УДК 624.044:624.041.6

DOI <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2021.39.8>

Кравченко С.А.

к.т.н., доцент, доцент кафедри залізобетонних конструкцій і транспортних споруд,
Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

Постернак О.О.

к.т.н., доцент, доцент кафедри залізобетонних конструкцій і транспортних споруд,
Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

Зінченко С.В.

к.т.н., асистент кафедри залізобетонних конструкцій і транспортних споруд,
Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

Агаєва О.А.

к.т.н., асистент кафедри залізобетонних конструкцій і транспортних споруд,
Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

Столевич І.А.

к.т.н., доцент, доцент кафедри опору матеріалів,
Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНІСНИХ І ДЕФОРМАТИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КЕРАМЗИТОБЕТОНУ НА ЦЕМЕНТНО-ЗОЛЬНОМУ В'ЯЗУЧОМУ

Анотація. *Вирішення багатьох завдань сучасного будівництва й одночасно екологічних, ресурсозберігаючих і економічних проблем можливе за рахунок застосування місцевих пористих заповнювачів і багатокомпонентних в'язучих для виготовлення легких бетонів. Власна маса несучих конструкцій з легких бетонів до 1,5 раза менша, ніж аналогічних конструкцій з важких бетонів.*

У роботі із застосуванням математико-статистичного методу планування експерименту розроблені раціональні склади конструкційного керамзитобетону на цементно-зольному в'язучому міцністю 15,2...26,2 МПа і середньою щільністю 1400...1700 кг/м³.

Отримані та проаналізовані рівняння регресії, які рекомендується використовувати для визначення міцності, щільності й модуля пружності керамзитобетону на цементно-зольному в'язучому.

Аналіз рівнянь регресії показав, що витрата карбонатного піску й витрата керамзиту значно впливають на щільність керамзитобетонної суміші й щільність бетону, витрата золи-виносу впливає менше. На кубикову міцність керамзитобетону на карбонатному піску найбільший вплив має витрата цементу, золи й керамзиту. Міцність керамзитобетону лінійно пропорційна витраті цементу й золи, але збільшення витрати цементу підвищує міцність бетону у разі стиску до певної межі.

Визначено, що середня витрата всіх складників бетону дає можливість одержання міцності від 14,5 до 20,5 МПа. У разі збільшення розчинного складника міцність збільшується. Випробувані зразки після тепловологісної обробки й нормального твердіння мають приріст міцності у середньому на 20%. З підвищенням витрати в'язучого від 320 до 500 кг/м³ спостерігається приріст міцності до 23%. Призмове міцність зростає у разі збільшення витрати в'язучого й віку бетону, а для агрегатно-структурного фактора вплив на призмове міцність зворотний.

Модуль пружності підвищується у разі збільшення витрати в'язучого, а для агрегатно-структурного фактора дія на нього зворотна.

За результатами дослідження кубикової міцності слід зазначити, що у разі заміни частки цементу на 20–35% золою міцність керамзитобетону на карбонатному піску й цементно-золю в'язучому не зменшується.

Ключові слова: керамзитобетон, цементно-золе в'язуче, міцність, модуль пружності, склад.

Вступ. Останніми роками увага зосереджена на розробці й застосуванні конструкцій з використанням нових матеріалів і компонентів, що мають поліпшені теплоізоляційні та експлуатаційні властивості. У разі раціонального проектування конструктивних систем, будинків слід враховувати, що власна маса несучих конструкцій з легких бетонів завдяки їх низькій щільності до 1,5 раза менша, ніж аналогічних конструкцій з важких бетонів.

Проблема використання легких бетонів є актуальним завданням, оскільки передбачає вирішення багатьох завдань сучасного будівництва й одночасно екологічних, ресурсозберігаючих та економічних проблем за рахунок застосування місцевих пористих заповнювачів і багатокомпонентних в'язучих [1].

Матеріали й методи дослідження. Матеріали, використані для виготовлення зразків, мали такі характеристики:

- керамзитовий гравій 5...10 мм, нефракціонований Кулиндорівського індустріального концерну «Інто-Строй», марки за насипною щільністю М 600, умовною міцністю в циліндрі, рівній 2,8...3,0 МПа;
- пісок карбонатний Біляєвського кар'єру;
- цемент М 400 Криворізького заводу – ДСТУ Б В.2.7-112-2002;
- зола-виносу Ладжинської ТЕС – ГОСТ 25818-91;
- суперпластифікатор С-3 – ТУ-2481-001-51831493-00.

Для добору раціонального складу керамзитобетону на карбонатному піску й цементно-золю в'язучому з додаванням золи-виносу

використовувався метод математичного планування експерименту [2].

У роботі застосований повний факторний експеримент відповідно до методики [3]. Для реалізації прийнятий близький до Д-оптимального трирівневий план типу B_4 . Досліджувані фактори та рівні їх варіювання наведені в табл. 1.

Для добору оптимальних складів бетону була отримана модель «склад-властивість» у вигляді полінома другого ступеня, що виражає залежності впливу досліджуваних факторів на властивості бетону:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i \neq j}^k b_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

Результати дослідження. Склади дозувалися за вагою [4]. Значення витрати цементу і води приймалися з урахуванням рекомендацій [1], агрегатно-структурний фактор прийнятий у межах $0,4 \leq r = M/(M+K) \leq 0,7$ відповідно до рекомендацій [1].

Розшарування бетонної суміші в процесі проведення експерименту не спостерігалось. Це пояснюється тим, що були отримані тверді й малорухомі суміші, а в'язкості цементно-золю тесту й розчину було досить для запобігання розшарування.

Після обробки експериментальних даних для керамзитобетону на карбонатному піску і цементно-золю в'язучому були отримані такі ЕС- моделі:

$$\ln(\rho_0) = 7,440 + 0,034x_1 + 0,012x_1^2 + 0,004x_1x_2 - 0,004x_3x_4 + 0,015x_2^2 - 0,015x_3^2 - 0,005x_1x_3 + 0,091x_3^2 + 0,052x_4^2 \quad (2)$$

Таблиця 1. Рівні варіювання факторів

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	ΔX
Витрата цементу Ц, кг/м ³	X_1	250	300	350	± 50
Витрата золи-виносу З, кг/м ³	X_2	90	120	150	± 30
Витрата піску П, кг/м ³	X_3	270	360	450	± 90
Витрата керамзиту К, кг/м ³	X_4	550	700	850	± 150

$$\ln(f_{\text{пл}}) = 2,878 + 0,169x_1 + 0,067x_1^2 - 0,045x_1x_2 + 0,054x_2x_3 + 0,064x_2^2 - 0,072x_3^2 + 0,055x_4 - 0,066x_4^2; \quad (3)$$

$$\ln(\rho_{\text{сук}}) = 7,363 + 0,034x_1 + 0,011x_1^2 + 0,004x_1x_2 - 0,003x_2x_3 + 0,015x_2^2 - 0,015x_3^2 - 0,005x_1x_3 + 0,097x_3 + 0,054x_4; \quad (4)$$

$$\ln(f_{28}) = 3,036 + 0,190x_1 - 0,049x_3^2 - 0,054x_1x_2 + 0,052x_2x_3 + 0,088x_2^2 + 0,059x_4. \quad (5)$$

Рівняння регресії (2...5) побудовані з використанням типової версії COMPREX-99, що реалізує послідовний регресійний аналіз з генеруючою помилкою експерименту $s\{T\}=0,028$ при $\alpha=0,022$.

ЕС-моделі щільності й міцності бетону є адекватними для прийнятого рівня довірчої імовірності, тому що $F_p \leq F_T$. Отже, ці рівняння доцільні для проектування складів з керамзитобетону на карбонатному піску й цементно-зольному в'язучому міцністю 15,2...26,2 МПа й щільністю 1400...1700 кг/м³.

Аналіз рівнянь (2...4) по знаках і величині коефіцієнтів у лінійних факторах і їх добутках дозволяє судити про напрямок регулювання й порівняльного ступеня кожного фактора. Так, фактори x_3 (витрата карбонатного піску) і x_4 (витрата керамзиту) значно впливають на щільність керамзитобетонної суміші й щільність бетону. Найменше на щільність впливає витрата x_2 (золи-виносу).

У рівняннях (3) і (5) кубикової міцності керамзитобетону на карбонатному піску найбільші значення мають x_1 (витрата цементу), x_2 (витрата золи) і x_4 (витрата керамзиту). Незначимість коефіцієнта x_3 (витрата піску) свідчить про те, що вплив цього фактора на міцність керамзитобетону незначний.

Графічна інтерпретація отриманих рівнянь у залежності щільності суміші й бетону, а також міцності після тепловологісної обробки й нормального твердіння керамзитобетону від факторів x_2, x_3, x_4 у разі фіксованого x_1 показана на діаграмах у вигляді куба (рис. 1–4).

Аналіз отриманих залежностей дозволив установити граничні значення факторів, що варіюються ($\text{ЦЗ} = 340\text{--}500 \text{ кг/м}^3$; $r = 0,4\text{--}0,6$) і призначити склади конструкційного керамзитобетону класів С8/10–С16/20.

З діаграм на рис. 1 (а, б, в) видно, що за мінімальної, середньої і максимальної витрати цементу істотний вплив на щільність суміші виявляють витрата керамзиту – 27% і карбонатного піску – 48%. Цю закономірність можна помітити й на діаграмах щільності бетону (рис. 2 а, б, в).

Міцність керамзитобетону лінійно пропорційна витраті цементу й золи, але збільшення витрати цементу підвищує міцність бетону у разі стиску до певної межі.

На діаграмах у вигляді куба (рис. 3) показані ізоповерхні міцності керамзитобетону після тепловологісної обробки. Слід зазначити, що середня витрата всіх складників бетону дає можливість одержання міцності від 14,5 до 20,5 МПа. У разі збільшення розчинного складника міцність збільшується.

Випробувані зразки після тепловологісної обробки й нормального твердіння мають приріст міцності у середньому 20%. На рис. 4 показаний вплив факторів складу на кубикову міцність керамзитобетону, випробуваного на 28-у добу. З підвищенням витрати в'язучого від 320 до 500 кг/м³ спостерігається приріст міцності до 23%.

Рис. 1. Вплив факторів складу на щільність суміші (а, б, в) у разі витрати цементу 250, 300, 350 кг/м³

Рис. 2. Вплив факторів складу на щільність бетону (а, б, в) у разі витрати цементу 250, 300, 350 кг/м³

Рис. 3. Вплив факторів складу на кубикову міцність після тепловологісної обробки (а, б, в) у разі витрати цементу відповідно 250, 300, 350 кг/м³

Рис. 4. Вплив факторів складу на кубикову міцність у віці бетону 28 дів (а, б, в) у разі витрати цементу відповідно 250, 300, 350 кг/м³

За максимальних витрат піску, керамзиту й золи міцність майже однакова (рис. 4). Ріст міцності помітний у разі збільшення витрат цементно-зольного в'язучого й керамзиту, чого не можна сказати про пісок.

За результатами експериментальних досліджень властивостей досліджуваного бетону з 95% надійністю отримана загальна ЕС-модель призмової міцності для віку пп., 28, 115 дів, яка за критерієм Фішера адекватна й несе інформаційну цінність:

$$\ln(f_{cd}) = 2,92 + 0,27x_1 - 0,09x_1^2 + 0,06x_1x_2 - 0,14x_2 + 0,16x_3 - 0,08x_3^2; \quad (6)$$

Рис. 5. Вплив факторів складу на призмову міцність керамзитобетону на цементно-зольному в'язучому

З діаграми можна помітити, що призмова міцність зростає у разі збільшення витрати в'язучого й відповідно віку бетону, а для агрегатно-структурного фактора дія на призмову міцність зворотна.

Рис. 6. Вплив факторів складу на модуль пружності керамзитобетону на цементно-зольному в'язучому

На підставі даних експериментальних досліджень властивостей керамзитобетону на

цементно-зольному в'язучому з 95% надійністю отримана загальна ЕС-модель початкового модуля пружності бетону для віку пп., 28, 115 діб, яка за критерієм Фішера адекватна й несе інформаційну цінність, дозволяє оцінити вплив вибраних факторів на модуль пружності бетону:

$$\ln(E_{cd}) = 2,58 + 0,14x_1 - 0,11x_1^2 + 0,07x_1x_2 - 0,05x_2 + 0,11x_3 - 0,03x_3^2; \quad (7)$$

З діаграми можна помітити таке: модуль пружності підвищується у разі збільшення витрати в'язучого, а для агрегатно-структурного фактора дія на нього зворотна, що спостерігається в моделі (7) по величині коефіцієнтів і по ізоповерхнях (рис. 6).

Висновки. У разі добору складу конструкційного керамзитобетону на цементно-зольному в'язучому застосований експериментально-розрахунковий метод, який включає дослідну перевірку й призначення складів досліджуваного бетону у разі заданих факторів.

Із застосуванням математико-статистичного методу планування експерименту розроблені раціональні склади конструкційного керамзитобетону на цементно-зольному в'язучому міцністю 15,2...26,2 МПа і середньою щільністю 1400...1700 кг/м³.

Отримані й проаналізовані рівняння регресії (2)...(7), які рекомендується використовувати для визначення міцності, щільності й модуля пружності керамзитобетону на цементно-зольному в'язучому.

За результатами дослідження кубикової міцності слід зазначити, що у разі заміни частки цементу на 20–35% золою міцність керамзитобетону на карбонатному піску й цементно-зольному в'язучому не зменшується.

Керамзитобетон на карбонатному піску й цементно-зольному в'язучому є ефективним місцевим матеріалом, придатним для використання в попередньо напружених конструкціях житлових і суспільних будинків.

Література

1. Дорофеев В.С. Влияние факторов состава на физико-механические свойства керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем / Дорофеев В.С., Столевич И.А., Зинченко С.В., Кравченко С.А., Столевич А.С. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса : Зовніш-рекламсервіс, 2009. № 34. С. 92–102.
2. Рекомендации по применению в бетонах золы, шлака и золошлаковой смеси тепловых электростанций. НИИЖБ. Москва : Стройиздат, 1986. 80 с.
3. Рекомендации по учету комплекса технологических и эксплуатационных параметров, оптимизирующих свойства конструкционного керамзитобетона на карбонатном песке. НИЛЭП ОИСИ. Москва : Стройиздат, 1989. 67 с.
4. Столевич А.С. Конструкционные лёгкие бетоны / А.С. Столевич, С.В. Макаров, И.А. Столевич, К.М. Мади, С.А. Кравченко. *Вісник ОДАБА* : зб. наук. праць. Одеса, 2006. Вип. 21. С. 246–255.

References

1. Dorofeev V.S. Vliyanie faktorov sostava na fiziko-mekhanicheskie svoystva keramzitobetona na mnogokomponentnom vjazzhushhem / Dorofeev V.S., Stolevich I.A., Zinchenko S.V., Kravchenko S.A., Stolevich A.S. Visnik Odes'koї derzhavnoyi akademiyi budivnictva ta arhitekturi. Odesa: Zovnishreklamservis, 2009. No. 34. S. 92–102.
2. Rekomendacii po primeneniju v betonah zoly, shlaka i zoloshlakovoj smesi teplovyh jelektrostantsij. NIIZhB. Moskva: Strojizdat, 1986. 80 s.
3. Rekomendacii po uchetu kompleksa tehnologicheskikh i jekspluatacionnyh parametrov, optimizirujushhih svoystva konstrukcionnogo keramzitobetona na karbonatnom peske. NILJeP OISI. Moskva: Strojizdat, 1989. 67 s.
4. Stolevich A.S. Konstrukcionnye ljogkie betony / A.S. Stolevich, S.V. Makarov, I.A. Stolevich, K.M. Madi, S.A. Kravchenko. Visnik ODABA : zb. nauk. prac'. Odesa, 2006. Vip.21. S. 246–255.

RESEARCH OF DURABILITY AND DEFORMATION PROPERTIES OF KERAMZITE CONCRETE ON CEMENT-ASH ASTRINGENT

Abstract. *The decision of modern building tasks and at the same time ecological, resource-saving and economic problems is possible through the application of local porous fillers and multicomponent astringent for making of concrete. Deadweight of load carrying structures from lightweight concretes to 1.5 times less than analogical constructions from heavy concretes.*

In this work, using the mathematical and statistical method of planning the experiment, rational compositions of structural expanded clay concrete based on a cement-ash astringent with a strength of 15.2 ... 26.2 MPa and an average density of 1400 ... 1700 kg/m³ have been developed.

Regression equations have been obtained and analyzed, which are recommended to be used to determine the strength, density and modulus of elasticity of expanded clay concrete on a cement-ash astringent.

The analysis of the regression equations showed that the consumption of carbonate sand and the consumption of expanded clay significantly affect the density of the expanded clay concrete mixture and the density of concrete, the consumption of fly ash has a lesser effect. The cubic strength of expanded clay concrete on carbonate sand is most influenced by the consumption of cement, ash and expanded clay. The strength of expanded clay concrete is linearly proportional to the consumption of cement and ash, but an increase in the consumption of cement increases the strength of concrete in compression to a certain limit.

It has been determined that the average consumption of all concrete constituents makes it possible to obtain strength from 14.5 to 20.5 MPa. With an increase in the solution component, the strength increases. The tested samples after heat and moisture treatment and normal hardening have an increase in strength by an average of 20%. With an increase in the consumption of the astringent from 320 to 500 kg/m³, an increase in strength is observed up to 23%. The prismatic strength increases with an increase in the consumption of the astringent and the age of concrete, and for the aggregate-structural factor, the effect on the prismatic strength is the opposite. The tested standards after warm-humidity treatment and normal hardening have an increase of durability on the average on 20%. With the increase of expense astringent from 320 to 500 kg/m³, there is an increase of durability to 23%. Prism durability increases at the increase of expense of astringent and age of concrete, and for an aggregate-structural factor, operating on prism durability is reverse.

The modulus of elasticity increases with increasing consumption of the astringent, and for the aggregate-structural factor, the effect on it is the opposite.

According to the results of the study of cubic strength, it should be noted that when replacing the proportion of cement by 20–35% ash, the strength of expanded clay concrete on carbonate sand and cement-ash astringent does not decrease.

Key words: *ceramsit concrete, cement-ash astringent, durability, modulus of elasticity, structures.*

Kravchenko S.A.

Ph.D., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Reinforced Concrete Structures and Transport Facilities,
Odesa State Academy of Construction and Architecture, Odesa

Posternak A.A.

Ph.D., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Reinforced Concrete Structures and Transport Facilities,
Odesa State Academy of Construction and Architecture, Odesa

Zinchenko S.V.

Ph.D., Assistant at the Department of Reinforced Concrete Structures and Transport Facilities,
Odesa State Academy of Construction and Architecture, Odesa

Ahaieva O.A.

Ph.D., Assistant at the Department of Reinforced Concrete Structures and Transport Facilities,
Odesa State Academy of Construction and Architecture, Odesa

Stolevich I.A.

Ph.D., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Strength of Materials,
Odesa State Academy of Construction and Architecture, Odesa