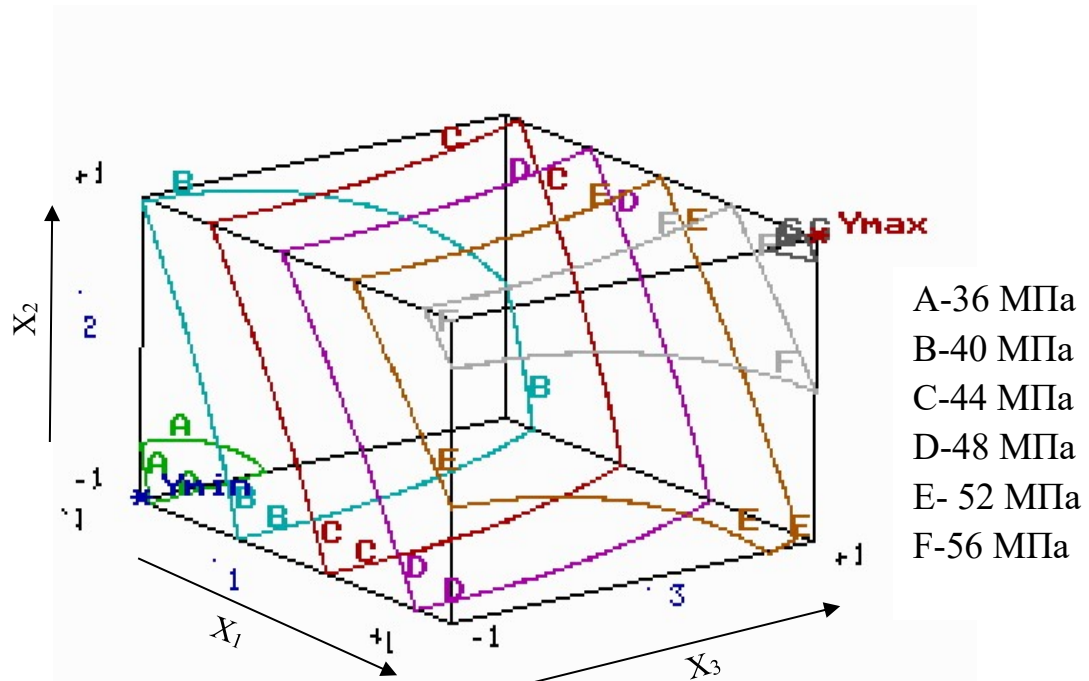
Рис.5.1. Вплив варійованих факторів складу на міцність при стиску досліджених бетонів у 2-х добовому віці в зонах мінімуму і максимуму:

- бетон на змішаному активованому в'язучому;
- бетон на в'язучому, яке механоактивації не підлягало (контроль)

Аналізуючи представлені діаграми можна відзначити пріоритетний вплив на міцність бетону при стиску витрати суперпластифікатору С-3, який, як відзначалося раніше, забезпечує зростання міцності бетону на 40...42 %. Позитивну роль в зміцненні бетону при стиску виконує також мікрокремнезем і базальтова фібра. Введення їх до складу бетонної суміші забезпечує зростання міцності бетону до 20 % (в порівнянні з контролем). Аналізуючи вищесказане слід відмітити, важливу роль механоактивації змішаного цементу. Саме ця технологічна операція в сукупності з рецептурними факторами (витрата С-3, мікрокремнезему і базальтової фібри) забезпечує зростання міцності бетону у 2-х добовому віці більш ніж на 50 %. Саме використання активованих змішаних цементів забезпечує отримання високоміцного і високоякісного бетону. Графічне відображення одночасного

впливу перерахованих варійованих факторів (X_1 , X_2 , X_3) на міцність бетону у 2-х добовому віці, приведено на рис.5.2.

а)



б)

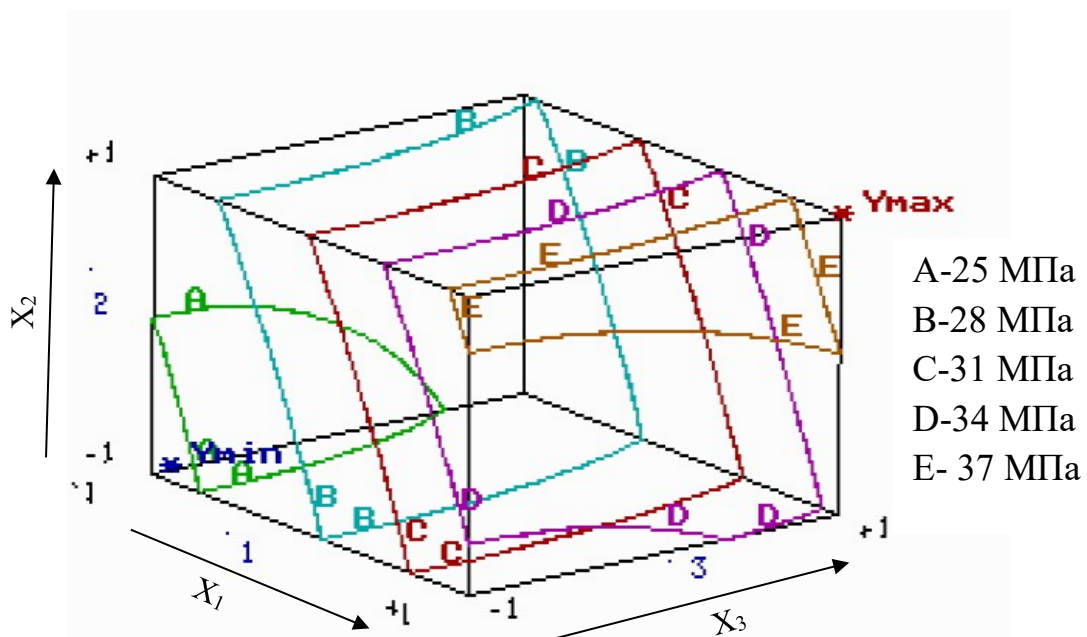


Рис.5.2. Вплив витрат суперпластифікатору С-3 (X_1), мікрокремнезему (X_2) і базальтової фібри (X_3) на міцність при стиску досліджених бетонів у 2-х добовому віці:

- а) бетон на механоактивованому змішаному в'язучому;
- б) бетон, виготовлений за традиційною технологією

Таким чином, важкі бетони з використанням активованого змішаного цементу в поєднанні з суперпластифікатором С-3, мікрокремнезему і базальтової фібри характеризуються досить високою ранньою міцністю при стиску, що дозволяє рекомендувати їх для виготовлення цілого ряду відповідальних збірних і монолітних конструкцій і споруд.

Показники міцності бетону при стиску в 28-и денному віці є одним з основних факторів, який відповідає за якість як збірних так і монолітних залізобетонних конструкцій. Наведені нижче ЕС-математичні моделі описують вплив варійованих факторів складу бетону на величину його міцності при стиску у 28-и добовому віці:

$$\begin{aligned}
 f_{\text{ск.сиве.а.28}} = & 63,2 + 8,3X_1 - 1,8X_1^2 - 0,2X_1X_3 \\
 & + 3,4X_2 \\
 & + 0,6X_3 + 2,1X_3^2
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

$$\begin{aligned}
 f_{\text{ск.сиве.к.28}} = & 47,7 + 7,7X_1 + 0,1X_1^2 + 0,9X_1X_2 + 0,1X_1X_3 \\
 & + 2,7X_2 - 0,1X_2^2 - 0,3X_2X_3 \\
 & + 0,4X_3 + 2,0X_3^2
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

Поля властивостей моделей (5.3) і (5.4) показують максимальну міцність бетону при стиску $f_{\text{ск.сиве.к.28}} = 61$ МПа і $f_{\text{ск.сиве.а.28}} = 76,2$ МПа в точках з однаковими координатами $X_1=X_2=X_3=+1$. Таким чином, експериментальні дослідження свідчать про те, що в марочному віці максимальна міцність бетону при стиску як на механоактивованому змішаному в'язучому так і на в'язучому, яке механоактивації не підлягало, досягається при максимальних значеннях незалежних факторів, а саме: витрата суперпластифікатора С-3 (в перерахунку на суху речовину) – 1,5 % від маси цементу в змішаному в'язучому; витрата мікрокремнезему – 10 % від маси цементу; витрата базальтової фібри – 2 % від маси цементу.

Мінімальне значення міцності бетону при стиску на механоактивованому змішаному в'язучому (49,3 МПа) одержується в точці з координатами:

$X_1=-1$; $X_2=-1$; $X_3=-0,144$. Для бетону на в'язучому, яке не підлягало механоактивації, мінімальне значення міцності при стиску бетону спостерігається в точці з координатами ($X_1 = -1$; $X_2 = -1$; $X_3 = -0,184$) і не перевищує 38,5 МПа.

На однофакторних діаграмах, які побудовані за ЕС-моделями (5.3) і (5.4), відображено вплив варійованих факторів складу бетону на величину його міцності при стиску в 28-и даному віці, рис. 5.3. Всебічний аналіз експериментальних даних (табл.5.2), експериментально-статистичних моделей (5.3) та (5.4) і діаграм на рис.5.3 свідчать про значний вплив механоактивації змішаного цементу на міцність бетонів марочного віку. Зберігається також позитивний вплив на міцність бетону використання суперпластифікатору С-3, мікрокремнезему і базальтової фібри. Сумісний вплив від механоактивації і застосування рецептурних факторів (X_1 , X_2 , X_3) сприяє зростанню міцності бетону при стиску майже вдвічі – з 38,5 МПа до 76,2 МПа. Із рецептурних факторів найбільший вплив на міцність бетону надає витрата суперпластифікатору. Зростання витраті С-3 від 0 до 1,5 % забезпечує підвищення міцності бетону при стиску майже на 30 %. Вплив мікрокремнезему і базальтової фібри не стільки відчутний на підвищенні міцності бетону при стиску і не перевищує(в зоні максимуму) 10...12 %.

Зростання витрати суперпластифікатору С-3 від 0 до 1,5 % (від маси цементу) викликає підвищення міцності бетону як на механоактивованому змішаному цементі, так і на портландцементі, який не підлягав механохімічній активації. Для складів бетону на немеханоактивованому в'язучому зростання міцності при стиску знаходиться при цьому в діапазоні від 43 МПа до 62МПа (фактори X_2 і X_3 знаходяться на рівні +1), тобто майже на 45%. Що стосується вливу концентрації суперпластифікатору на міцність при стиску бетону на змішаному механоактивованому цементі, то слід відмітити також зростання міцності бетону з підвищенням концентрації С-3:

від 59,5 МПа ($X_1=-1$) до 75,6 ($X_1=+1$), тобто майже на 30%. Слід відмітити позитивний ефект зростання міцності бетону від механохімічної активації змішаного в'язучого - підвищення міцності бетону при цьому досягає 22 % (62 МПа контроль; 75,6 МПа - бетон на активованому в змішаному в'язучому).

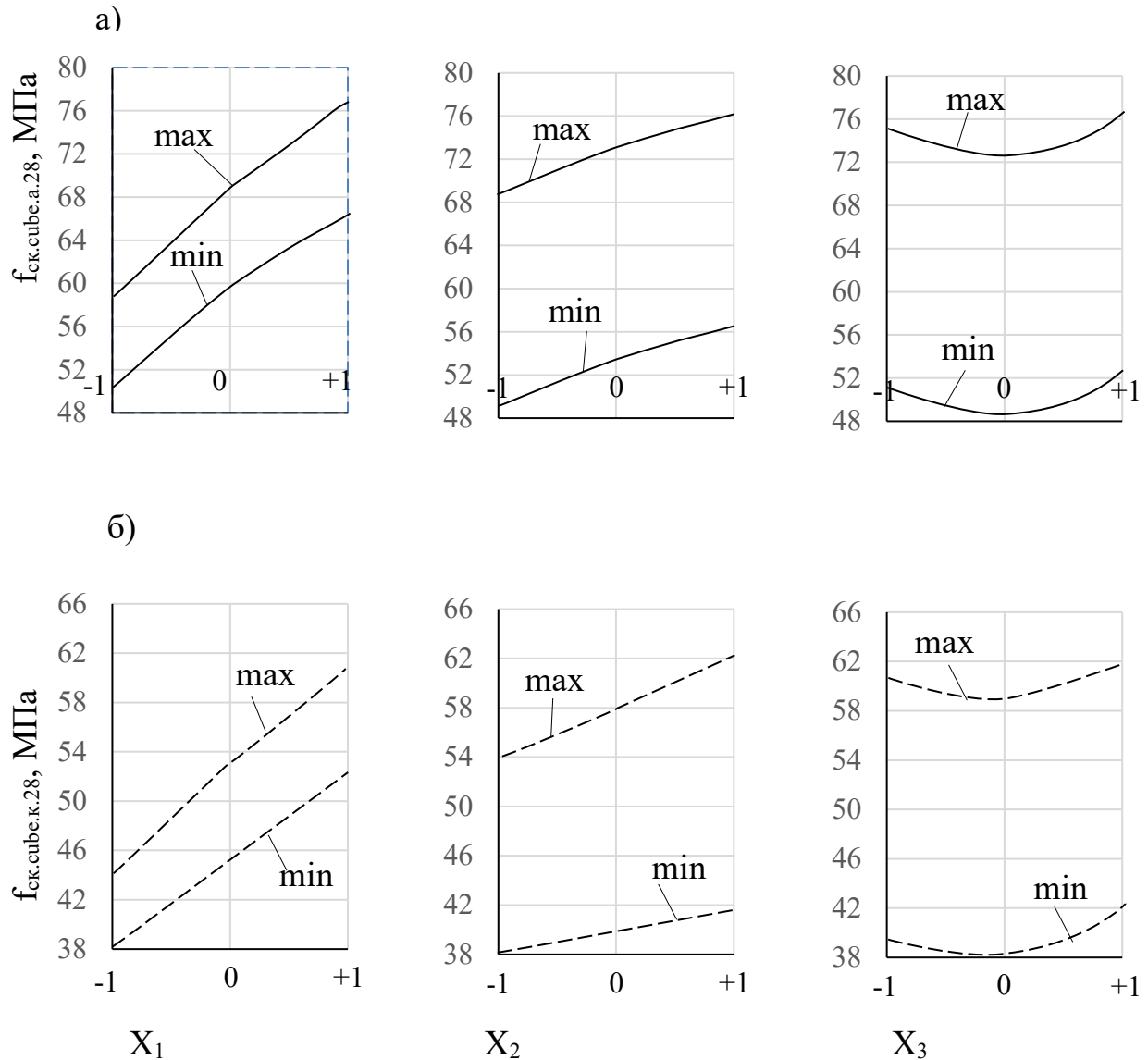
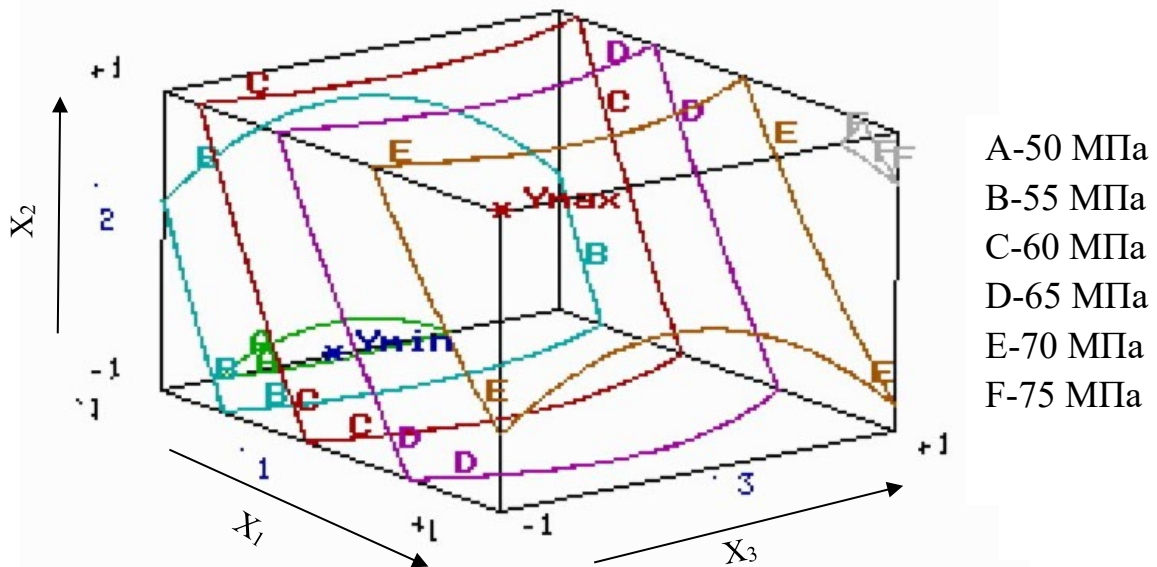


Рис.5.3. Вплив варійованих факторів складу на міцність при стиску бетону у марочному (28-и добовому) віці в зонах максимуму і мінімуму:

- а) бетон на змішаному активованому в'язучому;
- б) контроль (бетон, приготовлений за традиційною технологією)
- ————— бетон на змішаному активованому в'язучому;
- - - - - - - - - - - - бетон на немеханоактивованому змішаному в'язучому

Графічне відображення впливу рецептурно-технологічних факторів (технологія, факторів X_1 , X_2 , X_3) показано на діаграмах у вигляді кубів, побудованих за ЕС – моделями (5.3) і (5.4), рис.5.4.

а)



б)

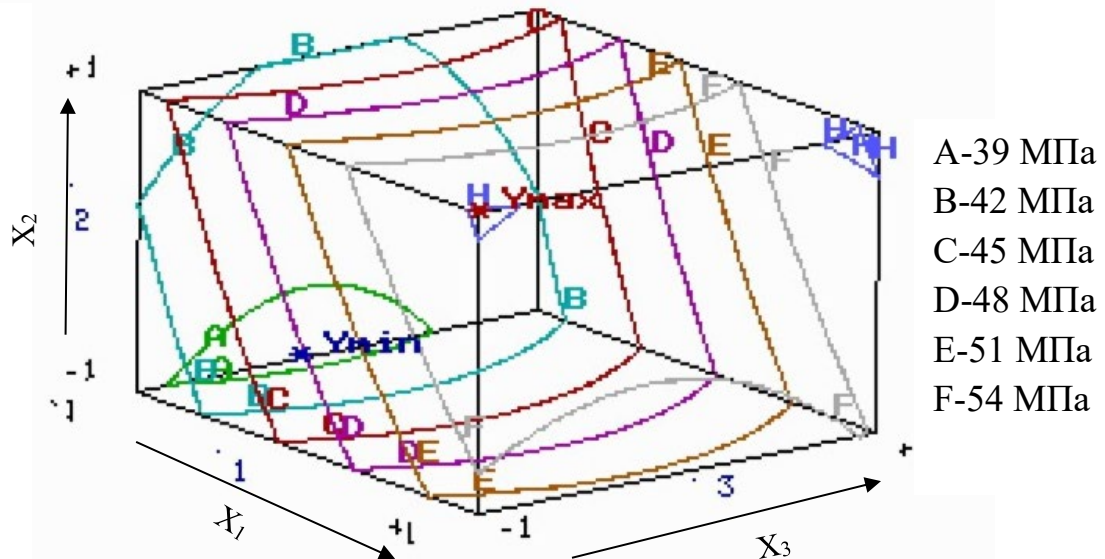


Рис.5.4 Вплив витрати суперпластифікатора С-3 (X_1), мікрокремнезему (X_2) і базальтової фібри (X_3) на міцність при стиску бетонів у 28-и добовому віці:

а – бетон на механоактивованому змішаному в'язучому;

б – контроль (бетон на в'язучому, яке механоактивації не підлягало)

Побудовані діаграми наглядно підтверджують вплив перерахованих факторів варіювання на міцність при стиску бетонів, переконливо підтверджуючи доцільність використання механоактивації змішаного цементу.

5.3. Вплив технології та складу бетону на його стійкість до стирання

Стиранність бетону є одним із показників терміну експлуатації бетонного покриття, яке піддається різноманітним стираючим зусиллям. Цей показник є актуальним при експлуатації автомобільних доріг, велосипедних і пішохідних доріжок, а також підлог в житлових, громадських та виробничих приміщеннях. Такі бетонні покриття піддаються постійному впливу різноманітних навантажень, які супроводжують процес їх експлуатації. Підвищення терміну експлуатації бетонних покриттів при постійному впливі на них ударних навантажень, вібрації, перемінного замерзання та відтаювання, зволоження та висушування є актуальною задачею для фахівців в області технології бетону. Із цілого ряду виробничих заходів, які направлені на підвищення терміну експлуатації бетонних покриттів, значне місце займають технології, пов'язані з використанням фібробетонів. Під фібро бетонами розуміють інноваційний будівельний композиційний матеріал, який за рахунок введення в бетонну суміш поліпропіленових, скляних, стабільних або базальтових мікрочолокон, викликає суттєве покращення стійкості до стирання. В той же час, введення до бетонної суміші фібри приводить до підвищення її водопотреби, що позначається на зниженні міцності бетону при стиску. Негативний вплив підвищеної водопотреби бетонною сумішшю з добавкою фібри на міцність бетону можливо знизити, або і повністю компенсувати за рахунок як технологічних - механохімічна активація змішаного в'язучого, так і за рахунок рецептурних факторів – використання суперпластифікатора С-3, мікрокремнезему та базальтової фібри. Для досягнення поставленої мети був проведений 3-х факторний експеримент, який використовувався для оптимізації складів бетону при

стиску на змішаному в'язучому у віці 28-и діб. Для контролю проводився плановий експеримент на портландцементі, який механоактивації не підлягав. В експерименті варіювалися ті ж фактори складу:

X_1 – суперпластифікатор С-3 в кількості $0,75 \pm 0,75$ % (від маси цементу в змішаному в'язучому);

X_2 – мікрокремнезему в кількості 5 ± 5 % (від маси цементу в змішаному в'язучому);

X_3 – базальтова фібра в кількості 1 ± 1 % (від маси цементу в змішаному в'язучому)

Всі досліджені складові бетонної суміші мали рівну рухливість (ОК = 6 ± 1 см). Витрата змішаного в'язучого складала 480 кг/м^3 бетону. Випробування зразків на колі стирання проводилися на повітряно-сухих зразках, які попередньо витримувалися 48 годин в приміщенні з температурою $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ і вологістю 50...60 %.

План експерименту, а також стиранність досліджених бетонних зразків наведені в табл.5.3.

Експериментально – статистичні математичні моделі, які відображають вплив варійованих факторів складу, а також технології на міцність при стиску важкого бетону, мають вигляд:

$$\begin{aligned} G^{m.28} \cdot 10^{-2} = & 23,8 - 3,4X_1 - 0,8X_1^2 - 0,2X_1 \cdot X_2 + 0,3X_1 \cdot X_3 \\ & - 1,2X_2 + 0,2 \cdot X_2^2 \\ & - 2,0X_3 + 1,2 \cdot X_3^2 \end{aligned} \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} G^{k.28} \cdot 10^{-2} = & 27,5 - 2,7X_1 - 0,8 X_1^2 - 0,2X_1X_2 + 0,5X_1X_3 \\ & - 1,4 X_2 + 0,7 X_2^2 \quad + 0,2 X_1X_3 \\ & - 1,0X_3 - 0,3 X_3^2 \end{aligned} \quad (5.6)$$

Примітка: $G^{m.28} \cdot 10^{-2}$ – стиранність зразків бетону на механоактивованому змішаному в'язучому у віці 28-и діб тверднення в н.у., г/см^2 ;

$G^{k.28} \cdot 10^{-2}$ – стиранність зразків бетону на змішаному в'язучому, яке механоактивації не підлягало, у віці 28-и діб тверднення в н.у., г/см^2 ;

Таблиця 5.3

План експерименту та стиранність бетону

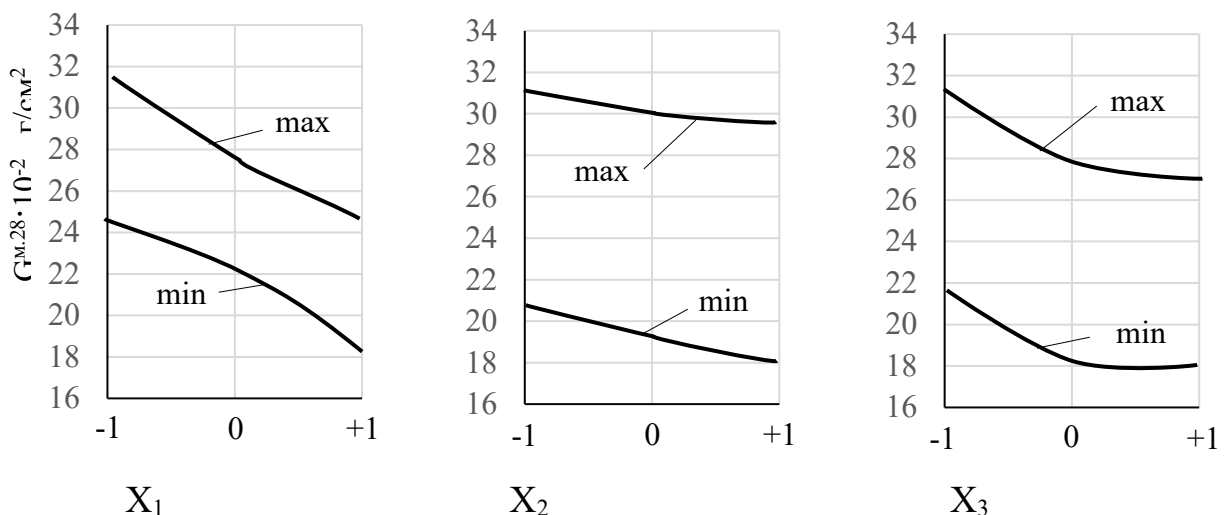
| №
п/п | Фактори | | | Контроль | | | Механоактивація змішаного
в'язучого | | |
|----------|----------------|----------------|----------------|--------------------|-----------------------|-----------------------------------|--|-------------------|---------------------------------------|
| | X ₁ | X ₂ | X ₃ | маса зразків, г | | Стиранність,
г/см ² | маса зразків, г | | Стиран
ність,
г/см ² |
| | | | | до
стира
ння | після
стира
ння | | до
стирання | після
стирання | |
| 1 | - | - | - | 828 | 812 | 0,33 | 831 | 815 | 0,31 |
| 2 | - | + | - | 834 | 819 | 0,30 | 835 | 820 | 0,29 |
| 3 | 0 | 0 | - | 847 | 833 | 0,28 | 850 | 836 | 0,27 |
| 4 | + | - | - | 841 | 827 | 0,27 | 845 | 833 | 0,24 |
| 5 | + | + | - | 829 | 818 | 0,23 | 840 | 829 | 0,22 |
| 6 | - | 0 | 0 | 814 | 799 | 0,30 | 830 | 816 | 0,27 |
| 7 | 0 | - | 0 | 826 | 811 | 0,30 | 832 | 819 | 0,26 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 812 | 798 | 0,28 | 825 | 813 | 0,24 |
| 9 | 0 | + | 0 | 818 | 805 | 0,26 | 827 | 816 | 0,22 |
| 10 | + | 0 | 0 | 828 | 816 | 0,23 | 831 | 821 | 0,19 |
| 11 | - | - | + | 813 | 799 | 0,29 | 818 | 805 | 0,26 |
| 12 | - | + | + | 788 | 775 | 0,27 | 810 | 797 | 0,25 |
| 13 | 0 | 0 | + | 810 | 797 | 0,26 | 815 | 803 | 0,23 |
| 14 | + | - | + | 855 | 843 | 0,25 | 840 | 829 | 0,21 |
| 15 | + | + | + | 847 | 835 | 0,23 | 851 | 842 | 0,18 |

Аналіз математичних моделей (5.5) і (5.6) та даних наведених в табл.5.3 свідчать про те, що згідно величин коефіцієнтів при варійованих факторах як на механоактивованому змішаному в'язучому так і на в'язучому, яке механоактивації не підлягало, визначальний вплив на стиранність бетону марочного віку надає вміст суперпластифікуючої добавки С-3. Зростання

витрат С-3 від 0 до 1,5 % забезпечує зниження величини стиранності бетону на активованому змішаному цементі майже на 40 %. Наступним фактором по величині впливу на зниження стійкості бетону є витрата базальтової фібри. Введення її до складу бетонної суміші в кількості 2 % (від вмісту цементу) забезпечує зниження стиранності (в порівнянні з бетоном без фібри) в середньому на 17...20 %. Наявність мікрокремнезему також позитивно впливає на зниження стиранності бетону. Введення його в кількості 10 % знижує стиранність бетону в середньому на 10...12 %.

Мінімальну стиранність бетону $G^{м.28} \cdot 10^{-2} = 18 \text{ г/см}^2$ і $G^{к.28} \cdot 10^{-2} = 22,7 \text{ г/см}^2$ показують склади в точках з однаковими координатами: $X_1 = +1$; $X_2 = +1$; $X_3 = +1$, тобто при максимальних витратах суперпластифікатору С-3 (1,5 %), мікрокремнезему (10 %) і базальтової фібри (2 %). Найбільшу стиранність бетону $G^{м.28} \cdot 10^{-2} = 31 \text{ г/см}^2$ і $G^{к.28} \cdot 10^{-2} = 33 \text{ г/см}^2$ мають склади бетонної суміші з координатами $X_1 = -1$; $X_2 = -1$; $X_3 = -1$ як на механоактивованому змішаному цементі так і на змішаному цементі, який механоактивації не підлягав, рис.5.5

а)



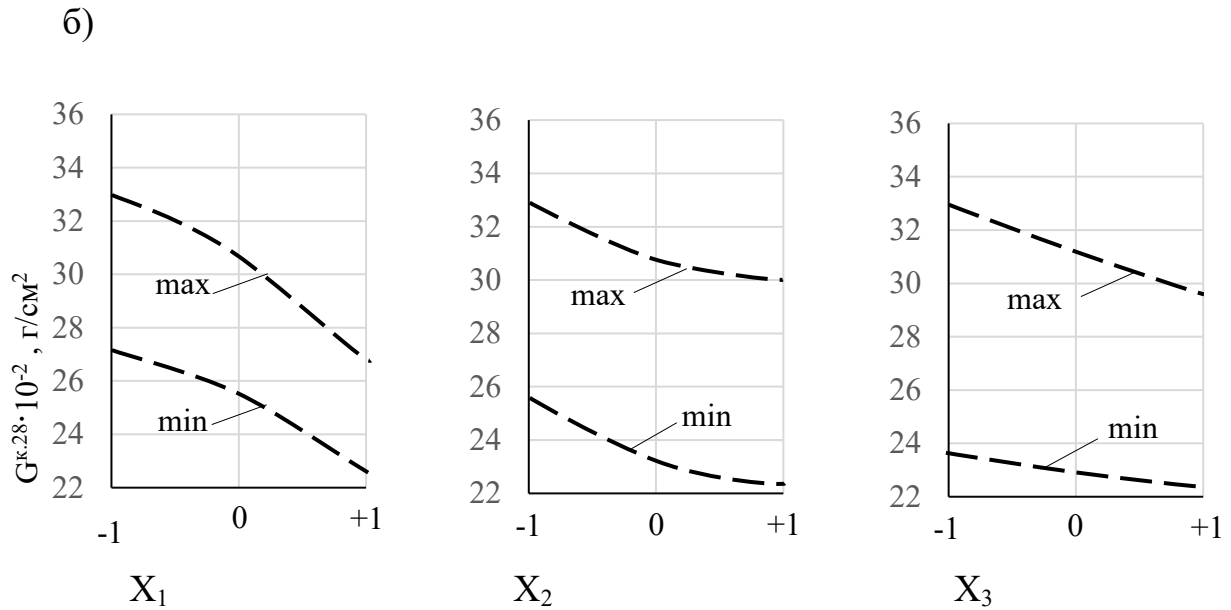
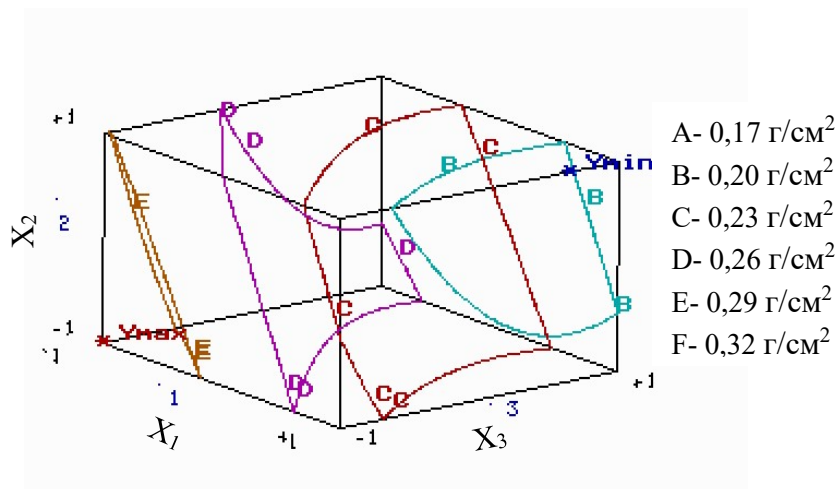


Рис.5.5 Вплив варійованих факторів складу на стиранність бетону у марочному (28-и добовому віці) в зонах максимуму і мінімуму:

- а) ——— - бетон на змішаному активованому цементі;
 б) - - - - контроль (бетон, приготовлений за традиційною технологією)

Графічне відображення одночасного впливу як технології так і рецептурних факторів на стиранність бетону приводиться на діаграмах у вигляді кубів, які побудовані за експериментально-статистичними моделями (5.5) і (5.6)

а)



б)

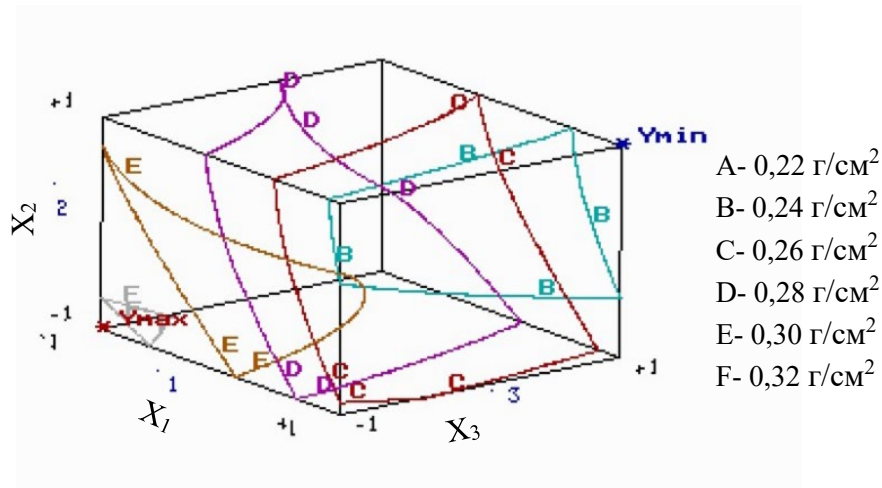


Рис. 5.6. Вплив витрати суперпластифікатору С-3 (X_1), мікрокремнезему (X_2) і базальтової фібри (X_3) на стиранність бетону в 28-и добовому віці:

- а) бетон на механоактивованому змішаному в'язучому;
- б) контроль (бетон на в'язучому, яке механоактивації не підлягало)

Аналіз представлених діаграм свідчить про те, що механоактивація змішаного цементу в значній мірі підвищує зносостійкість бетону, збільшуючи при цьому його експлуатаційну надійність і довговічність.

5.4. Технологічна схема одержання механоактивованого змішаного в'язучого та бетонної суміші на його основі

Підвищення активності мінеральних в'язучих шляхом інтенсивних механічних впливів на них дозволяє вирішувати дві важливі і взаємодоповнюючі задачі, а саме:

- а) підвищити механічні і експлуатаційні властивості бетону;
- б) знизити енерго-і матеріалоємність бетону і виробів із нього

До ефективних методів активації мінеральних в'язучих слід віднести більш тонкий помел, сумісне введення при їх помелі мінеральних добавок і поверхнево-активних речовин з урахуванням попутних продуктів других виробництв, помел в середовищі з регулюємою температурою і хімічним складом та ін. Значна увага приділяється підвищенню хімічної активності мінеральних в'язучих в процесі структуроутворення і тверднення. Для цього

розроблена широка номенклатура хімічних добавок, які дозволяють ефективно регулювати реологічні властивості цементного тіста та бетонної суміші на його основі, періоди формування структури, температуру тверднення та ін.

Видне місце в цьому ряду займають механохімічні способи активації мінеральних в'язучих, використовуючи для цього трібоактиватори різноманітних конструкцій. Видне місце в цьому ряду займає спеціально сконструйований роторний протитечійний млин, принцип дії якого приведено в п. 2.5. дисертації. Слід відмітити, що в процесі активації часткам цементу і кварцового піску в роторному активаторі надаються високі швидкості і складні траєкторії руху. Внаслідок зіткнення часток одна з одною у потоці, а також із стінками та лопастями активатора відбувається фізичне і хімічне диспергування, яке потім дається взнаки на підвищенні ступення змочуваності активуємого матеріалу. Дослідно-промисловий роторний протитечійний млин (розробник асп. Пірогов Д. О.), лабораторна модель якого використана в даних дослідженнях, характеризується технічними параметрами, які наведені в табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Технічні параметри роторного протитечійного млину

| №п/п | Технічні характеристики | Показники |
|------|-------------------------|-----------|
| 1 | Об'єм змішувача, л | 250 |
| 2 | Частота обертів, об/хв | 3000 |
| 3 | Потужність приводу, кВт | 11 |
| 4 | довжина, мм | 800 |
| | ширина, мм | 400 |
| | висота, мм | 1100 |

В роторному протитечійному млині поряд з механохімічною активацією часток цементу і кварцового піску забезпечується їх висока однорідність розподілу в об'ємі суміші.

Запропонована конструкція активатора забезпечує реалізацію в ньому відразу двох технологічних процесів:

а) механохімічну активацію часток цементу і зерен кварцового піску;

б) високу однорідність компонентів змішаного в'язучого. Наявність таких позитивних характеристик активатора дозволяє вирішувати цілий ряд практичних задач, які виникають в технології розчинових і бетонних сумішей, а саме:

- механоактивація різноманітних мінеральних в'язучих з наступним використанням їх в будівельних розчинах і бетонах широкої номенклатури;

- одержання механоактивованих мінеральних в'язучих для ремонтних робіт і захисних покриттів;

- одержання механоактивованих мінеральних в'язучих з поверхнево-активними речовинами самої широкої номенклатури;

- одержання цементних композицій з мінеральними пігментами ;

- використання в процесі активації в'язучих різноманітних мінеральних добавок різної природи, кількості та дисперсності.

Механоактивовані композиції з використанням портландцементу можуть бути застосовані як кінцевий продукт. Зокрема тонкодисперсні композиції можуть бути використані для омоналічування стиків, нанесення захисних покриттів, одержання кольорових фактурних покриттів. Технологічна схема, яка передбачає використання механоактивованої композиції як кінцевого продукту, наведена на рис.5.7.

Механоактивація портландцементу в комплексі з мінеральними добавками різної природи в значній мірі підвищує потенційні можливості як портландцементу так і добавок. Слід відзначити, що конструктивні особливості роторного протитечійного млину дозволяють достатньо легко вмонтувати його в існуючі технологічні лінії по виробництву як розчинових так і бетонних сумішей. Режим роботи протитечійного млину практично не змінює тривалості приготування активованих сумішей.

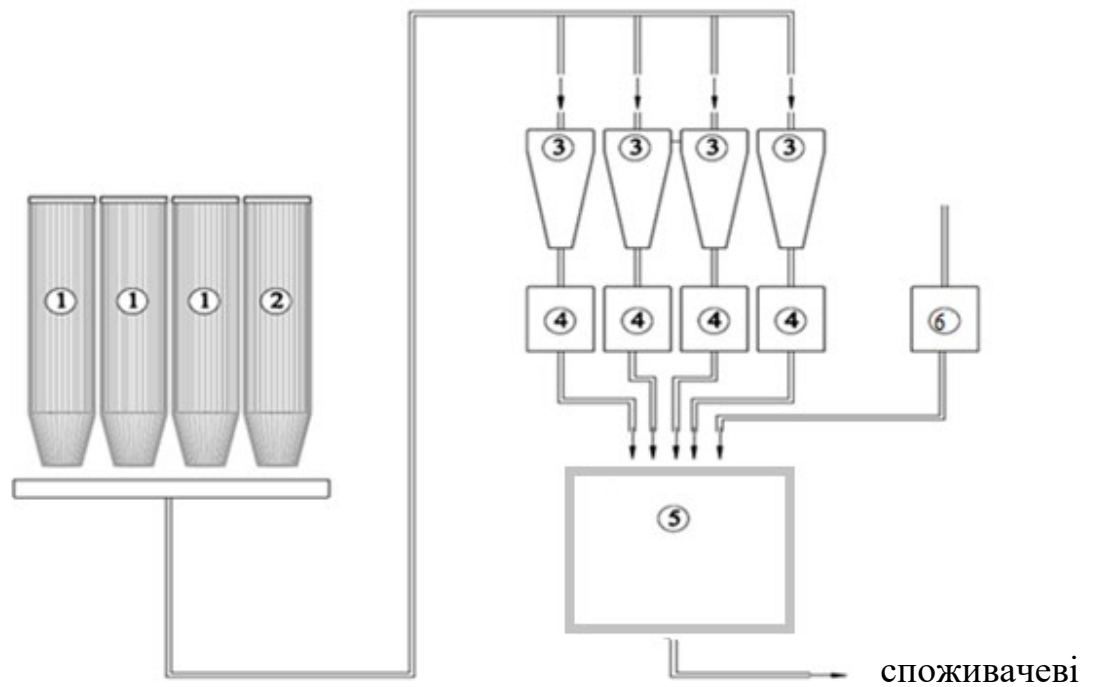


Рис. 5.7 Технологічна схема виробництва механоактивованих цементовміщуючих композицій: 1 - склад цементу; 2 - склад мінеральної добавки; 3 - видаткові бункери; 4 - дозувальне обладнання; 5 - роторний протитечійний млин; 6 - суперпластифікуюча добавка

Механоактивація мінеральних в'язучих з наповнювачами різної природи, включаючи побічні продукти других виробництв, більш повно дозволяє реалізувати потенційні можливості в'язучих в бетонах і будівельних розчинах. Проведенні дослідження дозволяють рекомендувати вводити мінеральні добавки безпосередньо на місцях приготування розчинних і бетонних сумішей. Це дає можливість корегувати кількість мінеральних добавок внаслідок зміни їх питомої поверхні в залежності від комплексу показників якості кінцевого продукту.

На рис. 5.8. приведена технологічна схема по виробництву бетонної суміші на механоактивованому змішаному в'язучому. Універсальність цієї технологічної схеми дає можливість готувати бетонну суміш з використанням різного виду мінеральних добавок та поверхнево-активних речовин.

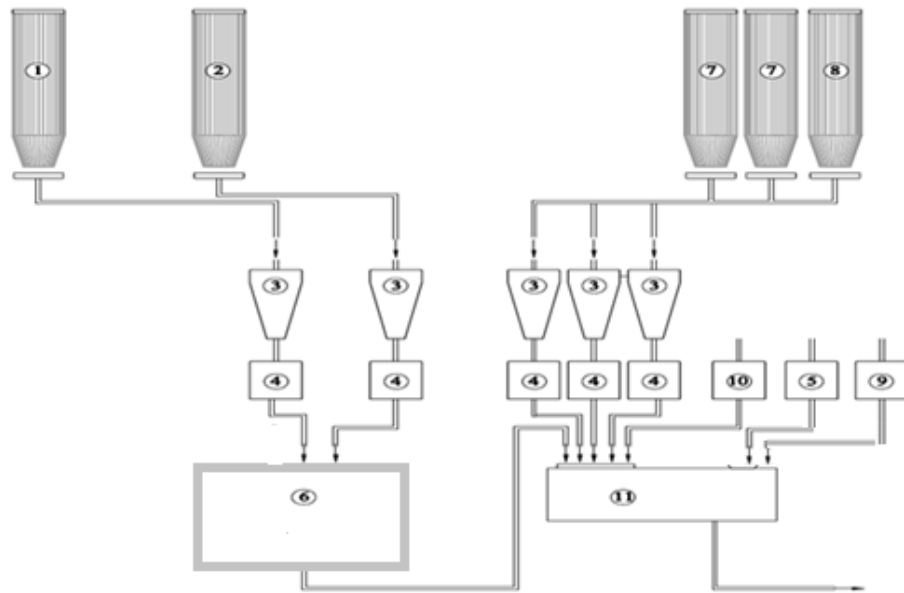


Рис. 5.8 Технологічна схема виробництва бетонної (розчинової) суміші на механоактивованому змішаному в'язучому

Портландцемент (1) і кварцовий пісок (2) із складу поступають на проміжний склад (3), а звідти через вісові дозатори (4) – в роторний протитечійний млин (6), де активуються протягом 300 сек. Гранітний щебінь (6) і кварцовий пісок (7) через проміжні склади (3) поступають на вісові дозатори (4), а звідти – в бетонозмішувач примусової дії (11). Туди ж дозуються мікрокремнезем (5), базальтова фібра (9). Після змішування сухих компонентів в бетонозмішувачі (змішаний цемент + гранітний щебінь + кварцовий пісок + мікрокремнезем + базальтова фібра) в нього вводять віддозовану кількість води замішування з добавкою С-3 (10).

Розміщення роторного протитечійного млину в діючому бетонозмішувальному вузлі має забезпечити виконання загальних вимог техніки безпеки, хороший доступ до затвора вивантажувального створу, течкам подачі матеріалів, а також для зручного ремонту і демонтажу частин робочих органів млина при ремонтних роботах. При встановленні і експлуатації роторного млина необхідно дотримуватися встановленого порядку роботи:

- роторний протитечійний млин встановлюється на жорсткі опори через віброізолюючі пластини;
- за допомогою фланців до млина приєднуються тічки компонентів змішаного в'язучого: портландцементу і кварцового піску;
- загрузку компонентів в млин виконують при працюючому двигуні;
- для запобігання перенавантаження електродвигуна подання компонентів змішаного в'язучого здійснюється поступово протягом 20... 30 сек.

Для ефективної роботи роторний протитечійний млин повинен бути завантажений не більше ніж на 60...70 % його номінального об'єму.

Подальше приготування бетонної суміші на змішаному активованому в'язучому нічим не відрізняється від технології виготовлення рядової суміші.

Висновки за 5-м розділом

1. Аналіз математичних моделей свідчить про те, що згідно величин коефіцієнтів при варійованих факторах найбільший вплив на міцність при стиску бетону у 2-х та 28-и добовому віці (як на активованому змішаному в'язучому, так і змішаному в'язучому, яке не підлягало механоактивації) надає витрата суперпластифікатору С-3. Наявність С-3 (до 1,5 % від маси цементу) сприяє підвищенню міцності бетону в середньому на 40...42 %. Наступним за впливом на міцність бетону при стиску є витрата мікрокремнезему. Зростання його кількості від 0 до 10 % викликає підвищення міцності бетону при стиску на 12...15 %. Введення до складу бетонної суміші 2-х % базальтової фібри сприяє підвищенню міцності бетону в середньому на 5...7 %.

2. Ефект від дії суперпластифікатору С-3 значно зростає в присутності оптимальної кількості мікрокремнезему (10 %) і базальтового волокна (2 %). В цьому разі ефект від сумісного впливу механоактивації, суперпластифікатору С-3, мікрокремнезему і базальтового волокна (в порівнянні з контролем) викликає підвищення міцності бетону при стиску на змішаному в'язучому в 28-и денному віці з 38,5 МПа до 76,2 МПа, тобто майже на 90 %.

3. Механохімічна активація змішаного цементу в роторному протитечійному млині в сукупності з використанням суперпластифікатору С-3, мікрокремнезему і базальтової фібри сприяє зниженню стиранності бетону в 28-и добовому віці з 0,31 г/см² (контроль) до 0,18 г/см², тобто майже на 70 %.

Загальні висновки

В дисертаційній роботі вирішена важлива науково-прикладна задача, яка полягає в розробці технології виготовлення будівельних розчинів та бетонів з підвищеними механічними характеристиками на механоактивованому змішаному в'язучому, одержаному з використанням роторного протитечійного млину.

1. Експериментально встановлено, що активація цементу в роторному протитечійному млині протягом 300 сек викликає підвищення швидкості реакції гідратації в'язучого, що віддзеркалюється на:

а) скороченні термінів тужавлення цементу (початок - з 2год 55хв. до 1год 55хв.; кінець тужавлення - з 4год 50хв. до 3год 40хв.);

б) підвищенні кількості хімічно зв'язаної води в 28-и добовому віці з 13% (активація відсутня) до 16,3%;

в) зростанні максимального розігріву тверднучого цементного каменю в термосі з 53,8 °С (контроль) до 64,3 °С (цемент активований).

2. Механохімічна, активація суміші портландцементу (80 %) та кварцового піску (20 %) протягом 300 сек сприяє підвищенню міцності цементного каменю при стиску в 28-и денному віці (в порівнянні з міцністю цементного каменю в аналогічному віці на портландцементі, який механоактивації не підлягав) в середньому на 30...32 %.

3. Із перерахованих факторів (вміст змішаного в'язучого, витрата суперпластифікатору С-3, вміст мікрокремнезему) найбільший вплив на міцність при стиску будівельного розчину у 2-х, 7-и та 28-и добовому віці надає вміст в ньому змішаного в'язучого. Зростання його кількості від 440 кг/м³ (склад розчину 1:3) до 850 кг/м³ (склад розчину 1:1) викликає підвищення міцності розчину при стиску в середньому на 60 %. Наступним за впливом на міцність будівельного розчину є витрата, суперпластифікатору С-3. Зростання його кількості від 0 до 1,5 % маси цементу викликає підвищення міцності розчину при стиску на 20...25 %. Найменший вплив на міцність при стиску розчину надає вміст мікрокремнезему. Зростання його

кількості від 0 до 10 % маси цементу сприяє підвищенню міцності будівельного розчину при стиску не більше ніж на 7...10 %.

4. Сумісний вплив механоактивації змішаного цементу, суперпластифікатору (1,5 %) та мікрокремнезему (10 %) сприяє зростанню міцності при стиску будівельного розчину в марочному віці (в порівнянні з міцністю будівельного розчину з використанням тієї ж кількості змішаного в'язучого, але яке не підлягало механоактивації, та при відсутності в складі розчину С-3 і мікрокремнезему) в середньому на 75...80 %.

5. Всебічний аналіз експериментально-статистичних моделей свідчить про значний вплив механоактивації змішаного цементу на міцність бетону в марочному, 28-и добовому віці. Сумісний вплив від механоактивації змішаного цементу і застосування рецептурних факторів (X_1 ; X_2 ; X_3) на рівні +1 сприяє зростанню міцності бетону при стиску в 28-и добовому віці з 38,5 МПа (механоактивація змішаного в'язучого відсутня; витрати суперпластифікатору С-3 (X_1), мікрокремнезему (X_2) і базальтової фібри (X_3) на рівні -1) до 76,2 МПа.

6. Механохімічна активація змішаного цементу в роторному протитечійному млині сприяє зниженню стиранності важкого бетону в 28-и добовому віці з 0,31 (механохімічна активація змішаного цементу відсутня – контроль) до 0,18 г/см², тобто майже на 70 %.

7. За результатами досліджень при будівництві дороги в житловому масиві «Розенталь» на виробничій базі МПП «САС» (м. Одеса) здійснено випуск 10 м³ бетонної суміші на змішаному активованому в'язучому. Міцність бетону при стиску, за результатами випробувань в 28-и добовому віці, склала 55 МПа.

Список використаних джерел

1. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л. Основи бетонознавства. К.: Основа. 2007. 616с.
2. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости/ В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, А.В. Сиренко. К.:Будівельник, 1991. 144 с.
3. Соломатов В.И., Выровой В.Н., Литвак В.И. Наполненные цементы и перспективы их применения на предприятиях Молд. ССР. Кишинёв: Молд. НИИНТИ, 1986. 67 с.
4. Композиционные материалы / Под ред. Карпиноса Д.М. Киев: Наукова думка, 1986. 592 с.
5. Гранковский И.Г. Структурообразование в минеральных вяжущих системах. К.: Наукова думка, 1987. 300 с.
6. Мчедлов-Петросян О.П., Салоп Г.А., Сидорович А.И. Контроль твердения цементов и бетонов. Київ: Будівельник, 1969. 104 с.
7. Кіракевич І.І., Марущак У.Д., Саницький М.А., Стечишин М.С. Самоущільнюючі бетони зі швидким наростанням міцності/ *Вісник НУ «Львівська політехніка»: Теорія і практика будівництва*. 2012. №737. С.153-158.
8. Сницький М.А., Марущак У.Д., Іракевич І.І., Марущак Т.А. Особливошвидкотверднучі композиції для високофункціональних бетонів/ *Вісник НУ «Львівська політехніка»: Теорія і практика будівництва*. 2013. №755. С.385-390.
9. Marushchak V., Sanytsky M., Sydor N. Design of rapid hardening engineering cementitious composites for sustainable construction. *SSP-Journal of Civil Engineering*. 2017. Vol.12, Issue 2. P.107-112.
10. Конструкційні матеріали нового покоління та технології впровадження їх в будівництво/ Р.Ф. Рунова та ін. К.: УВПК «ЕксОб», 2008. 360 с.
11. Саницький М.А., Кропивницька Т.П., Гев'юк І.М. Швидкотверднучі портландцементи з добавкою вапняку. *Будівельні матеріали та вироби*. 2019. №1-2(100). С.18-23.

12. Саницький М.А., Кропивницька Т.П., Гев'юк І.М. Швидкотверднучі клінкер-ефективні цементи і бетони: монографія. Львів: Вид-во ТОВ «Простір-М», 2021. 206 с.
13. Штарк Й., Бернд В. Долговечность бетона: пер. с нем. А. Тулаганова: под ред. П.В. Кривенко. К.: Оранта, 2004. 301 с.
14. Aitcin P.C. The Influence of the Water/Cement Ratio on the Sustainability of Concrete. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. 2019. Vol.5. P.807-826.
15. Arvaniti A.C., Yungler M.C.Cr., Bernal S.A. et al. Characterization of Particle Size, Surface Area, and Shape of Supplementary Cementitious Materials. *Particulate Science and Technology*. 2014. 32(4). 44 p.
16. Bost P., Regnier M., Horgnies M. Comparison of the accelerating effect of various additions on the early hydration of Portland cement. *Construction and Building Materials*. 2016. №113. P.290-296.
17. В'язучі речовини / Р.Ф. Рунова, Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, Ю.Л. Носовський. Київ: Основа, 2012. 448 с.
18. Коллоидная химия и физико-химическая механика цементных бетонов. Т.1/А.Н. Плугин и др. Київ: Наукова думка, 2011. 330 с.
19. Саницкий М.А. Некоторые вопросы кристаллохимии цементных минералов. К.: УМК ВО, 1990. 64 с.
20. Шейнич Л.А., Пушкарёва Е.К. Процессы самоорганизации структуры строительных композитов. Київ: Гамма-принт, 2009. 153 с.
21. Ефективні технології бетонів та розчинів із застосуванням техногенної сировини: монографія / Дворкін Л.Й. та ін. Рівне: НУВГП, 2017. 424 с.
22. Цементы и бетоны на основе топливных зол и шлаков: монография / П.В.Кривенко, Р.Ф.Рунова, М.А Саницкий., И.И. Руденко. Киев: Изд-во ООО «ИПК Экспресс-Плиграф», 2012. 258 с.
23. Саницький М.А., Кропивницька Т.П., Рихліцька О.В., Яніцький О.Б. Швидкотверднучі клінкер-ефективні бетони. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*: зб. наук. праць. 2020. Вип.38. С.258-266.

24. Саницький М.А., Кропивницька Т.П., Гев'юк І.М. Швидкотверднучі портландцементи з добавкою вапняку. Будівельні матеріали та вироби. 2019. № 1/2(100).С.34-37.
25. Кривенко П.В., Пушкарьова К.К., Кочевих М.О. Заповнювачі для бетону. К.:ФАДА ЛТД, 2001. 99 с.
26. Neville A.M. Wlasciwosci betonu. Krakow: Wydanie 4, 2000. 874 p.
27. Чернявский В.Л. Адаптация бетона. Днепропетровск: Нова ідеологія, 2002. 115 с.
28. Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Качанов В.О. Бетони на основі наджорстких сумішей. Рівне: ДЦНТІ. 2006. 179 с.
29. Хинт И. О четвёртом компоненте технологии. *Научно-информационный сборник СКТБ «Дезинтегратор»*. Таллин: Вилгус, 1979. С.66-72.
30. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах Физико-химическая механика: Избр. труды, 1979. 384 с.
31. Шпынова Л.Г., Чих В.И., Саницкий М.А. Физико-химические основы формирования структуры цементного камня. Львів: Вища школа, 1981. 158 с.
32. Механоактивация в технологии бетонов / В.Н. Выровой и др. Одесса: ОГАСА, 2014. 148 с.
33. Барабаш І.В. Механохімічна активація мінеральних в'язучих речовин: Навч. посібник. Одеса:«Астропринт». 2002. 156 с.
34. Ходаков Г.С. Физико-химическая механика измельчения твёрдых тел. *Коллоидный журнал*. Т.60, №5. 1998. С.684-697.
35. Модифікатори нової генерації для бетонів/ М.А. Саницький и др. *Будівельні матеріали та вироби*. 2006. №1(36). С.5-7.
36. Цементные бетоны с минеральными наполнителями / Л.И. Дворкин, В.И. Соломатов, В.Н. Выровой. Київ. Будівельник. 1991.136 с.
37. Sanytsky M., Usherov-Marshak A., Marushchak V., Kabus A. The effect of mechanical activation on the properties of hardened portland cement. *Lecture Notes in Civil Engineering. Advances in resource-saving technologies and materials in civil and environmental engineering* . 2020.Vol.100. P.378-385.

38. Ашрабов А.А., Зайцев Ю.В. Элементы механики разрушения бетонов. Ташкент:1981. 238 с.
39. Федоркин С.И. Механоактивация вторичного сырья в производстве строительных материалов. Симферополь : Таврия. 1997.180 с.
40. Хайнике Г. Трибохимия/ Пер. с нем, 1987. 584с.
41. Kurdowski W. Chemia cement i Betonu.Wyd. Polski Cement, 2010.728 p.
42. Aitcin P., Wilson W. Cements of today – concretes of tomorrow. *Cement Wapno Beton*. 2014. 81(19). P.349-358.
43. Jamrozy Z. Beton I jego technologie. Warszawa: Wydawnictwo naukowe PWN, 2000.486s.
44. Kropyvnytska T., Sanytsky M., Geviuk J. Properties of Portland-composite cements with zeolite tuff. *Journal of Civil Engineering: Environment and Architecture, JCEEA*, 2018. №65(3/18). P.25-34.
45. Locher Friedrich W. Cement-Principles of production and use. Verlag Bau + Technic Gmbh, 2006. 536 p.
46. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости/ Соломатов В.И., Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Сиренко А.В. К.: Будівельник. 1991. 144 с.
47. Барабаш И.В. Бетоны на механоактивированных минеральных вяжущих: диссерт. на соиск. уч. ст. д.т.н: 05.23.05. Одесса, 2005. 307 с.
48. Гарашенко Д.П. Дисперсно-армований самоущільнюючий бетон на механоактивованому портландцементі: дисерт. на здобуття наук. ст. к.т.н.: 05.23.05. Одеса, 2021.156с.
49. Ходаков Г.С. Влияние тонкого измельчения на физико-химические свойства твёрдых тел. *Успехи химии*.1963. Т.32, Вып.7. С.860-861.
50. Varabash J., Harashenko D. Mechanoactivation of the Portland cement in technology of manufacturing self-compacting concrete. *Eastern European journal of enterprise technologies*. 2018. №3/6(93). P.12-17.

51. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Гарніцький Ю.В. Модифіковані золотмісні сухі будівельні суміші для мурувальних та клейових розчинів. Рівне: НУВГП. 2013. 325 с.
52. Thissen P.A., Heinicke G., Meyer K. Festkörperchemie. Leipzig. 1973. P.19-106.
53. Дорофеев В.С., Выровой В.Н. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций. Одесса: Город мастеров. 1998. 165 с.
- 54.. В'яжучі матеріали / Пащенко О.О., Сербін В.П., Старчевська О.О. та ін К.: Вища школа. 1995. 416 с.
55. Хинт И. УДА-технология. Проблемы и перспективы. Таллин: Валгус, 1981. 36с.
56. Берник М.П. Варіанти конструктивного виконання віброзмішувачі. *Вибрації в техніці та технологіях*.1998. №1(15). С.12-13.
57. Маслов А.Г., Саленко Ю.С., Стукота Е.В. Разработка установки для вибромеханической обработки строительных смесей. *Вестник Харьковского нац-го автотор. ун-та*. 2012. Вып.57. С.59-62.
58. Kudyakow A., Semyonova G., Sarkisow Y. etc. Aktivation des Betonanmachwasser. Tagungsbericht, Band 2.Weimar,Deutschland.1997.P.20501-20507.
59. Братчун В.И., Зайченко Л.Г. Оптимизация факторов электромагнитной активации бетонных смесей. *Вестник ОГАСА*: Одесса. 2005. Вып.№20. С.40-46.
60. Гранковский И.Г., Круглицкий Н.Н., Пасечник Г.А. Кинетика структурообразования в водных цементных и цементно-песчаных дисперсиях под влиянием магнитного поля. *ДАН УССР.Сер.Б*.1973. №8. С.751-754.
61. Коваль С.В. Моделирование и оптимизация состава и свойств модифицированных бетонов. Одесса: Астропринт. 2012. 424 с.
62. Круць Т.М., Гев'юк І.М., Саницький М.А., Кропивницька Т.П. Принципи стратегії сталого розвитку в цементній промисловості. *Будівельні матеріали та вироби*. 2015. №3-4. С.16-19.
63. Ушеров-Маршак А., Гергичи З., Малолепши Я. Шлакопортландцемент и бетон. Х.: Колорит. 2004. 159 с.

64. Фаликман В.Р. Поликарбоксилаты: вчера, сегодня, завтра. Труды IX междунар. н/п конференции. Запорожье:Будиндустрия ЛТД, 2008. С.72-76.
65. Чернецки Л., Курдовски В. Будущее бетона. Труды IX Междунар. н/п конференции. Запорожье:Будиндустрия ЛТД. 2008. С.13-21.
66. Шейнич Л.А., Пушкарёва Е.К. Процессы самоорганизации структуры строительных композитов. Київ: Гамма принт. 2009.153 с.
67. Arvaniti A.C., Junger M.C.G., Bernal S.A. Characterization of Particle Size, Surface Area, and Shape of Supplementary Cementitious Materials. *Particulate Science and Technology*. 2014. 32(4). 44 p.
68. Golaszewski J. Domieszki do betonu efekty dzialania ocena i badania. Gliwice. 2016. 263s.
69. Jamrozy Z. Beton I jego technologie. Warszawa: Wydawnictwo naukowe PWN. 2000. 486 s.
70. Kurdowski W. Chemia cement I betonu. Wyd. Polski Cement. 2010. 728 s.
71. Lukowski P. Modifikacja materialowa betonu. Krakow, Polski cement. 2016. 355 s.
72. Aitcin P. High Performance Concrete. E&FN Spon/ London. 1998. 591 p.
73. Sanchez F., Sobolev K. Nanotechnology in concrete –A review. *Construction and Building Materials*. 2010. V.24. P.2060-2071.
74. Szwabowski J., Colaszewski J. Technologia betonu samozageszczalnego. SPC Krakow. 2010.160s.
75. Деревянко Н.В., Скидан Л.В., Али Салах М.Н. Определение эффективности добавок пластификаторов отечественного производства. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2007. №11. С.28-35.
- 76.. Коллоидная химия и физико-химическая механика цементных бетонов: монография / Плугин А.Н. та ін. Київ. 2011. 333 с.
77. Саницький М.А., Кропивницька Т.П., Рихліцька О.В., Яніцький О.Б. Швидкотверднучі клінкер-ефективні бетони. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2020. Вип.38. С.258-266.

78. Троян В.В. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Київ: Аспект-Поліграф, 2010. 228с.
79. Ушеров-Маршак А.В., Кабусь А.В. Функционально-кинетический анализ влияния добавок на твердение цементов. *Неорганические материалы*. 2016. Том 52, №4. С.479-484.
80. Ушеров-Маршак А.В. Добавки в бетон: прогресс и проблемы. *Строительные материалы*. 2006. №10. С.8-12.
81. Саницький М.А., Позняк О.О., Кіракевич І.І., Русин Б.Г. Високофункціональні бетони на основі модифікаторів нової генерації. *Вісник НУ «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*. Львів. 2008. №627. С.191-197.
82. Ніколаєв О.П., Кондращенко О.В. Ефективність дії пластифікаторів залежно від способу їх додавання до складу бетону. *Вісник ОДАБА*. 2022. Вип. 82. С.98-105.
83. Савченко С.В., Антонюк Н.Р., Бачинський В.В. Оцінка впливу модифікаторів і наповнювача на реологічні і фізико-механічні властивості штукатурних розчинів. *Вісник ОДАБА*. 2021. Вип. 82. С.105-114.
84. Русин Б.Г. Формування мезоструктури високофункціональних дрібнозернистих бетонів з високою міцністю у ранньому віці. *Вісник НУ «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*. Львів. 2011.
85. Саницький М.А., Соболев Х.С., Марків Т.С. Модифіковані композиційні цементы. Львів: Вид-во Львів. політехніки. 2010. 132 с.
86. Толмачов С.М. Дослідження сумісності суперпластифікаторів і цементів/ *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди* .2015. Вип.31. С.176-182.
87. Ушеров-Маршак О.В., Кабусь О.В. Функціональна сумісність компонентів - фактор розвитку сучасного бетону (на прикладі добавок до бетону). *Наука та будівництво*. 2018. №1. С.27-33.

88. Гев'юк І.М. Мультиmodalьні композиційні портландцементи з високою ранньою міцністю та модифіковані бетони на їх основі: автореф. дис.....канд.техн. наук: 05.23.05. Львів.2018. 21 с.
89. Житковський В.В. Підвищення ефективності протиморозних добавок до бетону за рахунок комплексу із суперпластифікатором. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2015. Вип.31. С.183-190.
90. Кіракевич І.І. Суперпластифіковані цементуючі системи для самоущільнюючих бетонів з швидким наростанням міцності: автореф. дис..... канд. техн. наук: 05.23.05. Львів. 2012. 21с.
91. Соболев Х.С., Марків Т.С., Петровська Н.І., Гуняк О.М. Активність полідисперсних мінеральних компонентів та їх роль у формуванні структури та міцності цементів. *Вісник НУ «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*. 2019. №912. С.175-182.
92. Ушеров-Маршак А.В., Кабусь А.В. Функциональная совместимость в системе «Цемент-добавка» и возможности её количественной оценки. *Инновации в бетоноведении, строительном производстве и подготовке инженерных кадров*: сборник статей. 9-10 июня 2016г. Минск. Беларусь. 2016. С.16-21.
93. Шейніч Л.О., Іонов Д.С., Сопов В.П. Особливості процесів структуроутворення цементного каменю, модифікованого комплексною органо-мінеральною добавкою. *Вісник ОДАБА*. 2013. Вип.52. С.308-314.
94. Ушеров-Маршак А.В. Оценка эффективности влияния химических и минеральных добавок на ранней стадии гидратации цементов. *Неорганические материалы*. 2004. Т.40. №8. С.1014-1019.
95. Позняк О.Р., Мазурак О.Т., Марущак У.Д. Особливості процесів гідратації портландцементних систем з модифікаторами на основі полікарбоксилатів. *Вісник НУ «Львівська політехніка». Хімія, технологія речовин та їх застосування*. 2008. №609. С.310-314.

96. Саницький М.А., Позняк О.Р., Марущак У.Д., Кіракевич І.І. Комплексні модифікатори пластифікуюче-прискорюючої дії в технології бетонів. *Будівельні конструкції: Сучасні технології бетону*. 2009. Вип.72. С.52-59.
97. Саницький М.А., Марущак У.Д., Мазура О.Т., Чемерис М.М. Фізико-хімічні особливості гідратації портландцементів з комплексними модифікаторами системи «Релаксол». *Будівельні матеріали та вироби*. 2003. №3(17). С.17-20.
98. Саницький М.А., Марущак У.Д., Мазурак О.Т., Чемерис М.М. Концепція застосування модифікаторів для підвищення якості та довговічності залізобетону. *Будівельні конструкції*. 2003. Вип.59, Кн.1. С.448-455.
99. Саницький М.А., Позняк О.Р., Кіракевич І.І., Топилко Н.І. Сучасні бетони на основі комплексних модифікаторів нової генерації. *Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка*. 2008. №2(29). С.98-102.
100. Русин Б.Г. Високофункціональні бетони на основі портландцементів, модифікованих ультрадисперсними мінеральними добавками: автореф.дис..... к.т.н: 05.23.05. Львів: НУ «Львівська політехніка». 2014. 21с.
101. Калашников В.И. Бетоны: Макро-, микро-, нано- и пикомасштабные сырьевые компоненты. Реальные нанотехнологии бетонов. *Дні сучасного бетону. Від теорії до практики: праці конф., Хортиця*. 2012. С.38-49.
102. Касимова С.С., Тулаганов А.А., Калимов Х.Х. Нанотехнологии в производстве цемента и бетона. Ташкент. 2008. 44 с.
103. Кондратьева Н.В. Нанотехнологии в производстве строительных материалов. *Будівництво України*. 2012. №6. С.2-9.
104. Чарнецки Л., Курдовски В. Будущее бетона. IX Міжн.наук.-практ. конф. Запоріжжя. 2007. С.13-21.
105. Kaprielov S., Sheynfeld A., Kardumian H. Characteristics of the structure and properties of high-strength concrete, containing multicomponent modifiers including silica fume, fly ash and metakaolin. Proceedings of the 16th International Conference on Building Materials (IBAUSIL 2006). Weimar, Germany. 2006. Band 2. P.77-84.
106. Sanytsky M., Rusin B., Marnshchak U., Kirakevych I. High Performance concretes based on Portland cements modified ultrafine supplementary cementitious

materials. Proceedings of the 19th International Conference on Building Materials. Weimar, Germany. 2015. Band 2. P.1051-1058.

107. Artelt C., Garsia E. Impact of superplasticizer concentration and ultrafine particles on the rheological behavior of dense mortar suspensions. *Cement and concretes research*. 2008. Vol.38, Issue 5. P.633-642.

108. Quercia G., Brouwers H.I.H. Application of nano-silica (nS) in concrete mixtures. 8th fib PhD Symposium in Kgs. Lyngby (Denmark, June 20-23, 2010). P.19-24.

109. Ghanci A., Eskandari-Naddaf H., Davoodi A. Corrosion behavior and optimization of air entrained reinforced concrete, incorporating microsilica Structural Concrete. 2018. Vol.19, Issue 5. P.1472-1480.

110. Alrekabi S., Cundy A., Whitby R.L.D., Lampropoulos A., Savina I. Effect of Undensified Silica Fume on the Dispersion of Carbon Nanotubes within a Cementitious Composite. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. 829(1).

111. Holland T.C. Working with Silica Fume in Ready Mixed Concrete – USA Experience. *CANMET/ACI/Third International Conference*.: proceedings. Trondheim, Norway. 1989. V.2. P.763-781.

112. Гуриненко Н.С. Цементный камень с ультрадисперсным микрокремнезёмом. *Инновации в бетоноведении, стр-ом пр-ве и подг. инж. кадров*: Сб.ст.по мат-ам межд. научно-техн. конф, Минск: БНТУ. 2016. ч.1. С.71-76.

113. Гуриненко Н.С., Батяновский Э.И. Конструкционный тяжёлый бетон с добавкой ультракремнезёма. *Инновации в дорожном стр-ве*: сб. докладов межд. научно-техн. конф, Минск: Белдор НИИ. 2016. С.105-114.

114. Чернышёв Е.М., Коротких Д.Н. Модифицирование структуры цементного камня микро- и наноразмерными частицами кремнезёма (вопросы теории и приложения). *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2008. №5. С.30-32.

115. Ушеров-Маршак О.В. Хімічні і мінеральні добавки в бетон. Харків: Колорит, 2005. 280 с.

116. Roberts L.R., Grace W.R. Mikrosilica in concrete. 1 Mater. Sci. Concr.1. Westerville (Ohio),1989. P.197-222.
117. Larbi I.A., Bijzn I.M. The chemistry of the pore fluid of silica fume-blended cement systems. *Cem. and Concr.Res.*1990.V.20, №4. P.506-516.
118. Shannag M.I. High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume. *Cement and Concrete Composites.* 2000. Vol.22. P.399-406.
119. Soad M., Abo-El-Enein, S.A.Hanna, G.B., Kotkata M.F. Effect of silica fume on the phase composition and microstructure of thermally treated concrete. *Cement and Concrete Research.*1996.Vol.26. P.1479-1484.
120. Appa Rao G. Investigations on the performance of silica fume-incorporated cement pastes and mortars. *Cement and Concrete Research.* 2003. Vol. 33. P.1765-1770.
121. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони/ Л.Й.Дворкін та ін. Рівне: НУВГП. 2017. 332 с.
122. Mobasher B. Mechanics of fiber and textile reinforced cement composite. New York: CRC Press, 2011.452 p.
123. Павленко В.И., Арончик В.Б. Свойства фибробетона и перспективы его применения: анализ. обзор. Рига: ин-т научно-техн. информ. и пропаганды, 1978. 96 с.
124. Саницький М.А., Андрущак У.Д., Кіракевич І.І., Стечишин М.С. Високоміцні самоущільнювальні бетони на основі дисперсноармованих цементуючих систем. *Будівельні матеріали і вироби.* 2015. №1. С.6-9.
125. Naaman A.E. Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement composites. *Journal of advanced concrete technology.* 2003. №1. P.241-252.
126. Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fibre Reinforced Concrete Structures, by Concrete Committee of Japan Society of Civil Engineers (ISCE).2006.
127. Dvorkin L., Ribakov Y. Multi-Parametric Concrete Compositions Design.. New York: Nova Science Publishers, 2013. 223 p.

128. Mishutin A.V., Chintea L. The effect of modified additives on strength and frost resistance in fibrous concrete of rigid road pavements. *Вісник ОДАБА*. 2020. №80. С.64-74.
129. Кияшко В.Т. Фібра для армування залізобетонних будівельних виробів. *Журнал цивільного виробництва*. 2012. №8. С.61-66.
130. Дорошенко О.Ю., Дорошенко Ю.М. Дисперсно-армований бетон – надійний та ефективний матеріал для транспортного будівництва. *Транспортное строительство Украины*. 2006. №4. С.23-25.
131. Дорошенко О.Ю., Дорошенко Ю.М. Дисперсно-армований бетон – надійний та ефективний матеріал для транспортного будівництва (продовження). *Транспортное строительство Украины*. 2007. №5. С.16-20.
132. Дорошенко О.Ю., Дорошенко Ю.М. Цементний камінь, армований дисперсною арматурою. *Зб. наукових праць Київського ун-ту економіки і технології транспорту. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2006. Вип.10. С.66-74.
133. Солодкий С.Й., Турба Ю.В. Експериментально-статистичне моделювання тріщиностійкості бетонів, армованих поліпропіленовою фіброю. *«Львівська політехніка». Частина II. Теорія і практика будівництва*. 2015. №823. С.298-302.
134. Солодкий С.Й., Турба Ю.В. Підвищення тріщиностійкості дисперсно-армованих поліпропіленовою фіброю бетонів технологічними чинниками. *Вісник ОДАБА*. 2017. Вип.66. С.99-105.
135. Пухаренко Ю.В. Принципы формирования структуры и прогнозирования прочности фибробетонов. *Строительные материалы*. 2004. №10. С.47-51.
136. Angelakopoulos H., Neocleous K., Pilakoutas K. Steel fiber reinforced roller compacted concrete roads. Sheffield: Department of civil and structural engineering the University of Sheffield. 2009. Vol.6, Issue 1. P.45-55.
137. Bentur A., Mindess S. Fiber reinforced cementitious composites. *Modern concrete technology series*. New York. 2007. №2. P.625.

138. Falkner H. Steel fiber and polymer concrete. *Basis, model code 2007 and applications*. Braunschweig: Technical University at Braunschweig, 2007. P.381-400.
139. Magnusson J. Fiber reinforced concrete beams subjected to air blast loading. *Division of concrete structure*. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2006. P.17.
140. Porter H. Preparation of Concrete from selection of materials to final disposition. *Proceedings of the National Association of cement users*. 1910.Vol.6. P.31-39.
141. Ramakrishnan V.A. New material (polyolefin fiber reinforced concrete) for the construction of pavements and white-topping of asphalt roads. *Design and materials for high performance: proceedings of the sixth international purdue conference on concrete pavement*. 1997. 18-21. P.119-130.
142. Batalin B.S., Saraikina H.A. Interaction of glass fiber and hardened cement paste. *Class and Ceramics*. 2014. №8. P.37-40.
143. Vesova L.M. Disperse reinforcing role in producing non-autoclaved cellular foam concrete. *Procedia Engineering*. 2016. №150. P.1587-1590.
144. Кондрашов Г.М., Гольдштейн Б.М. Базальтофибробетон – технология будущего. *Технико-технологические инновации*. 2012. №7. С.91-92.
145. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительных задач на ЭВМ. Киев: Васшая школа, 1989. 328 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

**Список публікацій здобувача за темою дисертаціїта відомості про
апробацію результатів дисертації**

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Барабаш І.В., Пірогов Д.О. Активація цементу і її вплив на структуроутворення цементовміщуючих композицій. *Сучасне будівництво та архітектура*. 2023. Вип.6. С.82-89. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2023-6-82-89>
2. Барабаш І.В., Пірогов Д.О. Вплив механохімічної активації композиційного цементу на міцність будівельного розчину. *Механіка та математичні методи*. Вип.2. 2023. С.51-61. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2023-5-2-51-61>
3. Пірогов Д.О., Барабаш І.В. Будівельний розчин на механоактивованому змішаному портландцементі. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2023. Вип.№44. С.83-92. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i44.10>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

4. Барабаш І.В., Ксьоншкевич Л.М., Пірогов Д.О., Горбовий О.Л. Вплив струйної активації на міцність піщаного бетону. *Моделювання та оптимізація будівельних композицій: Матеріали міжнародного семінару*. Одеса. ОДАБА. 2021. С.3-5.
5. Барабаш І.В., Пірогов Д.О., Стрельцов К.О. Вплив рецептурних факторів на водотверде відношення рівновязких цементовміщуючих композицій. *Моделювання та оптимізація будівельних композицій: Матеріали міжнародного семінару*. Одеса. ОДАБА. 2022. С.3-6.

Продовження додатку А

6. Пірогов Д.О., Барабаш І.В., Стрельцов К.О. Активація цементу і її вплив на кількість хімічно зв'язаної води в цементному камені. *Експлуатація та реконструкція будівель і споруд*: тези доповідей V Міжнародної конференції Одеса. ОДАБА. 2022. С.88-91.
7. Пірогов Д.О., Барабаш І.В. Вплив режиму активації на властивості цементу, цементного тіста та каменю на його основі. *Структурутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій*: Збірник тез міжнародної науково-технічної конференції. Одеса. ОДАБА. 2023. С. 109-111.
8. Пірогов Д.О., Барабаш І.В. Вплив механохімічної активації на властивості цементу та цементного каменю на його основі. Тези доповідей науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу академії. ОДАБА. 2023. С. 129.

Відомості про апробацію результатів дисертації:

- 79-я науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури (Україна, м. Одеса, 18 - 19 травня 2023 р.);
- Міжнародна науково-технічна конференція «Структурутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій» базі Одеської державної академії будівництва та архітектури (Україна, м. Одеса, 27-28 квітня 2023 р.)
- Міжнародна науково-технічна конференція «Моделювання та оптимізація будівельних композитів» (Україна, м. Одеса, 17-18 листопада 2022 р.)

Додаток Б
Акти впровадження результатів досліджень

«Затверджую»

Директор МПП «САС»



Чайчук С. Р.

08 вересня 2023р

Акт про впровадження наукових досліджень

Ми, що нижче зазначені, представник МПП «САС», керівник виробничої дільниці ЖМ «Розенталь» Баланюк Дмитро Олександрович з однієї сторони, та представник Одеської державної академії будівництва та архітектури аспірант Пірогов Дмитро Олексійович з другої сторони, склали акт про те, що при будівництві дороги у житловому масиві «РОЗЕНТАЛЬ» (м. Одеса) було вироблено та укладено 10м³ бетонної суміші за технологією з використанням змішаного активованого в'язучого. Технологічна схема виробництва включала в себе активацію змішаного в'язучого у протитечійному роторному млині у співвідношенні (80% цементу + 20% піску) протягом 5-ти хвилин. Активоване змішане в'язуче подавалося в бетонозмішувач примусової дії. Після цього в змішувач додавалися віддозовані кількості мікрокремнезему, базальтової фібри, немеленого кварцового піску та гранітного щебню фракції 5-20 мм. Після перемішування сухих компонентів протягом 3-х хвилин в бетону суміш вводилася вода замішування з віддозованою кількістю суперпластифікатору С-3. Загальний термін приготування бетонної суміші склав 5 хвилин.

Склад бетонної суміші на 1м³:

- | | |
|--|-----------|
| - активоване змішане в'язуче
(портландцемент М500 - 400кг;
молотий пісок - 80кг) | - 480 кг |
| - кварцовий пісок з Мк = 2,25 | - 690 кг |
| - щебінь фракції 5-20мм | - 1070 кг |
| - мікрокремнезем | - 40 кг |
| - базальтова фібра | - 8 кг |
| - суперпластифікатор С-3 | - 6 кг |
| - вода замішування | - 140 л |

Фізико-механічні характеристики бетону:

- | | |
|-------------------------------------|--------------------------|
| - Міцність при стиску в віці 28 діб | - 55 МПа |
| - Середня густина бетону | - 2390 кг/м ³ |

Керівник виробничої дільниці
ЖМ «Розенталь»

Баланюк Д.О.

Аспірант ОДАБА



Пірогов Д.О.



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65052, тел./факс: (048) 723-69-04, тел. (048) 723-43-53,
e-mail: list@odaba.edu.ua, веб-сайт: www.odaba.edu.ua, код ЄДРПОУ 02071033

06.03.2024 № 08-10-293

На № _____ від _____

Г

7

Довідка

про впровадження результатів наукових досліджень

Довідка засвідчує, що результати досліджень аспіранта Пірогова Дмитра Олексійовича (науковий керівник – д.т.н., проф. Барабаш І.В.), наведені у його дисертаційній роботі на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» за темою «Механохімічна активація змішаного цементу і її вплив на якість будівельних композитів різного призначення» впроваджені в навчальний процес Одеської державної академії будівництва та архітектури.

Результати досліджень використовуються в лекційних курсах «В'язучі речовини та заповнювачі» (лектор - доц. Гнип О.П.) та «Бетони та будівельні розчини» (лектор д.т.н., доц. Мартинов В.І.) для студентів, що навчаються за освітньо-професійною програмою «Будівництво та цивільна інженерія» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

Проректор з НІР

Ажаман І.А.