



УДК 624.012.35:624.072.221



ДВОРКІН Л.І.
Д-р технічних наук, проф.,
зав. каф., Національний
університет водного господарства
та природокористування,
м. Рівне, Україна,
e-mail: dvorkin.leonid@gmail.com
тел. +38 (068) 353-33-38
ORCID: 0000-0001-8759-6318



ЖИТКОВСЬКИЙ В.В.
Канд. технічних наук, доц.,
Національний університет
водного господарства та
природокористування,
м. Рівне, Україна,
e-mail: zhitk@ukr.net,
тел. +38 (096) 564-00-27
ORCID: 0000-0003-1710-6082



СКРИПНИК М.М.
Аспірант, Національний
університет водного господарства
та природокористування,
м. Рівне, Україна,
e-mail: sk.mykola@gmail.com,
тел. +38 (096) 655-88-18
ORCID: 0000-0003-4947-3477

ВИСОКОМІЦНИЙ ДРІБНОЗЕРНИСТИЙ БЕТОН НА ВІДСІВАХ ПОДРІБНЕННЯ ГРАНІТУ

АНОТАЦІЯ

У статті досліджено застосування гранітних відсівів, що містять пиловату фракцію як заповнювача для високоміцного дрібнозернистого бетону. Експериментально обґрунтовано позитивний вплив фракції відсіву розміром менше 0,16 мм як активного наповнювача бетону, що сприяє підвищенню його міцності при введенні в бетонну суміш суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу. На основі отриманих математичних моделей запропоновано методологію проектування складів бетону із застосуванням гранітних відсівів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: гранітні відсівы, полікарбоксилатний суперпластифікатор, наповнювач, пиловаті частинки, метакаолін, мікрокремнезем, міцність, експериментально-статистичні моделі, проектування складу.

HIGH-STRENGTH FINE-GRAINED CONCRETE WITH GRANITE CRUSHING SIFTINGS

DVORKIN L.Yo. Dr, Prof., Head of Department, National University of Water Management and Nature Resources Use,

Rivne, Ukraine,
e-mail: l.i.dvorkin@nuwm.edu.ua,

tel. +38 (068) 353-33-38,

ORCID: 0000-0001-8759-6318

ZHYTKOVSKYY V.V. PhD, Ass. Prof., National University of Water Management and Nature

Resources Use,
Rivne, Ukraine,

e-mail: zhitk@ukr.net,

тел. +38 (096) 564-00-27,

ORCID: 0000-0003-1710-6082

SKRYPNYK M.M. PG student, National University of Water Management and Nature Resources Use,

Rivne, Ukraine,

e-mail: sk.mykola@gmail.com,

тел. +38 (096) 655-88-18,

ORCID: 0000-0003-4947-3477

ABSTRACT

The article shows the possibility of using granite siftings containing a dust fraction as a filler for high-strength fine-grained concrete.

The positive effect of the siftings fraction with a particle size of less than 0.16 mm is experimentally justified as an active filler of concrete, which contributes to its strength increase when introducing polycarboxylate type superplasticizers into the concrete mixture. The effectiveness of different types of polycarboxylate superplasticizers for obtaining high-strength concretes on granite siftings has been studied.

The possibility of enhancing the positive effect of silty particles contained in siftings with the additional introduction of highly active additives of metakaolin and microsilica is shown. The optimal number of superplasticizers is established, which ensures the



maximum effectiveness of mineral additives.

With the help of mathematical planning, a set of adequate experimental and statistical models of water demand and strength characteristics of fine-grained concrete was obtained, which allows to quantitatively evaluate the effect of the consumption of superplasticizer and filler additives, as well as their optimum content, ensuring the production of high-strength concretes. A quantitative and qualitative analysis of the investigated factors and their interactions is carried out. Based on the obtained models, the coefficients of cementing efficiency of various types of mineral fillers were calculated and their interrelation with the superplasticizer consumption was shown. A technique for designing the composition of concrete mixtures for the production of high-strength fine-grained concrete on granite siftings is proposed, which provides the necessary strength characteristics of concrete, the water demand of the concrete mix and takes into account the amount of polycarboxylate superplasticizer, active mineral additive, and the content of silty impurities in the crushing siftings. An example of designing a composition of high-strength fine-grained concrete is considered.

KEY WORDS: granite siftings, polycarboxylate superplasticizer, filler, dust particles, metakaolin, microsilica, strength, experimental-statistical models, design of composition.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Однією з найбільш актуальних проблем промислового комплексу та будівельної галузі України є забезпечення раціонального застосування матеріалів та енергоресурсів. Ефективним шляхом вирішення цієї проблеми є комплексне безвідходне застосування природної сировини. До 50 % матеріальних ресурсів, що споживає будівельна галузь, припадає на продукцію промислових нерудних матеріалів (щебінь та пісок).

Технологія переробки природного каменю на кінцеві продукти супроводжується виходом 25-30% відходів кам'яних відсівів подрібнення гірських порід. Частково ці відходи використовують у дорожньому будівництві. Впроваджуються також технології збагачення відсівів і вироблення на їх основі штучного піску. Велику кількість відсівів направляють у відвали. Досить потужні відвали відсівів накопичені на кар'єрах Рівненської обл.

Поряд з цим будівельна галузь відчуває гостру потребу в кондиційних заповнювачах. Зокрема, в Рівненській області піски для бетонів і розчинів переважно дрібні, що викликає значну перевитрату цементу при виготовленні бетону.

Важливою проблемою є забезпечення будівництва високоміцними бетонами, що відповідають класам за міцністю С60-С80. Такі бетони особливо необхідні для споруд спеціального призначення (тунелі, мостові конструкції, тощо). Зазвичай отримання бетонів підвищеної міцності пов'язане з необхідністю використан-

ня високоякісних заповнювачів, що характеризуються високою міцністю зерен, та забезпечують мінімальні водопотребу та пустотність. Тому, розроблення технології отримання високоміцних бетонів на некондиційних заповнювачах із відходів (відсівах подрібнення гірських порід) є досить актуальним.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ПУБЛІКАЦІЙ

Відсіви подрібнення гірських порід є найбільш розповсюдженим і крупнотонажним відходом каменеподрібнення, вихід яких становить близько 25% від маси вихідної сировини. На території Рівненської та сусідніх областей (Хмельницької та Житомирської) утворюються каменеобробувальними підприємствами і накопичуються у відвалах відсіви граніту, grano-діориту та базальту [1]. За зерновим складом основна маса відсівів являє собою подрібнений пісок із розмірами частинок від 0 до 5 мм з модулем крупності 2,8-3,6. У зв'язку з тим, що деякі підприємства виготовляють збагачені (фракціоновані) відсіви з розмірами зерен (0,63-2,5) мм, (2,5-5) мм чи інших, відходи можуть мати розмір частинок (0-0,63) мм, (0-2,5) мм [2].

Відсіви подрібнення характеризуються підвищеним вмістом частинок менше 0,16 мм (до 20%). Ці частинки здебільшого представлені дисперсною фракцією вихідної породи, однак можуть містити і домішки супутніх порід (наприклад, глини). Частинки менше 0,16 мм викликають підвищення водопотреби бетонної суміші та, відповідно, водоцементного відношення (В/Ц) бетону, тому на міцність впливають негативно. Значна кількість досліджень свідчить про негативний вплив цих частинок на властивості бетонних сумішей (підвищення водопотреби, зменшення легкоукладальності) [3], тому перспективним вважається використання відсівів після додаткової переробки – збагачення з виділенням частинок менше 0,16 мм, а в деяких випадках також частинок менше 0,315 мм. Однак за деякими даними міцність бетонів на відсівах подрібнення практично не відрізняється від міцності бетону на природному кварцовому піску [4].

Дані деяких дослідників [4] свідчать, що високодисперсна фракція, що міститься у відсівах щебеню, також може чинити позитивний вплив на структуру і властивості цементного каменю. Зокрема, отримання легкоукладальних сумішей і сумішей, що не розшаровуються на відсівах подрібнення, можливо лише при наявності підвищеної кількості дрібних фракцій [5], або за рахунок введення дрібних чи дуже дрібних пісків. Також, підвищений вміст частинок менше 0,16 мм у ряді випадків може впливати позитивно, як активний мінеральний наповнювач [6]. Такий ефект більш помітний у випадку нейтралізації негативного впливу дисперсних частинок на водопотребу, наприклад, шляхом



введення добавок-суперпластифікаторів. Так, отримані склади бетонів марок С15-С40 із пластифікуючими добавками на незбагачених відсівах подрібнення гранітів у суміші з дрібним піском в присутності пластифікатора витримали 500 циклів заморожування і відтавання без ознак руйнування і зниження маси за міцністю [6]. Таким чином, підвищена водопотреба може бути компенсована за рахунок застосування пластифікуючих добавок, у багатьох випадках без таких добавок застосування відсівів у бетоні є не раціональним [7]. Особливу ефективність, у цьому випадку, можуть показати суперпластифікатори полікарбоксилатного типу, для яких характерний водоредуруючий ефект (на 20-30%).

Зважаючи на те, що одним із найважливіших факторів для отримання високоміцних бетонів, здатних забезпечити і механічні властивості, і довговічність конструкції, є низьке (в межах 0,25-0,35) водоцементне відношення (В/Ц). При забезпеченні необхідних значень В/Ц, можливе отримання бетонів підвищеної міцності і на заповнювачах нижчої якості при деякій нейтралізації негативного впливу пилюватих частинок на водопотребу. Таким чином, як показують дослідження [6], раціональне застосування відсівів подрібнення одночасно з сучасними методами зниження водопотреби бетонних сумішей дає можливість використовувати їх для отримання навіть високоміцних бетонів і може перетворити відсіви на цінний продукт, здатний забезпечити необхідні вимоги до бетону.

МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою досліджень є визначення технологічних параметрів, що забезпечують отримання високоміцних бетонів при використанні як основного заповнювача відсівів подрібнення вивержених гірських порід, що містять значну кількість пилюватих зерен та розроблення методології проектування складів високоміцних бетонів на відсівах.

Задачі дослідження:

- вивчити вплив хімічних та мінеральних добавок на властивості бетонних сумішей та міцність бетону;
- отримати математичні моделі водопотреби бетонної суміші та міцності бетону у різному віці, що враховують особливості впливу відсівів подрібнення та вмісту добавок;
- розробити методологію проектування складу

бетонів на основі отриманих математичних моделей.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У досліджах використовували портландцемент ПЦ І-А-500, полікарбоксилатні суперпластифікатори Melflux 2651F і Sika Viscocrete 225P (табл. 1), а також високоактивні мінеральні добавки – метакаолін (ООО "Західна каолінова компанія") та мікрокремнезем (відхід виробництва Стаханівського заводу феросплавів). Для коригування зернового складу незбагачених відсівів з $M_{кр}=3,23$ та вмістом частинок $<0,16$ мм 17% до них добавляли пісок з відсівів фракції (2,5-5) мм у кількості 20%.

Бетони характеризувались однаковим масовим співвідношенням кількості заповнювача і цементу (З/Ц=3). Рухомість бетонної суміші змінювали у межах марки Р3 (9-15) см. Визначали міцність бетону при стиску у віці 3, 7, 28 діб шляхом випробувань зразків-кубів (100×100×100) мм. Результати випробувань представлено в табл. 1.

Максимальні значення міцності при стиску дрібнозернистого бетону на гранітних відсівах, що отримані в результаті експериментів, склали (85-90) МПа. Найбільш впливовим фактором, що забезпечує отримання підвищеної міцності, виявилось низьке В/Ц бетону (0,32-0,37), що досягається при використанні суперпластифікаторів. Так, при введенні добавки Melflux 2651F у кількості 0,5% від маси цементу задана рухомість бетонної суміші була досягнута при В/Ц = 0,32, а в сумішах з добавкою Sika Viscocrete 225P (0,5%) – при В/Ц = 0,34. Значення міцності у віці 28 діб для зазначених добавок становили – 78 і 76 МПа, відповідно. Введення високоактивних мінеральних добавок (метакаоліну і мікрокремнезему) при незмінній кількості суперпластифікатора (Melflux 2651F) підвищило В/Ц (до 0,37 і 0,35, відповідно). Підвищення водопотреби бетонних сумішей мінеральними добавками практично не спостерігалось при збільшенні вмісту суперпластифікатора до

Таблиця 1. Вплив добавок на міцність дрібнозернистих бетонів на гранітних відсівах

№ серії	Суперпластифікатор, мас. %	Мінеральна добавка, мас. %	Водоцементне відношення	Осадка конуса, см	Міцність при стиску (МПа), у віці (діб)		
					3	7	28
0	-	-	0,5	12	25	34	45
1	Melflux 2651F, 0,5%	-	0,32	12	63	71	78
2	Sika VC 225P, 0,5%	-	0,34	14	45	69	76
3	Melflux 2651F, 0,5%	метакаолін, 5%	0,37	12	43	48	53
4	Melflux 2651F, 0,5%	мікрокремнезем, 5%	0,35	13	40	56	62
5	Melflux 2651F, 1%	метакаолін, 5%	0,35	13	60	75	85
6	Melflux 2651F, 1%	мікрокремнезем, 5%	0,33	14	58	80	90



1%. Підвищення міцності бетону, що викликане високоактивними мінеральними добавками при низьких значеннях В/Ц, підтверджують дані [8].

Для кількісного оцінювання впливу факторів складу на властивості високоміцного дрібнозернистого бетону на гранітних відсівах були реалізовані алгоритмізовані досліди за планом ВЗ [9]. В якості варійованих факторів вибрані: витрата суперпластифікатора полікарбоксилатного типу Mellflux 2651f ($D, \%$ (x_1)), вміст частинок менше 0,16 мм у відсівах ($m_{0,16}, \%$ (x_2)), витрата метакаоліну (МК, % (x_3)). Умови планування експериментів приведені в табл. 2. В дослідях використовували відсіви з відкоригованим зерновим складом. Склад бетону, за виключенням варійованих добавок, при проведенні експериментів був прийнятий постійним ($\rho = 545 \text{ кг/м}^3$, $Z = 1640 \text{ кг/м}^3$). Визначали такі параметри: В/Ц бетонної суміші, що необхідне для досягнення марки за рухомістю Р4 (ОК=16-21 см) і границя міцності бетону при стиску у віці 1 (f_c^1) і 28 (f_c^{28}) діб.

Рівняння регресії для зазначених параметрів залежно від значення варійованих факторів мають вид:

$$B/C = 0,35 - 0,079x_1 + 0,02x_2 + 0,052x_3 + 0,026x_1^2 - 0,014x_2^2 + 0,011x_3^2 - 0,018x_1x_2 - 0,03x_1x_3 + 0,003x_2x_3; (1)$$

$$f_c^1 = 21,99 + 2,71x_1 + 0,34x_2 + 0,19x_3 - 0,828x_1^2 + 0,022x_2^2 - 2,37x_3^2 + 0,538x_1x_2 - 0,063x_1x_3 - 0,113x_2x_3; (2)$$

$$f_c^{28} = 64 + 6,64x_1 + 2,7x_2 + 6,3x_3 - 1,1x_1^2 - 4,724x_2^2 - 8,326x_3^2 + 4,1x_1x_2 + 6,8x_1x_3 - 4,0x_2x_3. (3)$$

Усі варійовані фактори, як слідує з аналізу рівнянь (1 і 2), викликають суттєві зміни водопотреби бетонної суміші і, як наслідок, В/Ц і міцності бетону. За величиною досягнутого ефекту фактори можна проранжувати у послідовності:

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

Найбільш значними взаємодіями факторів у рівнянні (1) є «витрата суперпластифікатора – вміст метакаоліну» і «витрата суперпластифікатора – вміст частинок <0,16 мм», що підтверджують можливість нівелювання негативного впли-

Таблиця 2. Умови планування експериментів для отримання рівнянь (1-3)

№ з/п	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	Натуральний вид	Кодований	-1	0	1	
1	витрата суперпластифікатора Mellflux 2651F, ($D, \%$)	x_1	0	0,35	0,7	0,35
2	вміст частинок менше 0,16 мм у відсівах ($m_{0,16}, \%$)	x_2	0	6	12	6
3	вміст метакаоліну (МК, %)	x_3	0	4	8	4

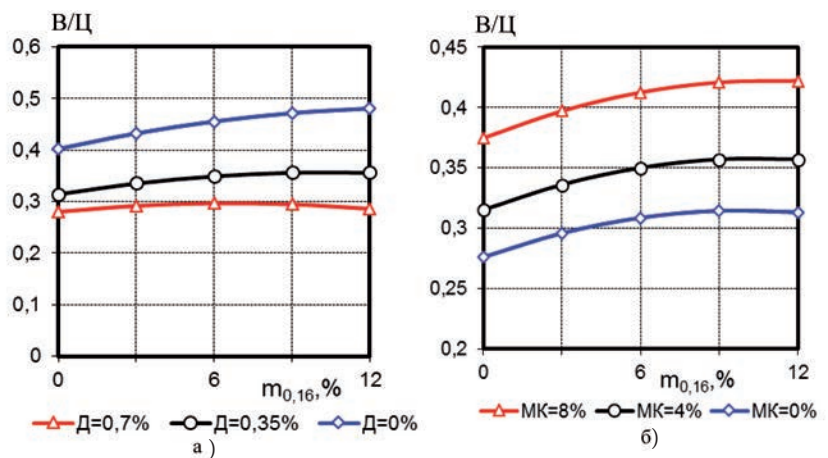


Рис. 1. Залежність водоцементного відношення бетону від: вмісту частинок <0,16 та вмісту суперпластифікатора (а); вмісту частинок <0,16 та вмісту метакаоліну (б)

ву у відсівах дисперсних частинок за рахунок суперпластифікатора при низьких значеннях В/Ц (рис. 1).

Графічні залежності (рис. 2), що отримані аналізом відповідної експериментально-статистичної моделі, свідчать про можливість отримання при заданих умовах дрібнозернистого бетону на гранітних відсівах з максимальною міцністю у віці 28 діб 72-75 МПа. Максимальне підвищення міцності спостерігається при оптимальних значеннях факторів x_1 і x_2 . При

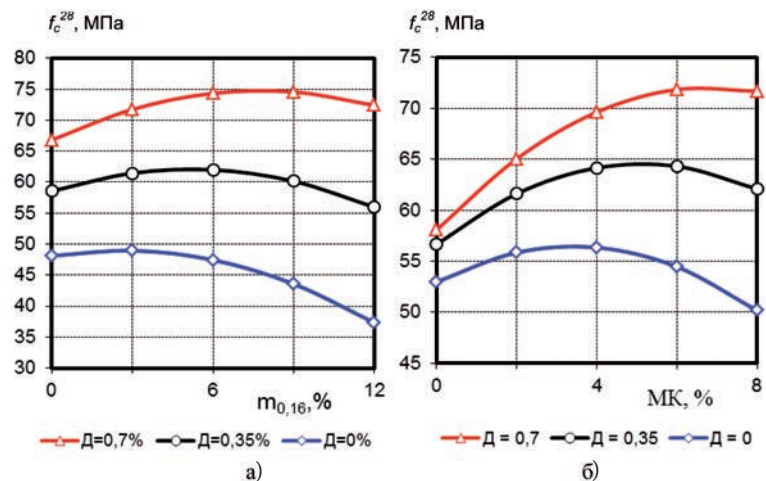


Рис. 2. Залежність міцності дрібнозернистого бетону у віці 28 діб від кількості суперпластифікатора і вмісту частинок <0,16 мм у відсівах (а), метакаоліну (б)



цьому ефект зміни фактора x_2 вмісту частинок $< 0,16$ мм у варійованих границях майже у 2 рази менше ніж витрати суперпластифікатора. Збільшення вмісту суперпластифікатора (x_1) призводить до практично лінійного зростання міцності, що, в основному, відповідає характеру зміни досягнутого Ц/В бетонної суміші. Для факторів x_2 і x_3 (вплив дисперсних мінеральних наповнювачів) характерна наявність у рівняннях міцності суттєвих квадратичних ефектів зі знаком «-», що свідчить про наявність граничної області їх ефективної дії. Зі збільшенням вмісту суперпластифікатора ефект дисперсних мінеральних компонентів (гранітного пилу і метакаооліну) суттєво зростає. В складах, що не містять добавку суперпластифікатора, збільшення частинок $< 0,16$ мм у відсівах до (4-5)% практично не впливає на міцність бетону. При подальшому підвищенні вмісту пиловидних частинок міцність знижується на (23-25)%.

Введення добавки Melflux 2651F сприяє позитивному впливу гранітного наповнювача, що викликає при оптимальному поєднанні факторів підвищення міцності бетону на (12-16)%. Ефективний вміст гранітного пилу у відсівах зростає зі збільшенням вмісту суперпластифікатора: при вмісті добавки Melflux 2651F 0,35% позитивний ефект зберігається до (6-7)% вмісту пилу, при максимальному вмісті Melflux 2651F (0,7% від маси цементу) – до (8-9)% вмісту пилу. Метакаоолін (фактор x_3), внаслідок високої дисперсності і пуцоланової активності, забезпечує більшу ефективність ніж гранітний пил. Підвищення міцності дрібнозернистого бетону за рахунок метакаооліну становить (35-38)%, що узгоджується з відомими даними [10]. Як і для пиловатої фракції відсівів, ефективність добавки метакаооліну суттєво зростає при введенні суперпластифікатора, хоча підвищення міцності до (8-10)% спостерігається і для непластифікованих сумішей.

Ефект взаємодії факторів (x_2 і x_3) у рівняннях (1)-(3), що характеризують вміст наповнювачів, негативний, що свідчить про зниження їх ефективності при одночасному збільшенні вмісту метакаооліну і кількості гранітних частинок $< 0,16$ мм. У цьому випадку помітне суттєве підвищення водопотреби суміші, що не вдається нейтралізувати за рахунок стеричного ефекту полікарбоксилатного суперпластифікатора при визначеній його кількості. Для проявлення максимального ефекту метакаооліну при отриманні високоміцного дрібнозернистого бетону на гранітних відсівах необхідно, щоб вміст частинок $< 0,16$ мм у відсівах не перевищував (4-5)%, що, узгоджується з вимогами чинного національного стандарту [11].

Найбільшим впливом на досягнення максимальної ранньої міцності (у віці 1 доби) відрізняється фактор x_1 (вміст

суперпластифікатора), вплив інших факторів незначний, він проявляється практично тільки при максимальній кількості пластифікуючої добавки.

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

Отримані експериментально-статистичні моделі (1-3) дають можливість запропонувати методику розрахунку високоміцного дрібнозернистого бетону з використанням як заповнювача гранітних відсівів.

Для розрахунку Ц/В, що забезпечує задану границю міцності бетону при стиску у певному віці можна використати модифіковане рівняння [12], що враховує вплив активних мінеральних наповнювачів:

$$f_{cm} = AR_y \left(\left(\frac{C}{V} \right)_{np} - b \right), \quad (4)$$

де:

A – коефіцієнт, що враховує якість заповнювача,
 b – коефіцієнт, що враховує тип бетонної суміші (табл. 3),

$\left(\frac{C}{V} \right)_{np}$ – приведені Ц/В бетону, що враховує кількість і активність мінерального наповнювача.
 $\left(\frac{C}{V} \right)_{np}$ розраховується за формулою:

$$\left(\frac{C}{V} \right)_{np} = \frac{C + K_{ч.е.} \cdot H}{V}, \quad (5)$$

де:

C, V, H – витрати (кг/м³) цементу, води і мінерального наповнювача, відповідно,

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

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

Показник $K_{ч.е.}$ залежить від особливостей (хіміко-мінералогічного складу, дисперсності, гідравлічної активності) наповнювачів, що застосовуються, і зазвичай визначається експериментально. Отримані математичні моделі міцності високоміцного дрібнозернистого бе-

Таблиця 3. Усереднені значення коефіцієнтів рівняння (4)

Характеристика якості заповнювача	Рухомі бетонні суміші	Жорсткі бетонні суміші
висока	$A=0,52$ $b=0,65$	$A=0,52$ $b=0,55$
середня	$A=0,48$ $b=0,65$	$A=0,48$ $b=0,55$
низька	$A=0,44$ $b=0,65$	$A=0,44$ $b=0,55$



тону на гранітних відсівах із застосуванням метакаоліну і ефективного полікарбоксилатного суперпластифікатора (2, 3) дозволили розрахувати відповідні значення $K_{ц.е}$ (табл. 4).

Для визначення витрати води у високоміцному дрібнозернистому бетоні була побудована номограма, що враховувала вплив суперпластифікатора, активної мінеральної добавки і вмісту частинок $<0,16$ мм (рис. 3).

Витрати цементу знаходимо з виразів:

– без застосування мінеральних наповнювачів:

$$Ц = (Ц / В) \cdot В, \quad (6)$$

– із застосуванням мінеральних наповнювачів:

$$Ц = (Ц / В)_{np} \cdot В - K_{ц.е} \cdot Н, \quad (7)$$

де:

$Ц, В, Н$ – витрати ($\text{кг}/\text{м}^3$) цементу, води і мінерального наповнювача, відповідно,

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

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

Приклад. Розрахувати склад дрібнозернистого бетону класу за міцністю при стиску В60. Рухомість суміші – Р4 (15-21 см). Матеріали: портландцемент СЕМ І 42,5 (активність цементу $R_{ц} = 50$ МПа, дійсна густина $\rho_{ц} = 3,1$ $\text{г}/\text{см}^3$), гранітний відсів із вмістом пилюватих частинок 10%, (дійсна густина $\rho_{з} = 2,7$ $\text{г}/\text{см}^3$), суперпластифікатор Melflux 2651F.

1. Розраховуємо необхідну середню міцність бетону при стиску у віці 28 діб, що забезпечує клас бетону В60 (при нормативному коефіцієнті варіації 13,5%). З цією метою використовуємо формулу (8):

$$f_{cm}^{28} = В \left(1 - 1,64 \cdot \frac{C_v}{100} \right), \quad (8)$$

де:

C_v – коефіцієнт варіації, %.

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

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

Таблиця 4. Розрахунково-експериментальні значення коефіцієнтів цементуючої ефективності метакаоліну і пилу гранітних відсівів при використанні полікарбоксилатного суперпластифікатора

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

Кількість суперпластифікатора, %

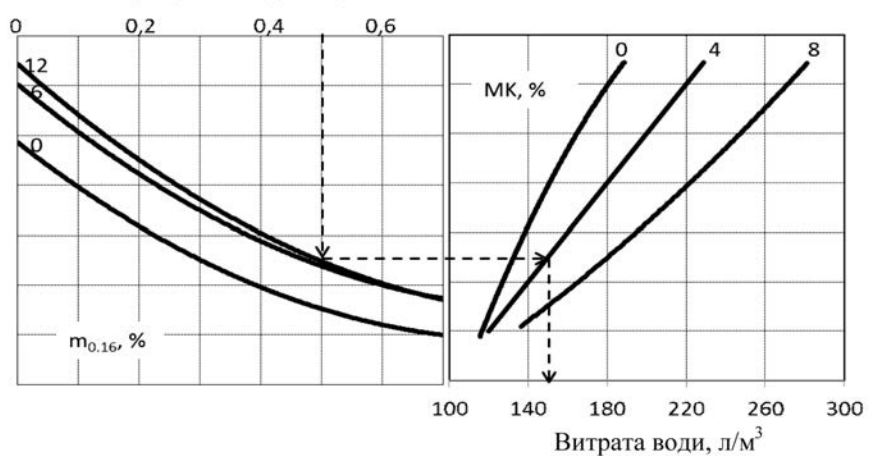


Рис. 3. Номограма для визначення витрати води для дрібнозернистого бетону з використанням гранітних відсівів (ОК=15-21 см)

низької якості при відповідній рухомості суміші (табл. 3).

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

$$(Ц / В)_{np} = \left(\frac{f_{cm}^{28}}{0,44 R_{ц}} \right) + 0,65 =$$

$$= \left(\frac{77,1}{0,44 \cdot 50} \right) + 0,65 = 4,16.$$

3. За номограмою (рис. 3) знаходимо витрату води, враховуючи кількість пилюватих частинок у відсівах $В = 185$ $\text{л}/\text{м}^3$.
4. За формулою (6), знаючи витрату води і $(Ц/В)_{np}$ знаходимо витрату цементу без врахування наповнювача:

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

5. За формулами (8), (9), (10) знаходимо об'єм цементного тіста, об'єм і масу заповнювача:

$$V_{ц.м.} = \frac{Ц}{\rho_{ц}} + В = \frac{768}{3,1} + 185 = 433 \text{ л;}$$



$$V_3 = 1000 - 433 = 567 \text{ л};$$

$$Z = 567 \cdot 2,7 = 1531 \text{ кг} / \text{м}^3.$$

6. Проводимо уточнення складу високоміцного дрібнозернистого бетону при використанні суперпластифікатора Melflux 2651F і враховуємо дисперсну фракцію відсівів як мінеральний наповнювач:
- 6.1. Знаходимо орієнтовну кількість дисперсної фракції відсівів (10% від кількості заповнювача):

$$H = 0,01 \cdot Z = 0,01 \cdot 1531 = 153 \text{ кг}.$$

- 6.2. За номограмою (рис. 3) знаходимо витрату води, що забезпечує задану рухомість, підбираючи ефективну кількість суперпластифікатора.

При кількості суперпластифікатора 0,5% від маси цементу потрібна витрата води складає 135 л.

За табл. 4 знаходимо коефіцієнт цементуючої ефективності для пилюватої фракції відсівів при прийнятій кількості суперпластифікатора: $K_{ц.е.} = 0,35$.

- 6.3. Приймаючи вміст мінерального наповнювача (H) 153 кг/м³ за формулою (7) розраховуємо уточнену витрату цементу:

$$\begin{aligned} \text{Ц} &= (\text{Ц} / \text{В})_{\text{нр}} \cdot \text{В} - K_{ц.е.} \cdot \text{H} = \\ &= 4,16 \cdot 135 - 0,35 \cdot 153 = 508 \text{ кг} / \text{м}^3. \end{aligned}$$

- 6.4. Знаходимо витрату заповнювача:

$$V_{ц.м.} = \frac{\text{Ц}}{\rho_{ц.м.}} + \text{В} = \frac{768}{3,1} + 185 = 433 \text{ л};$$

$$V_3 = 1000 - 433 = 567 \text{ л};$$

$$Z = 567 \cdot 2,7 = 1531 \text{ кг} / \text{м}^3.$$

Розрахунковий склад бетону на 1 м³ становить:

- цемент – 508 кг;
- заповнювач (відсів) – 1893 кг;
- вода – 135 л;
- суперпластифікатор – 2,54 кг.

ВИСНОВКИ

1. Експериментально встановлено, що при використанні суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу і додатковому введенні високоактивних мінеральних добавок можна отримати високоміцні дрібнозернисті бетони класів за міцністю до С50/60 з використанням як основного заповнювача гранітних відсівів.
2. На основі отриманих експериментально-статистичних моделей розроблено

методологію, що дає можливість розрахувати склад високоміцного дрібнозернистого бетону з використанням гранітних відсівів як основного заповнювача.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Доповідь про стан навколишнього природного середовища в Рівненській області у 2011 році / Державне управління охорони навколишнього природного середовища. – Рівне, 2011. – 208 с.
2. Использование отсевов дробления изверженных горных пород при производстве щебня / [Нисневич М.Л., Легкая Л.П., Торлопова Г.Б. и др.] // Строительные материалы. – 1982. – № 6. – С. 6–7.
3. Павленко С.И. Мелкозернистые бетоны из отходов промышленности / С.И. Павленко. Учеб. пос. – М.: АСВ, 1997. – 176 с.
4. Пritула С.Ф. Снижение расходов цемента в бетонах при использовании добавок отсева / С.Ф. Пritула // Изв. вузов. Строительство. – 1993. – № 2. – С. 50 – 53.
5. Шейкин А.М. Применение мелких и очень мелких песков в цементном бетоне / А.М. Шейкин // Автомобильные дороги. – 1985. - № 5. - С. - 12-14.
6. Левин Л.И. Применение отсевов дробления в бетонах с эффективными пластификаторами / Л.И. Левин, В.Н. Тарасова, Левина Е.И. // Малоотходная технология при производстве нерудных строительных материалов и облицовочных материалов из природного камня. Материалы семинара. – М.: МДНТП. – 1987. – С. 128 – 134.
7. Ланге Ю.Г. Технология применения в цементобетоне песков с повышенным содержанием тонкодисперсных частиц / Ю.Г. Ланге // Автомобильные дороги. – 1995. - №12. - С. 18 – 20.
8. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны / В.Г. Батраков. - М.: Стройиздат, 1990. – 400 с.
9. Вознесенский В.А. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Б.Л. Огарков ; ред. В.А. Вознесенский. - Киев : Вища школа, 1989. - 327 с.
10. Caldarone M.A., Gruber K.A., Burg R.G. High-reactivity metakaolin: a new generation mineral admixture // Conc. Int. – 1994. – № 11. - P. 37-40.
11. Пісок із відсівів дроблення вивержених гірських порід для будівельних робіт. Технічні умови: ДСТУ Б В.2.7-210:2010. – [Чинний від 2011-08-01]. – Київ:



ДП «Укранархбудінформ», 2011. – III, 13 с. – (Національний стандарт України).

12. Дворкин Л.И. Расчетное прогнозирование свойств и проектирование составов бетона / Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. - М.: Инфра-Инженерия, 2016. - 386 с.

REFERENCES

1. Dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha v Rivnenskkii oblasti u 2011 rotsi [Report on the state of the environment of Rivne region in 2011]. DUONPS. – 208 p.
2. M. Nysnevych, L. Lehkaia, H. Torlopova. (1982). Yspolzovanye otsefov droblenya yzverzhennykh hornykh porod pry proyzvodstve shchebniya. [The use crushed siftings of igneous rocks in the stone production]. Stroytelnye materyaly. #6 – 6-7 p.
3. S. Pavlenko (1997). Melkozernistye betony iz othodov promyshlennosti [Fine-grained concrete from waste industry]. - M.: ASV. - 176 p.
4. S. Pritula (1993). Snizhenie rashodov cementa v betonah pri ispol'zovanii dobavok otseva [Reducing the consumption of cement in concrete by using dropout supplements]. Izv. vuzov. Stroitel'stvo. #2. – 50 – 53 p.
5. A. Shejkin (1985). Primeneniya melkih i ochen' melkih peskov v cementnom betone. [The use of fine and very fine sand in the cement concrete]. Avtomobil'nye dorogi. № 5. – 12-14 p.
6. L. Levin, V. Tarasova, E. Levina (1987). Primenenie otsefov drobleniya v betonah s jeffektivnymi plastifikatorami. [The use crushed siftings in concrete with effective plasticizers]. Maloothodnaya tehnologiya pri proizvodstve nerudnih stroitel'nyh materialov i oblicovochnyh materialov iz prirodnogo kamnja. Materialy seminaru. – M.: MDNTP. – 1987. – S. 128 – 134.
7. Ju. Lange (1995). Tehnologiya primineniya v cementobetonne peskov s povyshennym sodержaniem tonkodispersnyh chastic. [Technology of application in cement concrete of sands with an increased content of fine particles]. Avtomobil'nye dorogi. #12 – 18–20 p.
8. V. Batrakov (1990). Modificirovannyye betony. [Modified Concretes]. - M.: Strojizdat.– 400 p.
9. V. Voznesenskij, T. Ljashhenko, B. Ogarkov (1989). Chislennyye metody resheniya stroitel'no-tehnologicheskikh zadach na JeVM. [Numerical methods for solving construction-technological problems on a computer]. red. V. A. Voznesenskij. - Kiev: Vishha shkola - 327 p.
10. M. Caldarone, K. Gruber, R. Burg (1994). High-reactivity metakaolin: a new generation mineral admixture // Conc. Int. – № 11. - 37-40 p.

11. Pisok iz vidsiviv droblennja viverzhenih girs'kih porid dlja budivel'nih robot. Tehnichni umovi: DSTU B V.2.7-210:2010 [Sand from the crushed siftings of eruptive rocks for construction work. Specifications]. – [Chunnyi vid 2011-08-01]. – Kyiv: DP “Ukrarhbudinform”, 2011. – III, 13 s. – (Nathionalnyi standart of Ukraine).

12. L. Dvorkin, O. Dvorkin (2016). Raschetnoe prognozirovanie svojstv i proektirovanie sostavov betona [Estimated forecasting of properties and design of concrete compositions].- M.: Infra-Inzhenerija. - 386 p.

Стаття надійшла до редакції 10.08.2017р.