

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ВІБРОПРЕСУВАННЯ НА ОТРИМАННЯ ВИСОКОМІЦНИХ ДРІБНОЗЕРНИСТИХ БЕТОНІВ НА ОСНОВІ НАДЖОРСТКИХ СУМІШЕЙ

INFLUENCE OF VIBROPRESSING PARAMETERS ON OBTAINING HIGH-STRENGTH FINE-GRAIN CONCRETE BASED ON SEMI-DRY MIXTURES

Житковський В.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-1710-6082, Дворкін Л.Й., д.т.н., професор, ORCID:0000-0001-8759-6318, (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Zhitkovsky V.V., candidate of technical sciences, associate professor, ORCID: 0000-0003-1710-6082, Dvorkin L.J., doctor of technical sciences, professor, ORCID: 0000-0001-8759-6318, (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

У статті наведено результати вивчення впливу частоти, тривалості та величини динамічного тиску на ущільнення дрібнозернистих бетонів. Показано можливість отримання бетону з наджорстких сумішей міцністю більше 90 МПа за рахунок оптимального вибору складу бетону, частоти вібрування та величини привантаження.

The paper presents the results of studying the influence of frequency, duration and magnitude of dynamic pressure on the compaction of fine-grained concrete with high strength characteristics such as ultra-high-performance concrete and reactive-powder concrete. The influence of mixture moisture on the compaction coefficient and strength of such concrete is established. The influence of concrete composition, frequency and duration on the ability of mixtures to compact during vibropressing has been studied. The relationship between the content of dispersed components in the concrete mixture and the vibropressing frequency, as well as the magnitude of inertial loading, in relation to the impact on the compaction and strength of concrete. The possibility of obtaining vibropressed fine-grained concrete from superrigid (semi-dry) mixes with a strength of more than 90 MPa due to the optimal choice of concrete composition, vibration frequency and load size is shown. Obtaining ultra-high-strength reaction-powder concrete is possible due to the treatment of ultra-hard mixtures at $W/C = 0.18...0.2$ high-frequency vibration effects of high intensity with the simultaneous action of loading (pressure) $0.06...0.1$ MPa.

Ключові слова:

ультра високоякісний бетон, реакційно-порошковий бетон, частота вібрації, пресування, наджорсткі суміші
ultra high-performance concrete, reactive-powder concrete, vibration frequency, pressing, semi-dry mixes

Вступ. Для зведення відповідальних споруд у світі все більше використовують бетони нового покоління типу УНРС (ультра високоякісні бетони) чи RPC (реакційно-порошкові бетони)[1]. Такі бетони зазвичай володіють високими механічними властивостями і довговічністю, а також високою текучістю бетонних сумішей. Низьке водов'язуче відношення, суттєвий вміст в'язучого, відсутність крупного заповнювача і можливість дисперсного армування відрізняють УНРС і RPC від звичайного бетону[2]. Підвищені міцнісні характеристики і довговічність таких зазвичай досягаються завдяки оптимізованій упаковці частинок та використанню добавок-суперпластифікаторів з високим водоредукуючим ефектом [3]. Завдяки високій щільності упаковки забезпечується міцність (100 МПа і більше), низька проникність і здатність суміші до самоущільнення[4, 5].

Віб्रोпресування є найбільш ефективним способом виготовлення дрібноштучних виробів різноманітного призначення (стінових виробів, дорожніх елементів, труб тощо). Для таких виробів є також важливим досягнення ультрависоких міцнісних характеристик, так як це дасть можливість підвищити їх стійкість до різних впливів, непроникність, довговічність, зменшити переріз. Віб्रोпресування являє собою поєднання динамічного і статичного тиску (вібрації та пресування) для ущільнення наджорстких бетонних сумішей з низькими значеннями водов'язучого відношення [6]. Цей спосіб дозволяє ефективно формувати вироби різної товщини та форми, при цьому забезпечуючи їх рівномірну щільність. Для бетонних сумішей, що ущільнюються вібропресуванням, так як і для УНРС і RPC, також дуже важливим є забезпечення максимальної упаковки компонентів. Однак забезпечення низького водо-в'язучого відношення та максимально щільного розміщення компонентів у даному випадку залежить від можливостей формувального обладнання, котрі визначаються параметрами вібрування (частотою, амплітудою), створюваним тиском та особливостями організації процесу ущільнення (способом вкладання бетонної суміші, прикладання до неї вібруючих коливань та тиску, розпалубки виробів, забезпечення виробничого циклу). Враховуючи те, що наджорсткі бетонні суміші, що містять значну кількість дисперсних компонентів важко піддаються ущільненню вібропресуванням[7], актуальність питання дослідження впливу параметрів ущільнення на властивості високоміцних дрібнозернистих бетонів не викликає сумнівів.

Мета, методи та матеріали. Для дослідження впливу параметрів вібропресування на процес ущільнення і формування наджорстких бетонних

сумішей було вибрано 3 склади дрібнозернистого бетону, що відрізнялись витратою цементу та, відповідно, співвідношенням цементу і заповнювача. Для складу 1 витрата цементу складала 300 кг/м^3 , складу 2 – 500 кг/м^3 , складу 3 – 700 кг/м^3 (табл.1). Використовували портландцемент ПЦІІ/А-Ш-500 (ПРАТ Волинь-цемент філія Діккергоф Україна). У якості заповнювача був прийнятий фракціонований пісок Нетішинського родовища Хмельницької області з модулем крупності 2,2. Приготування бетонної суміші наджорсткої консистенції (НЖ-2, Ж=100 с) здійснювалось у швидкісному змішувачі. Формувались зразки-циліндри з діаметром і висотою 50 мм. Для формування використовувалась спеціально розроблена циліндрична сталева прес-форма (рис. 1.)

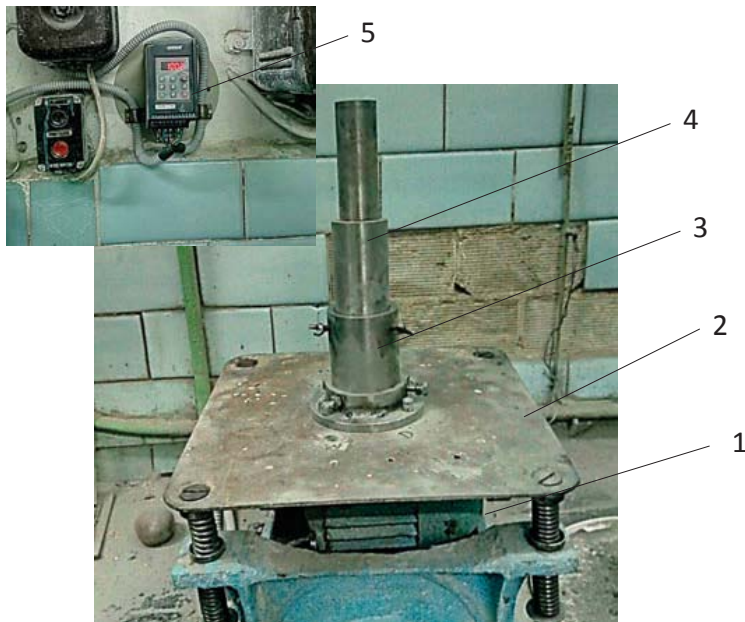


Рис. 3.4. Вигляд установки для дослідження процесу вібропресування бетонних сумішей: 1- вібродвигун з регулятором амплітуди; 2- вібростіл; 3- прес-форма; 4- пуансон з при вантаженням; 5- перетворювач частоти

Процес вібропресування бетонних циліндрів здійснювався з використанням лабораторної установки, що імітує процес вібропресування на вібромайданчику СМЖ-539, котрий був вдосконалим частотним перетворювачем HEDY серії HD71-40T00150. Час ущільнення варіювався від 5 с до 5 хв. Тиск на бетонну суміш здійснювався з використанням інерційного привантаження, величина якого могла змінюватись в межах від 0,01 до 0,2 МПа. Частота коливань вібромайданчика могла змінюватись від 0 і до 300 Гц.

На першому етапі на підібраних раніше складах бетону(табл.1) проводилося визначення залежності середньої густини та міцності на стиск

зразків у віці 28 діб від В/Ц. Для отримання результатів було вибрано час вібрації 15 с і тиск на суміш, що був рівний 0,04 МПа. Частота коливань вібромайданчинка була постійною – 50 Гц.

Отримані дані випробувань наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Вплив В/Ц на середню густину і міцність при стиску вібропресованого бетону при звичайних параметрах ущільнення

№ досліджу		Водоцементне відношення						
		0,22	0,25	0,28	0,3	0,32	0,35	0,4
1. Цемент – 300 кг/м ³ ; Пісок – 1750 кг/м ³	Середня густина, кг/м ³	2116	2158	2205	2230	2226	2199	2100
	Міцність, МПа	13,3	18,6	23	26,6	28,5	28,5	24,9
2. Цемент – 500 кг/м ³ ; Пісок – 1550 кг/м ³	Середня густина, кг/м ³	2199	2243	2312	2332	2342	2279	2247
	Міцність, МПа	27,7	34,2	42	44,8	45,6	44	36,1
3. Цемент – 700 кг/м ³ ; Пісок – 1350 кг/м ³	Середня густина, кг/м ³	2317	2359	2381	2376	2364	2347	2311
	Міцність, МПа	50,7	53,5	56	54,6	53,4	49,3	41

Значення середньої густини дрібнозернистого бетону після його ущільнення шляхом вібропресування при даних параметрах змінювались у межах від 2100 до 2380 кг/м³. При цьому була отримана міцність при стиску у діапазоні 13...56 МПа. Коливання міцності викликалися зміною складу бетону (витрати цементу на 1 м³), а також його В/Ц.

Отримані результати показують, що за характером залежності щільності вібропресованого бетону і його міцності від В/Ц є подібними. Характер кривих є екстремальним, тому вказує на наявність оптимальних значень В/Ц, при яких і щільність і міцність бетону є максимальними. Як видно з табл. 1 Оптимуми В/Ц і для середньої густини і для міцності практично співпадають, тому можна стверджувати, що досягнення максимальних значень міцності у даному випадку визначається переважно щільністю бетону, котра забезпечується формувальними властивостями суміші, які для вібропресованого бетону помітно змінюються зі зміною В/Ц [6].

Для бетону кожного складу з постійною витратою цементу відмічається характерне оптимальне В/Ц для якого міцність максимальна. При витраті цементу 300 кг/м³ – 0,33...0,35, 500 кг/м³ – 0,30, 700 кг/м³ – 0,28. Ці В/Ц були

використані як базові для даних складів при вивченні впливу параметрів ущільнення.

Визначення залежності часу ущільнення бетонних циліндрів діаметром 50 мм від частоти коливань вібромайданчика проводилося на складах 1, 2 і 3. Процес ущільнення припинявся при досягненні висоти зразка близько 50 мм.

Величина при вантаженні у даних дослідах була зафіксована на рівні 0,04 МПа. Частота коливань віброплощини змінювалася від 30 до 150 Гц. Процес формування проводився до отримання зразка висотою 50 мм. Максимальний час ущільнення було обмежено 200 сек. Отримані дані наведені на рис. 2, 3 і 4.

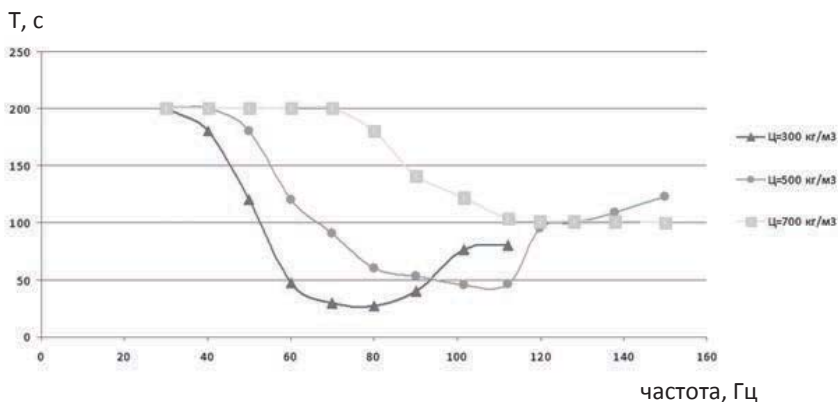


Рис.2 - Вплив частоти вібрації на час ущільнення зразків до висоти 50 мм

Як показують отримані результати, заданого розміру зразків вібропресованого дрібнозернистого бетону було досягнуто для складу з витратою цементу 300 кг/м^3 тільки при частоті коливань 60 Гц, для складу з витратою цементу 500 кг/м^3 – при частоті 90...100 Гц, з витратою цементу 700 кг/м^3 – вище 120 Гц. Тобто спостерігається чітка тенденція підвищення необхідної частоти вібраційного впливу при постійній величині інерційного привантаження з підвищення загальної дисперсності компонентів бетону, котра змінюється за рахунок підвищення витрати цементу. Подібні результати підтверджуються даними багатьох дослідників [8, 9], як вказували, що зниження крупності частинок вібропресованого бетону ефективно ущільнення досягається за рахунок підвищення частоти коливань вібростолу. Подальше підвищення частоти коливань, як показують результати, не призвело до зростання щільності і міцності бетону.

При зміні частоти з 40 до 90 і до 120 Гц для різних складів, відповідно, спостерігалась різка зміна у швидкості ущільнення зразків, причому при подальшому збільшенні частоти більше різкого зменшення часу формування не було помітно. Очевидно, що зменшення часу ущільнення можна було б досягнути за рахунок підвищення інтенсивності вібропресування шляхом зміни тиску інерційного привантаження [7].

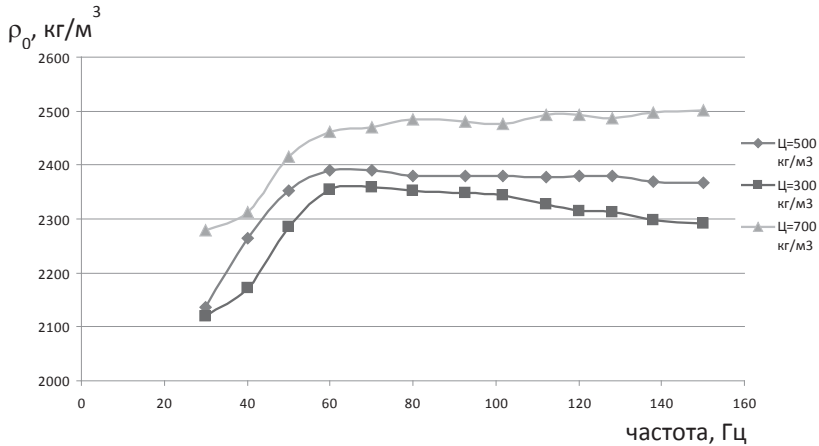


Рис. 3. Вплив частоти коливань вібростолу на середню густину (ρ_0 , кг/м³) бетону при вібропресуванні

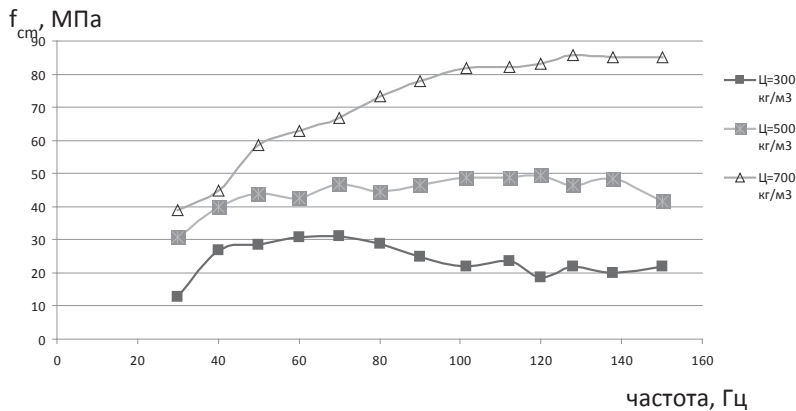


Рис. 4. Вплив частоти коливань вібростолу на міцність вібропресованого бетону при стиску у віці 28 діб

Отримані результати показують, що з підвищенням частоти коливань вібромайданчика середня густина наджорсткої бетонної після вібрування з привантаженням величиною 0,04 МПа та, відповідно коефіцієнт ущільнення бетону підвищується. Причому, до досягнення величини частоти, яка для даного складу є оптимальною (згідно рис. 1) спостерігається різке підвищення середньої густини, а подальше наростання йде плавно чи зовсім припиняється. Очевидно у даному випадку спочатку спостерігається інтенсивне переупакування частинок і видалення значної кількості затисненого повітря. На другому етапі, коли наростання середньої густини йде повільніше у відбувається руйнування флокул і рівномірне розподілення води під час ущільнення. Такий період ущільнення є найбільш придатним для бетону з підвищеною витратою цементу, що викликане максимальною

в'язкістю і об'ємом агрегатів цементу, що підтверджується також і у роботі [8].

Поряд з підвищенням коефіцієнта ущільнення вібропресованого бетону (середньої густини) при збільшенні частоти спостерігається наростання міцності бетону зразків. При витраті цементу 300 кг/м^3 максимальна досягнена міцність становила 31,1 МПа, при витраті 500 кг/м^3 – 49,3 МПа і при 700 кг/м^3 – 85,7 МПа. Частота при якій досягається максимальна міцність та характер впливу частоти на міцність (рис. 2) добре корелює із залежностями отриманими щодо середньої густини бетону (рис.1). Зростання міцності бетону за рахунок ущільнення при оптимальних значеннях частоті порівняно з формуваннями при стандартній частоті 50 Гц становить для складу з витратою цементу 300 кг/м^3 9...10%, 500 кг/м^3 - 12...13%, 700 кг/м^3 - 50...52%.

Таким чином, вібропресування дрібнозерного бетону при оптимальній частоті коливань вібростолу дозволяє суттєво покращити ущільнення, диспергувати цементні частинки і, очевидно, також активізувати гідратаційні процеси у цементному тісті, за рахунок чого спостерігається значне підвищення міцності при стиску.

Для вибраних складів з різними витратами цементу проводилося встановлення залежності міцності на стиск зразків-циліндрів 50 мм від тиску на бетонну суміш в процесі ущільнення бетонної суміші (величина при вантаженні). Для складу з витратою цементу 300 кг/м^3 на основі попередніх результатів час ущільнення був зафіксований на рівні 60 с при частоті 70 Гц, для складу з Ц=500 кг/м^3 -60 с при частоті 90 Гц, для складу з Ц=700 кг/м^3 - 100 с при частоті 120 Гц. Тиск на суміш змінювалося від 0,01 до 0,1 МПа. Величина тиску змінювалась за допомогою вантажів різного номіналу.

Отримані результати (рис. 4, 5) показують, що збільшення величини тиску на надзорстку бетонну суміш у процесі вібрування спричиняє подальше підвищення середньої густини бетону та, відповідно, міцності. Додаткове збільшення величини привантаження призводить до підвищення інтенсивності вібраційного впливу у результаті чого спостерігається тиксотропне розрідження сумішей з низькою вологістю, котрі при звичайних параметрах не ущільнюються. При таких впливах відбувається додаткове видалення затисненого повітря і перерозподілення цементних частинок та вологи, що позитивно впливає на процеси формування структури цементного каменю. Після досягнення оптимальних значень тиску на бетонну суміш подальше його збільшення не призводить до зростання щільності і міцності. Додаткове збільшення міцності викликане підвищенням тиску на бетонну суміш становить для складу з Ц=300 кг/м^3 - 22%, Ц=500 кг/м^3 - 3,7%, Ц=700 кг/м^3 - 4,6%.

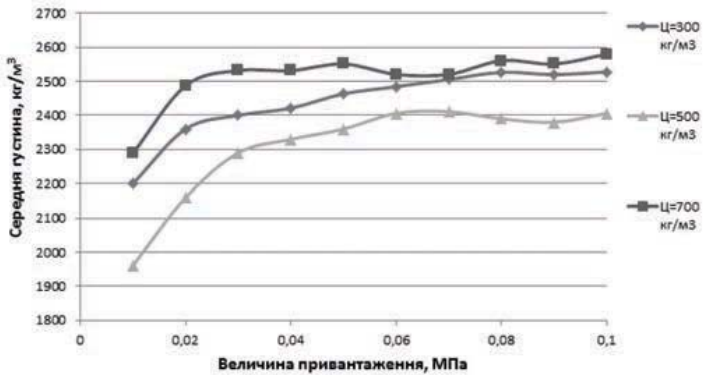


Рис. 5. Залежність середньої густини бетону від величини інерційного привантаження

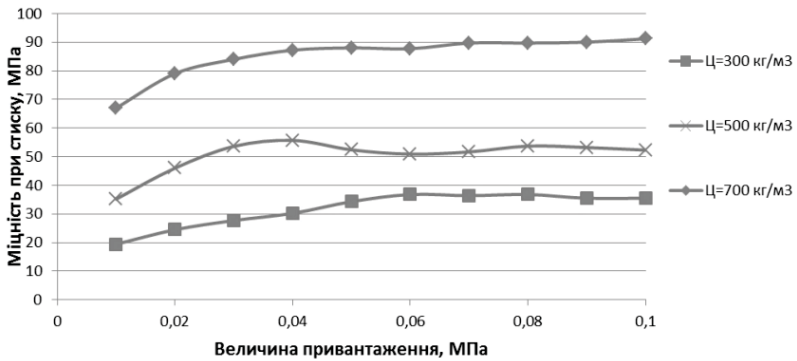


Рис. 6. Залежність міцності бетону при стиску у віці 28 днів від величини інерційного привантаження

Таким чином, збільшення величини привантаження більш ефективно при підвищених витратах заповнювача у бетонній суміші, там де необхідне більш компактне його розташування і достатньо більш низьких частот коливань вібраційної установки для ущільнення. Додаткове диспергування частинок цементу під час вібраційного пресування наджорстких сумішей і підвищення ефективності вібрування можливе також за рахунок дії поверхнево-активних речовин [10].

Висновки. Звичайна технологія вібропресування наджорстких сумішей не дозволяє досягнути високих міцностей характерних для НРС чи УНРС через значну кількість затисненого повітря у цементному камені та бетоні, яке не видаляється під час розповсюджених способів ущільнення.

Вібропресування дрібнозерного бетону при оптимальній частоті коливань вібростолу дозволяє суттєво покращити ущільнення, диспергувати цементні частинки і, очевидно, також активізувати гідратаційні процеси у цементному тісті, за рахунок чого спостерігається значне підвищення міцності при стиску. Отримання ультрависокоміцних реакційно-порошкових бетонів

можливе за рахунок обробки наджорстких сумішей при $V/C=0,18...0,2$ високочастотними вібраційними впливами підвищеної інтенсивності з одночасною дією привантаження $0,06...0,1$ МПа. Збільшення величини привантаження більш ефективно при підвищених витратах і крупності заповнювача у бетонній суміші, там де необхідне більш компактне його розташування і достатньо більш низьких частот для ущільнення.

1. Lee, M.G., Wang, Y.C. and Chiu, C.T. (2007), "A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material", *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pp. 182-189

2. RibeiroFurtadodeMendonca, Flavia, "ProportionandEvaluationofUltra-High Performance Concrete Using Local Materials"(2019). *CivilEngineeringTeses, Dissertations, andStudentResearch*. 138.

3. Richard, P. and Cheyrez, M.H. (1994), "Reactive Powder Concretes with HighDuctility and 200-800 MPa Compressive Strength", *SCI SP 144*, pp. 507-518.

4. Shaheen, E. and Shrive, N.G. (2006), "Optimization of Mechanical Properties and Durability of Reactive Powder Concrete", *ACI Materials Journal*, Vol. 103, No. 6, pp. 444-451.

5. Dowd, W. (1999), "Reactive Powder Concrete – Ultra-High Performance Cement Based composite", NOVA awardnomination, *Construction Innovation Forum*, websiteavailableat http://www.cif.org/nominations/nom_319.html

6. Батяновский, Э. И. Вибропрессованный бетон: технология и свойства / Э. И. Батяновский, А. И. Бондарович; Белорусский национальный технический университет. - Минск : БНТУ, 2018. – 262 с.

Batianovskyi, Э. Y. Vybropressovanniy beton: tekhnolohyia y svoistva / Э. Y. Batianovskyi, A. Y. Bondarovich; Belorusskiyatsyonalnyitekhnicheskyyuniversitytet. - Mynsk : BNTU, 2018. – 262 s.

7. Л.И. Дворкин, В.В. Житковський, В.О. Каганов. Бетони на основі наджорстких сумішей. Рівне: Вид-во РДЦНТЕІ 2006, - 179 с

L.I. Dvorkin, V.V. Zhytkovskyi, V.O. Kahanov. Betony na osnovi nadzhorstkykh sumishei. Rivne: Vyd-vo RDTsNTEI 2006, - 179 s

8. Ахвердов И. Н. Основыфизикибетона. – М.: Строииздат,1981. – 464 с.

Akhverdov Y. N. Osnovyfyzykybetona. – M.: Stroyuzdat,1981. – 464 s.

9. Львович К.И. Песчаный бетон и его применение в строительстве. - СПб.: Строй-бетон, 2007. - 320 с.

Lvovych K.Y. Peschanyi beton y ego pryumenenye v stroytelstve. - SPb.: Stroi-beton, 2007. - 320 s.

10. Каганов, В. О. Вплив конфігурації прес-форм для вібропресування фігурних елементів мостіння на якість заповнення матриць наджорсткою бетонною сумішшю // Будівельні конструкції. Сучасні технології бетону : зб. наук. пр. : міжвід. наук.-техн. зб. / Держ. п-во "Держ. н.-д. ін-т буд. конструкцій". — К. : НДІБК, 2009. — С. 119-125.

Kahanov, V. O. Vplyv konfihuratsii pres-form dlia vibropresuvannia fihurnykh elementiv mostinnia na yakist zapovnennia matryts nadzhorstkoiu betonnoiu sumishshiu // Budivelni konstruktsii. Suchasni tekhnolohii betonu : zb. nauk. pr. : mizhvid. nauk.-tekhn. zb. / Derzh. p-vo "Derzh. n.-d. in-t bud. konstruktsii". — K. : NDIBK, 2009. — S. 119-125.