

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Харківський національний університет будівництва і архітектури

**ДОЛГІЙ ВІКТОР ПЕТРОВИЧ**

УДК 691.32: 666.974

**РОЗРОБКА ВИСОКОРУХЛИВИХ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ  
ДЛЯ ТРУБОБЕТОНУ СКЛАДНОГО ПЕРЕТИНУ**

05.23.05 – будівельні матеріали та виробн

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі фізико-хімічної механіки та технології будівельних матеріалів і виробів Харківського національного університету будівництва та архітектури Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
Сопов Віктор Петрович,  
Харківський національний університет будівництва та архітектури, завідувач кафедри фізико-хімічної механіки та технології будівельних матеріалів і виробів

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, доцент  
Марушак Ульяна Дмитрівна,  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
Інститут будівництва та інженерії довкілля,  
доцент кафедри будівельного виробництва

доктор технічних наук, доцент  
Плугін Дмитро Артурович,  
Український державний університет залізничного транспорту, професор кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд

Захист відбудеться 28 грудня 2019 р. о 11<sup>00</sup> год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.056.04 Харківського національного університету будівництва і архітектури, 61002, м. Харків, вул. Сумська, 40.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету будівництва і архітектури, 61002, м. Харків, вул. Сумська, 40.

Автореферат розісланий 26 листопада 2019 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
кандидат технічних наук, доц.



О.В. Доброходова

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** В останній час все більшого поширення набуває застосування трубобетонних конструкцій при зведенні промислових і житлових будівель і споруд. У трубобетонних конструкціях за рахунок спільної роботи металеві оболонки і бетону ефективно використовуються специфічні властивості матеріалів, що застосовуються. Однією із основних проблем трубобетонних конструкцій є забезпечення спільної роботи бетонного ядра та оболонки на всіх стадіях експлуатації. Особливу актуальність це набуває для трубобетонних конструкцій з металевим сердечником. При цьому найважливішим є питання розробки складів бетонних сумішей, які б забезпечували необхідні властивості бетону при умовах міцної адгезії з зовнішньою металевою оболонкою і повним заповненням внутрішнього об'єму.

З 1977 р. А.Е. Юницьким розробляється швидкісна транспортна система Skyway - встановлена на опорах рейкова естакада для переміщення спеціального рухомого складу, забезпеченого протисхідною системою. Основу шляхової структури складають попередньо напружені розтягуванням нерозрізні струнні рейки або попередньо напружена розтягуванням нерозрізна несуча фермо-струнна конструкція, які являють собою горизонтальну трубобетонну конструкцію, зовнішньою оболонкою якої є корпус рейки, а внутрішній об'єм заповнено бетоном з необхідними фізико-механічними властивостями.

Рішення такої технологічної задачі пов'язане з рядом труднощів, обумовлених геометрією внутрішнього простору порожнистого рейки довжиною 1000 м, який заповнюється бетонною сумішшю, обмеженням розмірів заповнювачів, необхідністю нагнітання бетонної суміші в обмежений простір та ін. Розробка специфічних бетонних сумішей, які задовільняють цим вимогам, є вельми актуальною задачею сучасного будівельного матеріалознавства. Наприклад, виконання несучої конструкції традиційних мостів у вигляді попередньо напружених несучих струнних балок або струнних ферм знижує їх вартість в 2-3 рази при одночасному збільшенні довговічності і поліпшенні експлуатаційних характеристик, покриття автодорожніх мостів можна буде влаштовувати без температурних швів, так як несуча конструкція мосту по всій своїй довжині буде нерозрізною, без будь-яких поперечних зазорів і швів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація відповідає напрямку політики держави у сфері розвитку транспортних систем (закон України «Про транспорт» №232/94 ВР від 10.11. 1994 р., закон України «Про міський електричний транспорт» №1914-IV від 29.06.2004 р.).

Дисертаційна робота виконувалася в рамках наукової програми «Підвищення ефективності композиційних будівельних матеріалів» на кафедрі фізико-хімічної механіки і технології будівельних матеріалів і виробів Харківського національного університету будівництва та архітектури, а також безпосередньо на ЗАТ «Струнні технології», м. Мінськ, Білорусь.

**Мета роботи і задачі дослідження.** Метою роботи є розробка методу підбору складів бетонних сумішей зі спрямованим регулюванням їх реологічних характеристик за допомогою хімічних і мінеральних добавок, які призначені для заповнення нерозрізних трубобетонних конструкції складного перетину і великої довжини.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести теоретичний аналіз процесів нагнітання бетонних сумішей в обмежений простір трубобетонних конструкцій складного перетину;
- розробити методику підбору ефективних складів багатокomпонентних дрібнозернистих бетонних сумішей для нерозрізних трубобетонних конструкцій довжиною до 1000 м;
- провести дослідження впливу компонентів бетонних сумішей на їх властивості;
- дослідити основні реологічні властивості бетонних сумішей і фізико-механічні властивості трубобетонів на отриманих складах бетонів;
- розробити метод оцінки фізико-механічних властивостей трубобетону;
- провести натурні випробування трубобетонних конструкцій;
- розробити технологічний регламент виготовлення довгомірних трубобетонних конструкцій складного перетину.

**Об'єктом досліджень** є процеси приготування і нагнітання бетонних сумішей для трубобетонних конструкцій складного перетину.

**Предметом досліджень** є високорухливі бетонні суміші для трубобетонних конструкцій.

**Методи досліджень.** Фізико-механічні властивості трубобетону визначалися за розробленими методиками з використанням прогиномірів 6 ПАО, відносні деформації в контрольних точках визначалися за допомогою індикаторів ІМІГ і електронних датчиків деформацій з ціною поділки 0,001 мм. Реологічні властивості бетонних сумішей визначалися згідно діючих нормативних документів і загальноприйнятих методик. Визначення в'язкості бетонної суміші здійснювалось за допомогою ротаційного віскозиметра Fungilab Expert L. Достовірність отриманих результатів забезпечена застосуванням коректних методів стандартних і оригінальних експериментальних досліджень, а також узгодженням результатів теоретичних, експериментальних та експлуатаційних випробувань.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

- подальший розвиток отримала методологія підбору складу багатокomпонентних бетонних сумішей для трубобетонних конструкцій складного перетину і великої довжини шляхом поетапної оцінки реологічних властивостей при варіюванні сировинних компонентів;
- вперше розроблено склади багатокomпонентних високорухливих бетонних сумішей для трубобетонних конструкцій складного перетину довжиною 1000 м;

- встановлено механізм утворення пробок при нагнітанні легких бетонних сумішей на пористих заповнювачах в трубобетонні конструкції;

- показано, що забезпечення високої межі текучості бетонних сумішей і в'язкості при низькій швидкості зсуву, але з низьким опором потоку при високій швидкості зсуву, можливо шляхом введення водоутримуючих добавок;

- показана роль тонкомолотих мінеральних наповнювачів в зниженні розшарування високорухливих і литих бетонних сумішей;

- встановлено, що заповнення бетоном рейкового простору знижує рівень шуму на 9,6 Дб в діапазоні частот 63 ... 8000 Гц;

- розроблено технологічний регламент приготування та нагнітання бетонних сумішей у довгомірні трубобетонні конструкції складного перетину.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

На базі результатів теоретичних і експериментальних досліджень розроблено склади багатокomпонентних бетонних сумішей, які можна виготовляти на заводах товарного бетону.

Розроблені бетонні суміші можуть використовуватися для бетонування густоармованих, віддалених і важкодоступних конструкцій, де неможливий під'їзд автотранспорту, а також трубобетонних конструкцій зі складною конфігурацією.

Результати дисертаційної роботи було впроваджено на ЗАТ «Струнні технології» при зведення Екотехнопарка у м. Мар'їна Горка (Республіка Білорусь).

**Особистий внесок здобувача** полягає в проведенні експериментальних досліджень, підборі складів бетонів, обробці отриманих результатів, формулюванні основних положень і висновків, впровадженні результатів роботи у виробництво.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати і положення дисертаційної роботи доповідалися на: міжнародній науково-практичній конференції «Ефективні технологічні рішення у будівництві з використаних бетонів нового покоління» (м. Харків, 2015 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Сучасний стан та перспективи розвитку технічних наук» (м. Уфа, 2015 р); 6-й і 7-й міжнародній науковій конференції «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings» (м. Харків, 2017-2018 рр.); III і IV міжнародних науково-практичних конференціях «Теорія і методи будівельного матеріалознавства» (м. Харків, 2017, 2018 рр.); I і II міжнародних науково-практичних конференціях «Інноваційні технології в архітектурі і дизайні» (м. Харків, 2017-2018 рр.), I Міжнародної науково-практичної конференції «Technology, Engineering and Science – 2018» (м. Лондон, 2018 р.), 70-73 науково-технічних конференціях ХНУБА (2015-2018 рр.).

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи розкриті в 14 публікаціях, з яких: 6 – у наукових фахових виданнях, рекомендованих МОН

України; 2 – у виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus; 6 – апробаційного характеру.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, 3 додатків і містить 159 сторінок основного тексту, 68 рисунків, 37 таблиць, списку використаних джерел з 136 назв.

## ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, зазначено основні положення, що отримані автором і мають наукову новизну та практичну цінність, наведено дані про апробацію та опублікування результатів досліджень, структуру та обсяг роботи.

**У першому розділі** виконано аналітичний огляд стану наукової проблеми на підставі аналізу літературних джерел і визначено теоретичні передумови досліджень.

При будівництві висотних будівель і споруд важливим є той факт, що конструкції з трубобетону, відчуваючи великі деформації, можуть ще тривалий час витримувати значне навантаження, в той час як звичайні залізобетонні в таких умовах втрачають несучу здатність миттєво. Варто відзначити, що в таких конструкціях можливе використання сучасних високоміцних бетонів.

Серед вітчизняних вчених, які займалися дослідженнями напружено-деформованого стану трубобетонних конструкцій і оцінці їх міцності слід виділити Л. І. Стороженко, Д. А. Єрмоленко, М. А. Бондаренко, В. М. Бондаренко, С. В. Олександрівського, О. Я. Берга, А. А. Гвоздьова та ін.

Область застосування трубобетону досить широка, на думку Стороженко Л.І., його найвигідніше застосовувати в конструкціях з великими стискаючими зусиллями: в колонах, стислих поясах арок і елементах великопрольотних ферм, в мостових опорах і прогонових будовах, стійках споруд рамної конструкції, в несучих конструкціях громадських і житлових будівель, в опорах ліній високовольтної електропередачі, висотних радіо- і телевізійних щоглах і інших спорудах.

Їх зовнішня сталева труба-оболонка, яка виконує одночасно функції як поздовжнього, так і поперечного армування, здатна сприймати зусилля у всіх напрямках і під будь-яким кутом. Крім того бічний тиск труби перешкоджає розвитку мікротріщин розриву в бетоні, який, будучи ізольованим, прагне збільшити свої розміри в радіальному напрямку. Такий ефект обойми створює ідеальні умови для роботи бетонного ядра під навантаженням, тим самим підвищуючи несучу здатність всього масиву. В результаті чого міцність при стисненні зростає приблизно на 50-80%. Сталева труба, завдяки сприятливому впливу внутрішнього тиску твердого середовища, виявляється в значній мірі, захищена від втрати місцевої та загальної стійкості.

Існують три способи ущільнення трубобетону: глибинною вібрацією, штикуванням і зовнішньою вібрацією. Показано, що укладання бетонної суміші в металеву оболонку без ущільнення можливо за допомогою високорухливих бетонних сумішей.

Розглянуто обладнання, яке використовується для нагнітання бетонних сумішей, а також встановлені фактори, що впливають на їх нагнітання в трубобетонну конструкцію.

Зроблена оцінка впливу компонентів і температури бетонної суміші на її реологічні характеристики при нагнітанні в трубобетонну конструкцію.

Нагнітання бетонних сумішей в трубобетонну конструкцію залежить від технологічних (конфігурація, матеріал, довжина і діаметр бетоноводу, тиск і тип бетононаосу, швидкість руху бетонної суміші по бетоноводу, температура суміші і навколишнього повітря); реологічних (напруга зсуву, межа плинності, в'язкість, структурна міцність суміші, тиксотропія); трибологічних (тертя і мастильний шар) факторів.

Аналіз відомих досліджень щодо процесів, що відбуваються при нагнітанні бетонних сумішей в конструкцію, дозволяє висунути **наукову гіпотезу** щодо можливості збільшення довжини нагнітання за рахунок вибору найбільш технологічного обладнання, а також модифікації складів сумішей з отриманням порошкових бетонів надвисокої перекачуваності.

У **другому розділі** наведено характеристики вихідних матеріалів та описано основні методики досліджень, які використанні в роботі.

В якості в'язучого використовувався портландцемент ПЦ 500 Д0 (відповідає ПЦ I 500 по ДСТУ Б.В.2.7-46: 2010) виробництва ВАТ «Білоруський цементний завод». Питома поверхня портландцементу становила в межах 3380 м<sup>2</sup>/г. Як заповнювач використовувався пісок кварцовий пилоподібний фракції 0,1÷0,63 мм. Дрібний заповнювач в залежності від вмісту домішок і гранулометричного складу відповідає марці А по ГОСТ 9077-82. В якості мінеральної добавки застосовувався мікрокремнезем МКУ 85 - мікрокремнезем конденсований ущільнений виробництва ВАТ «Челябінський електрометалургійний комбінат» (ТУ 5743-048-02495332-96), який представляє собою активну мінеральну добавку в бетон, що складається з мікроскопічних часток сферичної форми. Вміст аморфного діоксиду кремнію не менше 85% по масі; втрати при прожарюванні не більше 4%; питома поверхня не менше 15 м<sup>2</sup>/г.

Мінеральна добавка РСАМ (СТБ 2092-2010) виробництва ВАТ «Парад» використовувалась для приготування бетонної суміші з регульованою енергією розширення в'язучого, що дозволяє отримувати бетони з компенсованою усадкою та напружуючі з різною енергією самонапруження. Для покращення технологічних характеристик бетонних сумішей використано добавку Sika ViscoCrete 5-600 SP – суперпластифікатор з високим водоредуруючим ефектом на основі модифікованих ефірів полікарбоксилатів. Для поліпшення

легкоукладальності, адгезії, зменшення розшаровуваності, підвищення збереженості реологічних властивостей суміші та фізико-механічних показників бетону застосовано синтетичну дисперсію бутадієнстирольного каучуку виробництва компанії Sika Österreich GmbH. Добавки вводили разом із водою замішування у вигляді розчинів.

Рентгенограма цементу вказує на відсутність вмісту сторонніх домішок і значну кількість вільного вапна та алюмінатних фаз (пик при 2,702 Å). Наявність галло в області 2,6 - 2,78 Å свідчить про те, що основна частина алюмоферритної фази знаходиться в склоподібному стані.

Реологічні властивості бетонних сумішей визначали згідно ДСТУ Б В.2.7-114-2002. Визначення в'язкості бетонної суміші проводилося згідно методики ГОСТ 25276-82 із застосуванням ротаційного віскозиметра моделі FUNGILAB EXPERT L.

Фізико-механічні властивості бетону (100×100×100 мм) визначали за методиками ДСТУ Б В.2.7-214:2009 та ДСТУ Б В.2.7-217: 2009. Міцність зчеплення з основою проводилася за методикою ДСТУ Б EN 1015-12:2012. Призмову міцність, модуль пружності і коефіцієнт Пуассона – за ДСТУ Б В.2.7-217:2009, деформації усадки – за ДСТУ Б В.2.7-216:2009. Лінійне розширення визначалося за методикою ДСТУ 2308-93.

Визначення несучої здатності трубобетону при стисканні та згині проводилося згідно розробленої методики по визначенню критичного навантаження  $R_{max}$ , при якому зразок втрачав свою стійкість. При цьому визначалась залежність деформації зразка від прикладеного зусилля. Звукопоглинальні властивості бетону в сталевій оболонці визначалися згідно нестандартної методики, де за допомогою спеціального стенду порівнювали рівні шуму та рівні звукового тиску в приміщенні від падіння еталонного молотка на зразки металеві труби пустотілої і заповненої бетоном.

**У третьому розділі** наведено результати досліджень впливу компонентів бетонної суміші на її технологічні та реологічні характеристики, а також результати проектування складу багатокомпонентної бетонної суміші для трубобетону.

Модифікування та підбір складу бетонної суміші складалося з декількох етапів.

На першому етапі виявлено закономірності впливу витрати суперпластифікатора Sika ViscoCrete 5-600 на реологічні властивості бетонної суміші та величину водоцементного відношення. Оптимальне дозування склало 0,7% від маси цементу при розпливу конусу РК 60 см. При дозуванні 1% і 1,2% спостерігалось розшарування суміші навіть при РК 60 см, що свідчить про передозування добавки. При цьому бетонна суміш з суперпластифікатором володіє збереженням реологічних властивостей (рухомість) до 3 год (рис. 1).



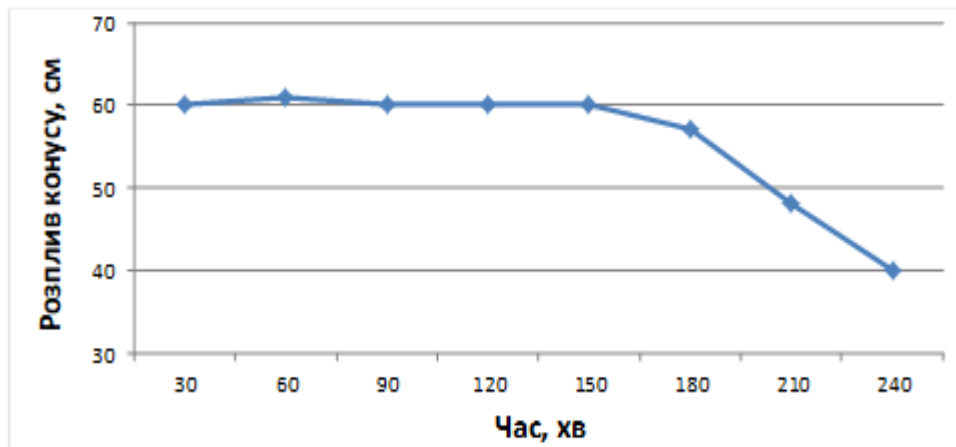


Рис. 1. Збереженість рухомості бетонної суміші з Sika ViscoCrete 5-600

На другому етапі з заміщенням частини подрібненого піску була введена мінеральна добавка мікрокремнезему МК. Контрольованим параметром модифікування були розплив конусу і величина В/Ц бетонної суміші. Оскільки при введенні мінеральної добавки змінюється загальна кількість в'язучого, а також частки мікрокремнезема можуть адсорбувати на собі деяку кількість суперпластифікатору і води, то необхідно коригувати дозування суперпластифікатору. При цьому досягається більш щільна упаковка компонентів суміші і зменшується розшаровуваність. Оптимальна кількість МК склала 15% від маси цементу при дозуванні суперпластифікатора 1,5% від маси цементу. Використання мікрокремнезему сприяло підвищенню РК до 90см без розшарування.

Для зменшення розшаровуваності, підвищення збереженості реологічних властивостей суміші та покращення фізико-механічних показників бетону на третьому етапі вводили добавку бутадієн-стирольного латексу SikaLatex. Контрольованими параметрами були найбільше розтікання без розшарування, межа міцності при стисненні, збереженість властивостей бетонної суміші.

Експериментально підтверджено, що при дозуванні 15% бутадієн-стирольного латексу знижується В/Ц, спостерігається найвища межа міцності на стиск, збереження рухливості складало не менше 8 годин. На даному етапі розшарування суміші не спостерігалось навіть при розпливі конуса Абрамса 130 см, а мало місце тільки при РК 150 см. Однак при цьому спостерігалася усадка бетону і, таким чином, за цим фактором було обрано оптимальне дозування бутадієн-стирольного латексу 10 % водної дисперсії від маси цементу.

Для виключення усадки бетону на четвертому етапі за величиною компенсації усадки бетону оцінювали вплив двох мінеральних добавок - РСАМ (розширюючий сульфо-алюмінатний модифікатор) і РД-н (тонкоподрібнена суміш, що складається з алюмінатних або сульфоалюмінатних і сульфатних компонентів). За результатами досліджень в якості добавки для компенсації усадки обрано добавку РСАМ. Бетонна суміш з РСАМ має більшу збереженість

рухомості і межу міцності бетону при стисканні, також були відсутні усадочні тріщини. Оптимальна витрата добавки склала 15% від маси цементу.

Отриманий найбільш ефективний склад бетонної суміші наведено в табл.1.

Важливою властивістю бетонних сумішей, які підлягають нагнітанню в трубобетонну конструкцію є в'язкість, яку можна визначити непрямым чином при виробництві суміші на бетонному заводі або під час вивантаження на будмайданчику за допомогою визначення легкоукладальності (розплив конусу РК). Використання ротаційного віскозиметра надає більш надійні результати в'язкості. З метою встановлення співвідношення між в'язкістю бетонної суміші, визначеної на ротаційному віскозиметрі Fungilab Expert L, та показниками РК (конус Абрамса та циліндр Суттарда) було проведено ряд випробувань, результати яких наведено в табл. 2.

Таблиця 1

Склад бетонної суміші для трубобетону

Клас бетону	В/Ц*	Витрата матеріалів на 1 м <sup>3</sup> бетонної суміші, кг							Щільність суміші, кг/м <sup>3</sup>	Розплив конусу см
		Цемент ПЦ I 500	Пісок молотий **	Вода	Хімічні добавки		Мінеральні добавки			
					Sika ViscoCrete 5-600	Sika Latex	PCAM	МК		
C55/67	0,33	700	760	210	14	70	100	70	1900	105

\* Водоцементне відношення враховує мінеральні добавки в складі загальної кількості в'язучого (кількість мінеральних добавок, які враховуються в загальній кількості в'язучого не більше 11% від маси цементу, решта вважається інертним) і воду в хім. добавках.

\*\* Пісок мелений пилоподібний повинен відповідати марці А згідно ГОСТ 9077-82

Таблиця 2

Співвідношення легкоукладальності і в'язкості для отриманого складу бетону

Склад бетонної суміші	Розплив конусу Абрамса, см	Розплив циліндру Суттарда, см	*В'язкість по ротаційному віскозиметру, Пуаз
Цемент ПЦ 500 Д0 - 700кг			
Пісок молотий (фракції 0,13-0,63мм) - 760кг	52	10	46
PCAM = 100кг	78	15	34
МК = 70кг	104	20	24
Sika VC 5-600 = 14кг	130	25	16
SikaLatex = 70кг	156	30	8
Вода = 170кг			

Примітка. В'язкість при швидкості обертання шпинделя віскозиметра 100 об/хв.

Збереженість рухливості на протязі 6 годин здобуто за рахунок додавання бутадієн-стирольного латексу (рис. 2).

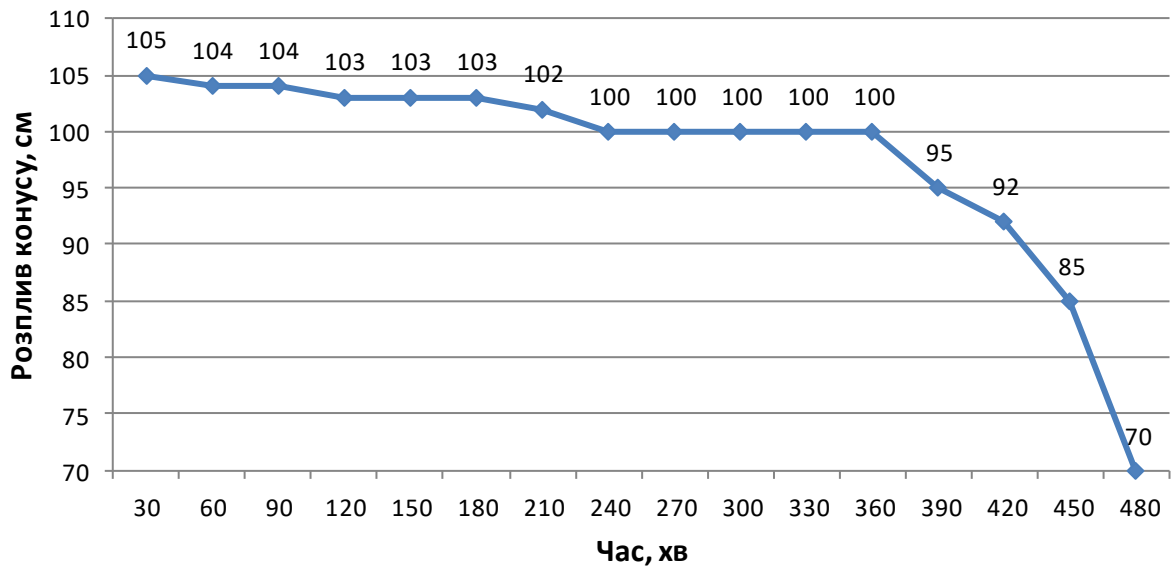


Рис. 2. Збереженість рухливості бетонної суміші

Аналогічні залежності між в'язкістю бетонної суміші і різними показниками РК отримані для швидкості обертання шпинделю віскозіметра в діапазоні від 20 до 100 обертів/хвилину.

Мінімальний вплив на реологію бетонної суміші з однаковими показниками В/Ц виявлено при зміні типу латексу (бутадієн-стирольний або акриловий).

Дослідження технологічних характеристик бетонної суміші при температурах від 0 до 20 °С визначило експоненціальну залежність водопотреби від температури (рис. 3). Вплив знижених температур істотно позначається на тривалості збереження легкоукладальності. Так, при витримці бетонної суміші при температурі 0 °С, збереженість рухливості становила не менше 48годин.

При введенні добавки РСАМ в кількості 15% від маси цементу спостерігається лінійне розширення зразків бетону 0,08 % при їх зберіганні в нормальних умовах, а при зберіганні при відносній вологості 55 % ця величина складає 0,09 %.

Виявлено, що бетони з додаванням латексу мають дещо повільніший набір міцності. Міцність бетону у віці 28 діб становила 61,2 МПа, а в 56 діб – 74,8 МПа. По міцності на стиск даний бетон відповідає класу С55/67 (В55) або марці М 700.

По міцності на розтяг при згині отриманий бетон відповідає класу В<sub>тб</sub> 4,0. Міцність зчеплення з металевою основою складає 0,85 МПа.

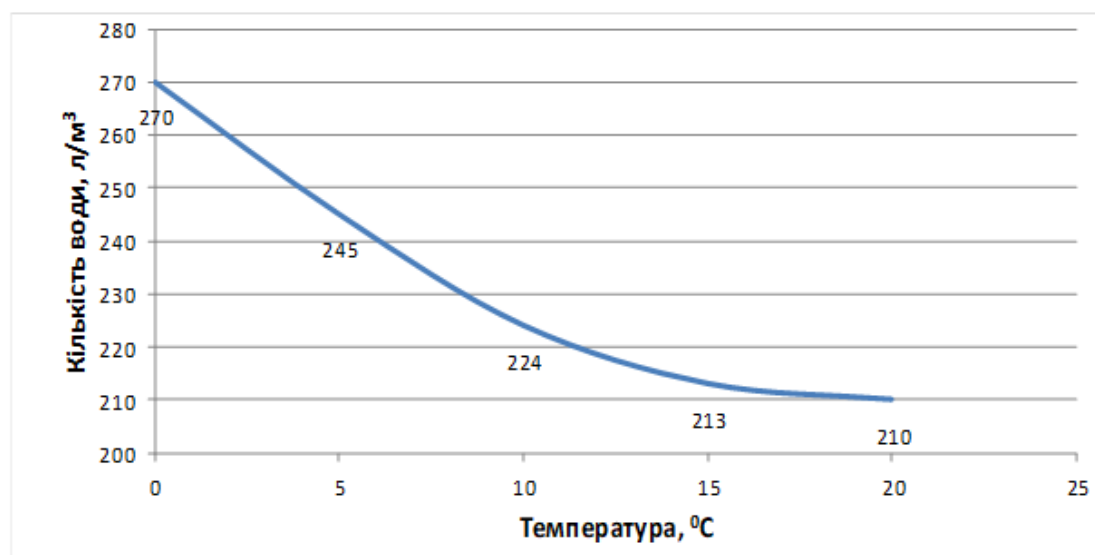


Рис. 3. Вплив температури на водопотребу бетонної суміші з добавкою бутадиєн-стирольного латексу в кількості 10%

Для зменшення ваги труобетонної конструкції був розроблений склад надлегкої бетонної суміші з розпливом конусу 55 см, об'ємною вагою 450 кг/м<sup>3</sup> та міцністю на стиск 0,64 МПа (табл. 3).

Таблиця 3

Склад надлегкої бетонної суміші

Клас бетону	В/Ц	Витрата матеріалів на 1 м <sup>3</sup> бетонної суміші, кг									
		Цемент ПЦ І-500	Піносклогранулят фр. 1-2 мм	Мікросфери фр. мм		Перлітовий пісок	Вода	Хімічні добавки			Мінеральні добавки
				0,02-0,2	0,2-0,4			Sika Aer 200S	Sika ViscoCrete 5-600	Sika Latex	
C0,35/0,75	1,0	110	140	8	10	15	115	2,8	2,2	22	22

У четвертому розділі досліджено процеси нагнітання бетонних сумішей в труобетонну конструкцію та отримані данні фізико-механічних випробувань розробленого труобетону. Дослідження полягало у визначенні внутрішнього тиску на початку і середині магістралі при подачі автобетононасосом високорухливих бетонних сумішей (важкої з щільністю 1900 кг/м<sup>3</sup> та РК 104 см і надлегкої з щільністю 450 кг/м<sup>3</sup> та РК 55см). Знаючи втрати тиску на 100 м ділянці труби, розрахунковим методом визначався необхідний тиск для нагнітання на відстань 500 м та вище.

Розроблена бетонна суміш призначена для заповнення порожньої металевої рейки, по якій буде їхати колісний транспорт (рис. 4).



Рис. 4. Випробування 14 місцевого юнібуса на жорсткій рейковій структурі

Для оцінки можливості нагнітання бетонної суміші в простір струнної рейки була споруджена металева конструкція прямокутного перетину  $80 \times 60$  мм довжиною 99 м з товщиною стінки 4 мм.

Результати зміни тиску в конструкції при прокачуванні важкої бетонної суміші представлені на рис. 5.

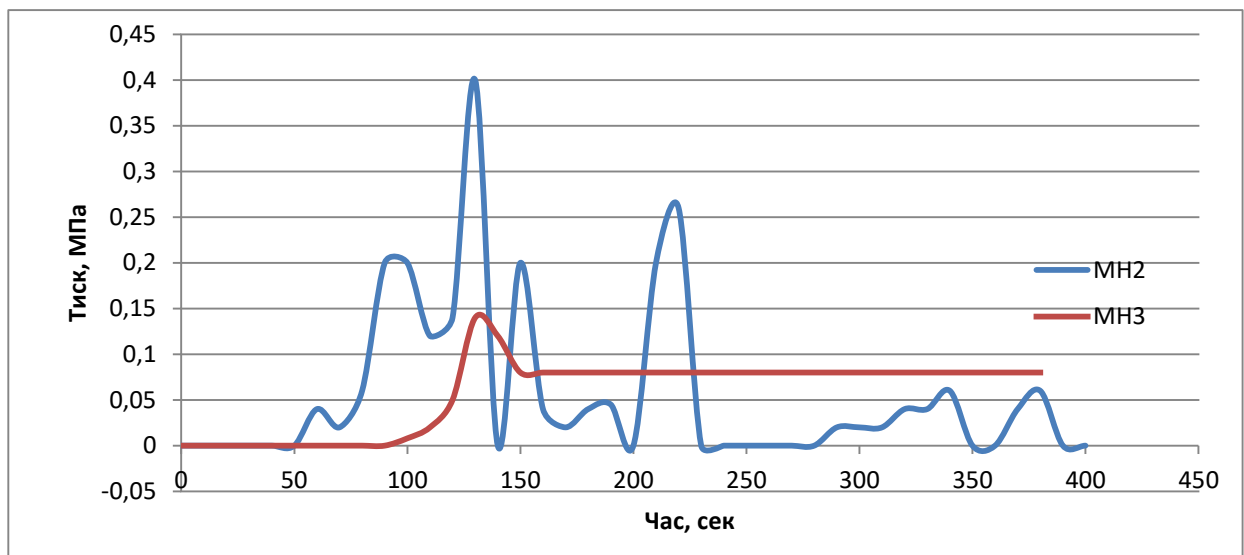


Рис. 5. Зміна тиску в бетоноводі в часі при прокачуванні важкої бетонної суміші

Як видно з рис. 5, через 150 с в центральній частині конструкції встановлюється стабільний тиск 0,08 МПа, що свідчить про сталість потоку бетонної суміші.

Потім за допомогою програмного забезпечення ANSYS було змодельована зміна швидкості течії бетонної суміші (рис. 6).

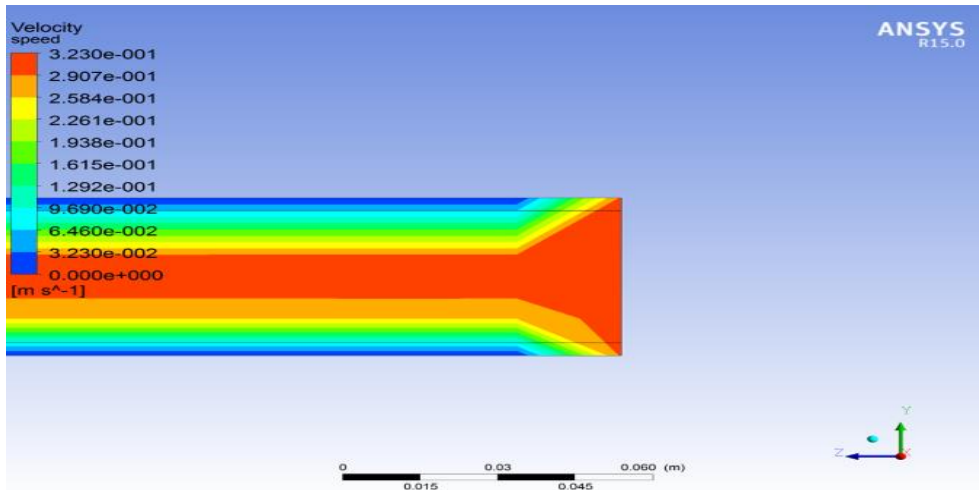


Рис. 6. Розрахункова швидкість течії важкої бетонної суміші в магістралі довжиною 500 м

При нагнітанні легкої суміші внаслідок проникання води в пори заповнювачів під тиском і різким зниженням рухливості суміші на відстані близько 40 м утворилася «пробка». Подальше нагнітання стало неможливим. Підвищення тиску для усунення пробки не дало результатів (пікові точки кривої графіка на рис. 7).

Проведений експеримент підтвердив складність здійснення нагнітання в труботетонну конструкцію надлегких сумішей на пористих заповнювачах за допомогою бетононасосу. Проблема полягає в міграції води під тиском в повітряні пори легких заповнювачів. У нашому випадку, таким заповнювачем був перлітовий пісок, який має відкриту пористу структуру. При збільшенні тиску нагнітання відбувається ще більш інтенсивне ущільнення суміші і збільшення в'язкості, створюючи, так звану, «пробку».

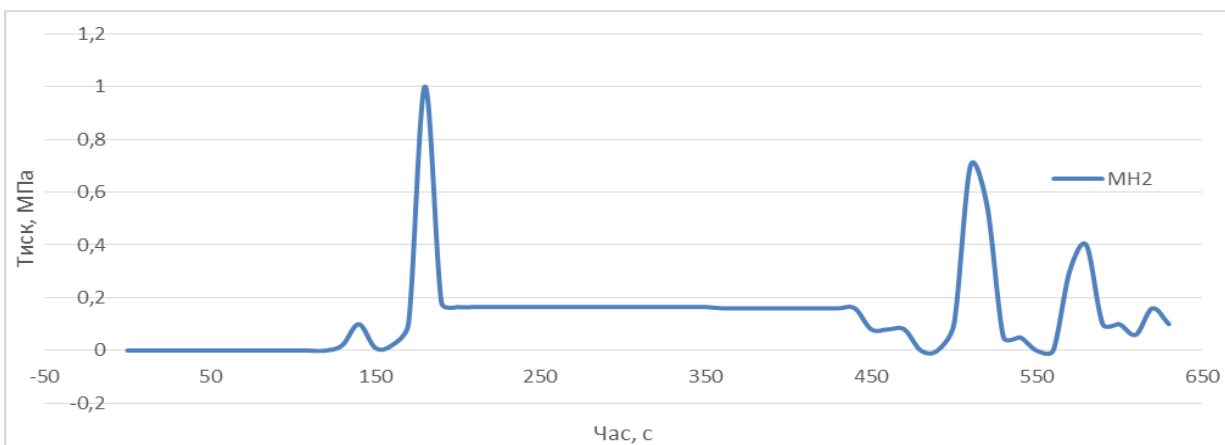


Рис. 7. Зміна тиску в бетоноводі в часі при прокачуванні легкої бетонної суміші.

Отримані зразки труботетонних елементів на основі важкої бетонної суміші довжиною 2400 мм, прямокутного перетину 80×60×4 мм були

випробувані на несучу здатність при стиску і вигині. Випробування проводилися також для елементів ферм незаповнених бетоном для порівняння їх результатів з результатами по трубобетону.

Виявлено, що міцність трубобетону при вигині склала 25,84 кН (середнє для двох зразків), що на 11,4% більше межі міцності при вигині порожнистої труби. Межа міцності при стиску трубобетону склала 279,25 кН (середнє для двох зразків), що на 35% більше межі міцності при стисненні оболонки без бетону.

При дослідження шумопоглинальних властивостей встановлено, що заповнення фрагментів поясів і розкосів ферм бетоном знижує рівні звуку в середньому на 9,6 дБ. Також зразки заповнені бетоном показали менші рівні звукового тиску, ніж зразки порожнистої труби на 1...3дБ на частотах 63-125 Гц і на 5...12 дБ на частотах 500-8000 Гц (рис. 8).

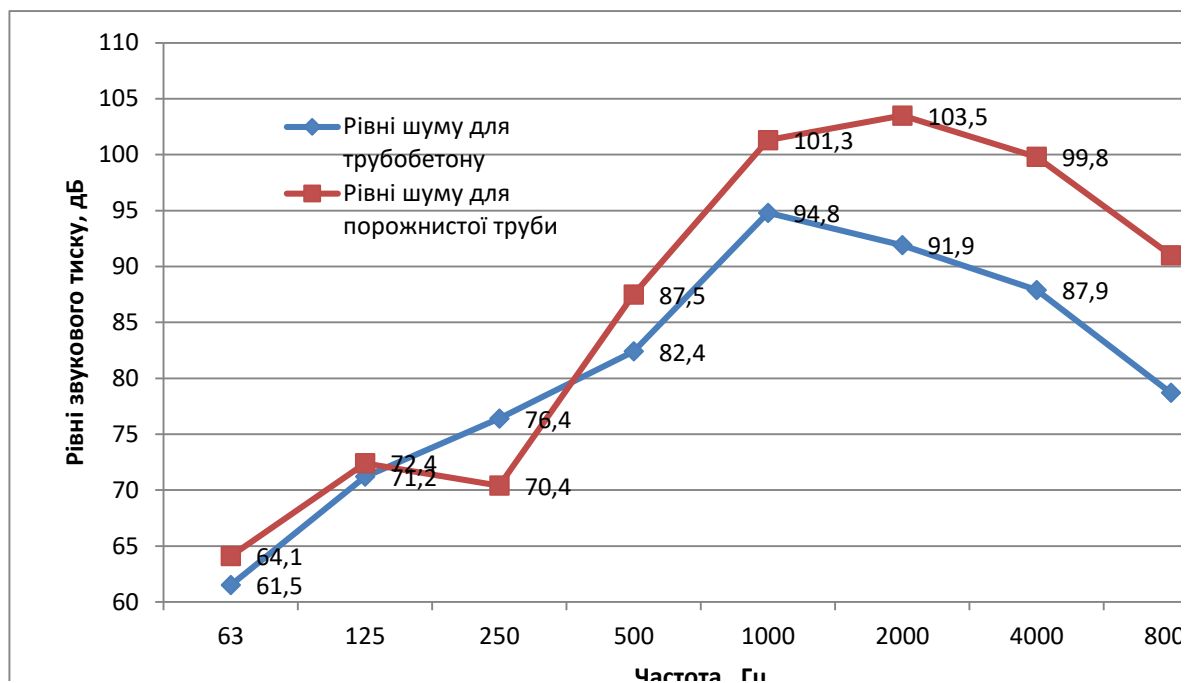


Рис. 8. Показники звукового тиску для порожнистої металеві труби і для труби, що заповнена бетонною сумішшю

Отже, для підвищення несучої здатності а також для зниження рівнів шуму при механічному впливі на фрагменти поясів і розкосів ферм доцільно заповнювати їх розробленим складом бетону.

У п'ятому розділі наведено технологічний регламент і технологічну схему виробництва трубобетону складного перетину з використанням важкої бетонної суміші. Технологічний регламент передбачає наступні переділи: виготовлення, постачання до будмайданчику та нагнітання бетонної суміші у трубобетонну конструкцію, контроль якості, розподіл часу на виконання всіх операцій та ін. Бетонну суміш виготовлено на бетонозмішувальному вузлі

заводу ТОВ «Сплітплюс» за відповідною технологічною схемою. Склад бетонної суміші відповідав класу C55/67 у віці 56 діб (згідно табл. 1).

Легкоукладальність бетонних сумішей на бетонозмішувальному вузлі характеризувалась значенням РК – 105 см. Середня міцність на стиск 12 контрольних серій зразків бетону з відібраних проб бетонної суміші у віці 28 діб складала 59,9 МПа, а у віці 56 діб – 73,8 МПа, що відповідає вимогам до бетону класу C55/67.

Основні характеристики бетонних сумішей, бетонів та труботонів підтвердили їх відповідність отриманим при дослідженні результатам, що свідчить про їх високу ефективність для використання при виробництві труботонних конструкцій.

## ВИСНОВКИ

1. Розроблено методику проектування складів багатокомпонентних бетонних сумішей для труботонних конструкцій складного перетину з обмеженим тиском нагнітання, яка основана на оптимізації структури бетонної суміші на мікро- і макрорівні за критеріями в'язкості і розтікання конусу.
2. Визначено, що за допомогою підбору ефективного складу (низька в'язкість, високе розтікання) з використанням дрібного піску фракції 0,1-0,5мм можна нагнітати бетонні суміші в труботонні конструкції складного перетину довжиною до 1 км зі збереженням їх однорідності та повноцінним заповненням внутрішнього простору бетоном.
3. Встановлено характер впливу тонкомолотих наповнювачів на зниження розшарування високорухливих, литих і самоущільнюючих бетонних сумішей.
4. Показано, що додавання хімічно і реологічно активних порошків значно посилює пластифікуючу дію хімічних добавок-розріджувачів, забезпечує підвищення щільності бетону і водоутримуючу здатність бетонної суміші.
5. Вперше виявлено експоненціальний характер впливу температури навколишнього середовища на величину водопотреби високорухливих бетонних сумішей.
6. Встановлено, що міцність труботону при вигині склала 25,84 кН (середнє для двох зразків), що на 11,4% більше межі міцності при вигині порожнистої труби. Межа міцності при стиску труботону склала 279,25 кН (середнє для двох зразків), що на 35% більше межі міцності при стисненні оболонки без бетону.
7. Запропоновано технологію отримання тонкозернистої бетонної суміші для нагнітання в труботонну конструкцію для заводського виготовлення товарного бетону. Здійснено апробацію отриманих результатів в промислових умовах в будівельній організації ЗАТ «Струнні технології».
8. Розроблено технологічний регламент виробництва високорухомих бетонних сумішей для довгопрогонних металевих труботонних конструкцій складного перетину з використанням стандартного насосного обладнання для нагнітання.



## ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ДИСЕРТАЦІЇ ВИКЛАДЕНО У ПРАЦЯХ:

*Статті у фахових виданнях та у виданнях, що включені до наукометричних баз:*

1. Сопов В.П. Проблема совместимости химических добавок с различными видами цементов / Сопов В.П., Долгий В.П. // Науковий вісник будівництва. Харків: ХНУБА, 2013. - Т. 74. - №4 – С. 358-363.

*Особистий внесок:* експериментальні дослідження сумісності добавок на основі нафталінформальдегідних смол та ефірів полікарбоксілатів.

2. Долгий В.П. Исследование свойств высокоподвижных бетонных смесей / Долгий В.П. // Науковий вісник будівництва. Харків: ХНУБА, 2017. – Т. 89. - №3. - С. 259-267.

*Особистий внесок:* експериментальні дослідження з визначення впливу компонентів суміші на її реологічні властивості.

3. Сопов В.П. Определение реологических и физико-механических свойств трубобетона для стальной путевой структуры / Сопов В.П., Журавлев Ю.В., Долгий В.П. // Будівельні матеріали та виробництво. Київ, 2017. - №5-6 (96). - С. 38-41.

*Особистий внесок:* експериментальні дослідження перекачуваності бетонних сумішей та фізико-механічних показників отриманого трубобетону.

4. Viktor Sopov The properties of concrete mixes, pumped over long distances / Viktor Sopov, Viktor Dolgiy // Matec WEB of Conferences, 6th International Scientific Conference “Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings” (Transbud-2017), Volume 116, (2017). – 01017. – pp. 1-7. DOI: 10.1051/matecconf/201711601017. (*Scopus*)

*Особистий внесок:* експериментальні дослідження впливу компонентів бетонної суміші на її реологічні властивості і в'язкість, а також дослідження мастильного шару.

5. Долгий В.П. Виготовлення і транспортування дрібнозернистих бетонних сумішей на великі відстані / Долгий В.П., Сопов В.П. // Науковий вісник будівництва. Харків: ХНУБА, 2018. - Т. 91. - №1. - С. 262-268. DOI: 10.29295/2311-7257-2018-91-1-262-268.

*Особистий внесок:* експериментальні дослідження нагнітання бетонної суміші в трубобетонну конструкцію, а також розробка технологічного регламенту її нагнітання і технологічної схеми виробництва.

6. Долгий В.П. Влияние химических добавок на реологические свойства многокомпонентных бетонных смесей / Долгий В.П., Сопов В.П. // Науковий вісник будівництва. Харків: ХНУБА, 2018. - Т. 92. - №2. - С. 312-318. DOI: 10.29295/2311-7257-2018-92-2-312-318.

*Особистий внесок:* експериментальні дослідження впливу хімічних добавок різної природи на реологічні властивості багатокомпонентних бетонних сумішей.

7. Долгий В.П. Особенности подбора состава трубобетона / Долгий В.П., Сопов В.П. // Научный вестник строительства. Харьков, 2018. - Т 93. - №3. - С. 288-293. DOI: 10.29295/2311-7257-2018-93-3-288-293.

*Особистий внесок:* методика підбору складу реакційно-порошкових багатокомпонентних бетонних сумішей.

8. Sopov V.P. High-mobility concrete mixes for concrete-filled steel tube structures of complex cross-section / Sopov V.P., Dolgiy V.P., Latorets K. V., Zhuravlov Yu.V. // International Journal of Engineering & Technology, 2018. – №7 (4.8). – pp. 295-300. (*Scopus*)

*Особистий внесок:* розробка складів багатокомпонентних бетонних сумішей, визначення фізико-механічних властивостей бетону.

**Статті апробаційного характеру:**

9. Долгий В.П. Применение самоуплотняющихся бетонов при возведении градирен Белорусской АЭС / Долгий В.П., Ковальчук Ю.А. / Материалы Международной научно-практической конференции «Эффективные технологические решения в строительстве с использованием бетонов нового поколения». Харьков, 28-29 октября 2015. С. 73-78.

*Особистий внесок:* розробка складів та експериментальні дослідження використання самоущільнювачих бетонів при зведенні градирен Білоруської АЕС.

10. Сопов В.П. Влияние водоредуцирующих добавок на физико-механические свойства цементных бетонов / Сопов В.П., Долгий В.П. / Сборник статей международной научно-практической конференции 20 марта 2015. Уфа, Аэтерна, 2015. С. 114-121.

*Особистий внесок:* експериментальні дослідження впливу хімічних добавок різної природи на фізико-механічні властивості цементних бетонів.

11. Сопов В.П. Исследование перекачивания современных бетонных смесей на большие расстояния / Сопов В.П., Долгий В.П. / Збірник матеріалів міжнародної практичної конференції «Інноваційні технології в архітектурі і дизайні» 6-7 квітня 2017. Харків, 2017. С. 442-449.

*Особистий внесок:* експериментальні дослідження нагнітання бетонних сумішей в трубобетонну конструкцію.

12. Долгий В.П. Эффективные бетонные смеси для трубобетона. / I Міжнародна науково-практична конференція «Ефективність підприємства – інноваційні технології та економічні рішення», 7-8 червня 2018 р.: тези допов. Харків: ХНУБА, 2018. – С. 32.

*Особистий внесок:* підбір складу бетонних сумішей, проведення досліджень реологічних властивостей бетонних сумішей.

13. Долгий В.П. Методика проектування складів багатокомпонентних реакційно-порошкових бетонів. / IV міжнародна науково-практична конференція «Теорія і методи будівельного матеріалознавства», 4-5 жовтня 2018 р.: тези допов. Харків: ХНУБА. – 2018. – С. 26-27.

*Особистий внесок:* розробка методики підбору складу багатокомпонентних реакційно-порошкових бетонних сумішей.

14. Долгий В.П. Багатокомпонентні бетонні суміші для транспортних магістралей. Долгий В.П., Сопов В.П., Латорець К.В., Гуркаленко В.А., Буцький В.О. / 7-а Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті», ТРАНСБУД - 2018, 14-16 листопада 2018 р.: тези допов. Харків: УкрДУЗТ. – 2018. – С. 178-180.

*Особистий внесок:* дослідження впливу окремих компонентів на властивості бетонних сумішей і бетонів.

## АНОТАЦІЯ

Долгий В.П. Розробка високорухливих бетонних сумішей для трубобетону складного перетину. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05 – будівельні матеріали та вироби. – Харківський національний університет будівництва та архітектури Міністерства освіти і науки України. – Харків, 2019.

В дисертаційній роботі обґрунтовано та експериментально доведено можливість використання високорухливих бетонних сумішей для трубобетону складного перетину, що забезпечує покращення експлуатаційних та спеціальних властивостей трубобетону. Отримано залежності тиску в бетоноводі від дальності нагнітання бетонних сумішей в трубу бетонну конструкцію. Смодельовано зміну швидкості течії важкої бетонної суміші за допомогою програмного забезпечення ANSYS, результати якого були дуже схожими з експериментальними.

Розроблено склад бетонної суміші з середньою щільністю  $1900 \text{ кг/м}^3$  і розпливом конусу РК – 104 см, в'язкістю близько 20 Пуаз при швидкості обертання шпинделю віскозиметру 100 об/хв, а також склад бетонної суміші з середньою щільністю  $450 \text{ кг/м}^3$ , РК - 55см. Отриманий важкий бетон відповідає класу C55/67 в 56-добовому віці що характеризується міцністю на розтяг при згині через 28 діб тверднення ( $R_{гг} = 7,35 \text{ МПа}$ ), модулем пружності ( $E = 31,4 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ ), та надлегкий бетон середньою щільністю  $450 \text{ кг/м}^3$  класу міцності при стиску C0,35/0,75.

Межа міцності отриманого трубобетону при вигині склала 25,84 кН (середнє для двох зразків), що на 11,4% більше межі міцності при вигині порожнистої труби. Межа міцності при стисненні трубобетону склала 279,25 кН (середнє для двох зразків), що на 35% більше межі міцності при стисненні порожнистої труби. Визначено звукопоглинальні властивості бетону в діапазоні частот від 63 до 8000 Гц.

**Ключові слова:** багатокомпонентна бетонна суміш, нагнітання, добавки для бетонів, в'язкість, бетон, трубобетон, міцність, несуча спроможність.

## АННОТАЦИЯ

Долгий В.П. Разработка высокоподвижных бетонных смесей для трубобетону сложного сечения. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.05 - строительные материалы и изделия. - Харьковский национальный университет строительства и архитектуры Министерства образования и науки Украины. - Харьков, 2019.

В диссертационной работе обоснована и экспериментально доказана возможность использования высокоподвижных бетонных смесей для трубобетона сложного сечения, обеспечивает улучшение эксплуатационных и специальных свойств трубобетона.

Получены зависимости давления в бетоноводе от дальности нагнетания бетонных смесей. Создана модель изменения скорости течения тяжелой бетонной смеси с помощью программного обеспечения ANSYS, результаты моделирования хорошо коррелировали с экспериментальными данными.

Разработан состав бетонной смеси со средней плотностью  $1900 \text{ кг/м}^3$  и расплывом конуса РК - 104 см, вязкостью около 20 Пуаз при скорости вращения шпинделя вискозиметру 100 об/мин, а также состав бетонной смеси со средней плотностью  $450 \text{ кг/м}^3$ , РК - 55 см. Полученный тяжелый бетон соответствует классу C55/67 в 56-суточном возрасте характеризуется прочностью на растяжение при изгибе через 28 суток твердения ( $R_{gr} = 7,35 \text{ МПа}$ ), модулем упругости ( $E = 31,4 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ ), и сверхлегкий бетон средней плотностью  $450 \text{ кг/м}^3$  класса прочности при сжатии C0,35/0,75.

Предел прочности полученного трубобетону при изгибе составила 25,84 кН (среднее для двух образцов), что на 11,4% больше предела прочности при изгибе полый трубы. Предел прочности при сжатии трубобетону составила 279,25 кН (среднее для двух образцов), что на 35% больше предела прочности при сжатии полый трубы. Определены звукопоглощающие свойства бетона в диапазоне частот от 63 до 8000 Гц.

**Ключевые слова:** многокомпонентная бетонная смесь, нагнетание, добавки для бетонов, вязкость, бетон, трубобетон, прочность, несущая способность.

## ANNOTATION

Dolgiy V.P. Creation of high-mobility concrete mixes for pipe concrete of a complex section. - On the rights of the manuscript.

The dissertation for obtaining the scientific degree of the candidate of technical sciences in the specialty 05.23.05 - building materials and products. - Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture of the Ministry of Education and Science of Ukraine. - Kharkiv, 2019.

In the dissertation work the possibility of using high-mobility concrete mixes for a pipe of a complex section has been substantiated and experimentally proved, which provides improvement of operational and special properties of concrete.

The nature and features of the structure of additives and their influence on the rheological properties of the concrete mixture are analyzed. An analysis of the literature on the pumping of concrete mixtures is given. With a wide coverage of the issues of pumping concrete, few processes were investigated during the pumping of powdered concrete and the influence of individual components of the composition of the mixture on this process. It is not enough investigated the influence of the composition of the concrete mixture on the parameters of injection.

The composition of the concrete mixture with an average density of  $1900 \text{ kg/m}^3$ , RC 104 cm, with a viscosity of about 20 Poise at viscosimeter spindle speed of 100 rpm, as well as a composition of a concrete mixture with an average density of  $450 \text{ kg/m}^3$ , RK 55 cm, has been developed. The obtained heavy concrete corresponds to the class C55/67 at 56 days of age, characterized by bending strength at bending after 28 days of hardening ( $R_{zg} = 7.35 \text{ MPa}$ ), a modulus of elasticity ( $E = 31.4 \cdot 10^3 \text{ MPa}$ ), and lightweight concrete with average density  $450 \text{ kg / m}^3$  of strength class with compression C0.35 / 0.75.

The dependences of pressure in concrete-concrete on the pumping distance of concrete mixtures were obtained. The modification of the velocity of a heavy concrete mix was simulated using the ANSYS software, the results of which were very similar to the experimental ones.

An important property of concrete mixtures that are subject to long-distance pouring is the viscosity that can be determined indirectly in the production of a mixture at a concrete plant or during unloading at the construction site by means of determining the comfortableness (fracture of the cone of the RK). Using a rotary viscometer on the construction site is extremely difficult. To this end, a number of tests were conducted to determine the ratio of the viscosity of the concrete mixture to the rotation viscometer with different indicators of the RK. The Abrams standard cone was used to determine the RK. At the same time, on Suttard's viscometer it is recognized the cylinder flooded. Next, the concrete mixture was subjected to a viscosity test by the Fungilab Expert L rotary viscometer. The ratio of cone flux and viscosity was found.

The study of the technological characteristics of the concrete mixture at reduced temperatures determined the dependence of water consumption on its value. Influence of lowered temperatures significantly affects the duration of easy storage.

Experimental data on the transfer of superluous mixture on porous fillers confirmed the complexity of their pumping with the help of a concrete pump. The problem is the migration of water into the airy pores of light pressurized fillers. The section of reinforced concrete confirmed this theory of pumping light mixtures, where light aggregates are evenly distributed throughout the volume of the pipe. That is, when sprayed, the effect of a sponge immersed in water works. At the same time, water enters the inside and goes outside with cyclic movements of its compression.

The samples of tubular elements of 2400 mm in length, rectangular cross section of 80x60x4 mm, were tested on the bearing capacity for compression and bending with the use of heavy concrete as a concrete rod developed by the structure. The tests were also carried out for elements of non-filled concrete farms to compare their results with the results of concrete.

The strength of the resulting concrete during bending was 25.84 kN (average for two samples), which is 11.4% more than the strength of the bending of the hollow pipe. The strength of compression of the pipe was 279.25 kN (average for two samples), which is 35% more than the strength of the compression of the hollow pipe.

The noise-absorbing properties have been studied, which indicate that the filling of fragments of belts and slices of trusses with concrete reduces sound levels by an average of 9.6 dB. Also, samples filled with concrete showed lower levels of sound pressure than samples of a hollow tube at 1-3dB at frequencies 63-125Hz and 5-12dB at frequencies 500-8000Hz.

Is given the technological regulations and technological scheme of production of a concrete block of concrete with the use of a concrete mix for long-distance pumping.

**Key words:** multicomponent concrete mix, pumping, additives for concrete, viscosity, concrete, trumpet, strength, bearing capacity.

Підписано до друку 25.11.2019 р.

Формат 60x84. 1/16. Папір офсетний.

Друк – цифровий. Умовн. друк. арк 0,9. Тираж 100 прим. Зам. №5942

---

ХНУБА, вул. Сумська, 40, Харків, 61002, Україна  
Підготовлено та надруковано РВВ Харківського  
національного університету будівництва та  
архітектури