

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ПРОНИКНОГО ЦЕМЕНТОБЕТОНУ ПРИ БУДІВНИЦТВІ ОБ'ЄКТІВ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ



Гамеляк Ігор Павлович, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри аеропорти, e-mail: gip65n@gmail.com, +380503524124,

<https://orcid.org/0000-0001-9246-7561>



Рутковська Інеса Анатоліївна, кандидат технічних наук, професор Національний транспортний університет, професор кафедри «Аеропорти», e-mail: ria_ntu@yandex.ua, тел. +380442807073,

<https://orcid.org/0000-0001-7832-4222>



Герасименко Алла Володимирівна, старший викладач Національний транспортний університет, старший викладач кафедри «Аеропорти», e-mail: a_gerasimenko@yandex.ua, тел. +380442808402

<https://orcid.org/0000-0001-7038-3703>



Філіщук Марія Миколаївна, аспірантка Національний транспортний університет, аспірантка кафедри «Аеропорти», e-mail: mariaoleksuk6@gmail.com, тел. +380961438071

<https://orcid.org/0000-0002-0195-1006>

Анотація. В статті наведені аналіз міжнародного досвіду використання проникного цементобетону на об'єктах транспортної інфраструктури, переваги та недоліки матеріалу та аналіз властивостей проникного бетону.

Об'єкт дослідження – використання проникного цементобетону при будівництві об'єктів транспортної інфраструктури.

Мета роботи – обґрунтування використання проникного цементобетону при будівництві об'єктів транспортної інфраструктури на основі аналізу попереднього міжнародного досвіду та лабораторних випробувань відповідних цементобетонних зразків.

Методи дослідження – аналіз міжнародної та вітчизняної літератури та оцінка досвіду використання проникного цементобетону, лабораторні випробування цементобетонних зразків.

Огляд світового досвіду досліджень проникного (дренуючого) цементобетону, влаштування та експлуатації шарів аеродромного одягу з нього показує техніко-економічну доцільність та ефективність їх застосування. Проникний цементобетон це матеріал з високою відкритою пористістю, яка забезпечує хороші шумопоглинаючі властивості і дренажну здатність в поєднанні з шорсткістю, рівністю і поперечним тертям.

Результати статті можуть бути упроваджені в різних технологіях будівництва та ремонту об'єктів транспортної інфраструктури.

Прогнозні припущення щодо розвитку об'єкта дослідження – пошук оптимального складу проникного цементобетону для подальшого використання в технологіях будівництва та ремонту конструкцій та споруд.

Ключові слова: проникний цементобетон, автомобільна дорога, аеродром, дорожнє покриття, аеродромний одяг, водопропускна здатність, дефекти.

Постановка проблеми

В сучасних умовах об'єкти транспортної інфраструктури відіграють важливу роль в економіці України та в житті суспільства, загалом. Чотири з дев'яти міжнародних транспортних коридорів проходять через територію України. Наша країна є незалежною державою, одним із засновників ООН, входить до Ради Європи, міжнародних організацій із різних видів транспорту, займає вигідне для створення міжнародних транспортних коридорів геополітичне становище, має розвинуту промисловість, спроможну виготовляти та обслуговувати сучасні транспортні засоби, дорожньо-будівельну техніку, а також потужний потенціал наукових, проектних, навчальних закладів та кваліфікованих кадрів [1].

У осінньо-зимовий період експлуатації та обслуговування елементів транспортної інфраструктури часто виникають проблеми зі швидким видаленням води з поверхні покриття в разі дощу і поліпшення дренажу дорожнього та аеродромного покриттів, ризик аквапланування ПС та транспортних засобів, низька шорсткість поверхні покриття. Рух транспортних засобів постійно створює високий рівень шуму, що сильно шкодить здоров'ю людини та забруднює навколишнє середовище. Ряд цих та інших проблем створює небезпечні умови для людей та наносить шкоду екології Землі.

Як відомо, основним ворогом доріг є вода, а точніше відсутність або недостатня роботи дренажної системи та незадовільне поверхневого водовідведення, особливо в міських умовах (рис. 1).



Рисунок 1 – Наслідки відсутності або недостатньої роботи дренажної системи та незадовільного поверхневого водовідведення в міських умовах: а) м. Київ, б) м. Ірпінь

Figure 1 - Consequences of the absence or insufficient operation of the drainage system and unsatisfactory surface drainage in urban conditions: a) Kyiv, b) Irpin

Для рішення цієї проблеми в останні роки успішно використовується проникний (дренуючий) бетон [2, 3].

Впровадження проникного бетону відповідає концепції сталого (стійкого, неперервного) розвитку (Sustainability):

- «Розвиток, який відповідає потребам сьогодення без шкоди для здатності майбутніх поколінь задовольняти власні потреби» - Комісія Брундтленда 1983;

- «Розвиток, який відповідає транспортним та іншим потребам сьогодення без шкоди для здатності майбутніх поколінь задовольняти свої потреби» - TRB 2005.

«Сталий» - включає «зелений» аспект проекту (який зосереджується виключно на екологічному управлінні), а також інтегрує інші два компоненти: економічного зростання та соціальної відповідальності.

Застосування проникних цементобетонів в покритті та основі здійснюється в багатьох країнах (Австрії, Бельгії, Великобританії, Німеччині, Іспанії, Нідерландах, США, Франції, Швейцарії, Японії та ін.). На даний час на багатьох швидкісних дорогах Швейцарії застосовуються дорожні покриття з відкритими порами, які почали використовувати в кінці 1970-х років. Переваги покриттів з проникного цементобетону, за даними зарубіжних досліджень: швидке видалення води з поверхні покриття в разі дощу і поліпшення дренажу дорожнього та аеродромного одягів, що зменшує ризик аквапланування транспортних засобів і підвищує безпеку руху в дощову погоду; підвищена і стійка шорсткість поверхні; зниження рівня шуму від руху транспортних засобів. Дренуюча здатність покриття робить його практично сухим, воно також має високий ступінь звукопоглинання.

Мета роботи – аналіз стану справ та встановлення перспективних напрямків використання проникного цементобетону при будівництві об'єктів транспортної інфраструктури.

Виклад основного матеріалу

1. Загальні поняття про проникний бетон (pervious concrete)

Визначення та поняття. Поняття проникного цементобетону в нашій країні та на теренах бувшого СРСР на сьогодні не сформовано.

Проникний (синоніми - пропускальний, пропускний, дренажний, дренуючий, дренальний тощо) бетон – матеріал, що отримується після твердіння бетонної суміші підібраного складу, що включає щебінь, малу кількість піску, портландцемент, воду та добавки, здатний чи призначений пропускати воду і /або інші речовини при нормальних умовах (температура вище замерзання води або розчинів, атмосферному тиску тощо), завдяки сформованій структурі відкритих пор.

На сьогодні немає класифікації таких цементобетонів, подібно до того, як асфальтобетон класифікують за пористістю на литий (до 2,0%), щільний (від 3 до 5%), пористий (від 5 до 10 %), високопористий (від 10 до 15%) та дренуючий (від 15 до 25%).

Дорожній та аеродромний цементобетон повинен мати пористість в межах 4 – 6% для забезпечення морозостійкості [4]. За основу класифікації може бути покладена пористість (залишкова) цементобетону (щільний, пористий (поруватий), високопористий) [5], однак цей показник нестабільний, має ймовірнісний стохастичний характер, змінюється при зміні умов випробувань, тому в цементобетонах не має поширення.

Проникний цементобетон (ПЦБ) (Pervious Concrete (PC) [6] (Chandrapa and Biligiri, 2016) був використаний як засіб для зменшення стоку зливових вод. Основним принципом роботи шару ПЦБ є швидка передача зливової води через взаємопов'язану внутрішню макропористу структуру. Ця структура створюється шляхом вибору відповідних фракцій крупного заповнювача та цементуючих матеріалів. Матеріал, що класифікується за пустотами, створюється крупними заповнювачами одного розміру з оптимальною кількістю цементу для покриття та зв'язування заповнювачів. Вказано мінімальну пористість 15% та типовий діапазон 16-25%. Проникним цементобетоном називають цементобетон з відкритою структурою великих пор, який в якості в'язучого матеріалу містить таку кількість цементного тіста або тонкого розчину, щоб заповнювати пустоти між зернами заповнювача після ущільнення [7] та забезпечити необхідну пропускну здатність. Загальний вигляд проникного цементобетону показано на рис. 2.



Рисунок 2 – Загальний вигляд зразку кубу проникуного цементобетону

Figure 2 – General view of a sample cube of pervious cement concrete

2. Підбір складу ПЦБ

Основним принципом підбору складу суміші ПЦБ є забезпечення відповідного покриття заповнювачів цементним каменем, що може бути досягнуто різними методами, такими як метод абсолютного об'єму, теорія надлишку цементної пасти або на основі відношення об'єму цементного розчину до порожнин між частками заповнювача [8 - 10] (Deo and Neithalath, 2011; Nguyen et al., 2014; Yahia and Kabagire, 2014). Типова щільність заповнювача становить $1400\text{--}1800\text{ кг/м}^3$ при співвідношенні заповнювача та цементу від 4:1 до 12:1.

Одним з основних критеріїв застосування пористого цементобетону є поєднання хорошої водопроникності і опору механічним впливам, в тому числі і навколишнього середовища. При використанні проникуного цементобетону для влаштування покриття або верхніх шарів основ зазначені вище характеристики можуть бути досягнуті шляхом відносно невеликим дозуванням цементу (що не перевищує 200 кг/м^3). Якщо проникуний цементобетон застосовується для покриттів і піддається безпосередньому впливу коліс, то важче знайти компроміс між водопроникністю і міцністю, включаючи опір відриву щибінок. В цьому випадку слід підвищувати вміст цементу (до $300\text{--}400\text{ кг/м}^3$) або вводити невелику кількість цементу, але з певними добавками (в основному полімерів або мікрокремнезему), які покращують міцність цементобетону без зменшення його пористості [7 - 9].

Співвідношення води та цементу (мас. В / Ц) вибирається на рівні 0,2–0,4, як правило, нижче, ніж у звичайного цементобетону [11]. Вміст заповнювача становить від 50 до 65%, при співвідношенні заповнювач - цемент від 4:1 до 6:1. Максимальний розмір фракцій заповнювачів коливається в межах 19–9,5 мм, іноді використовуються менші заповнювачі (9,5–2,36 мм). Фізичні властивості заповнювачів повинні відповідати тим самим вимогам, що й ті, що використовуються у звичайній цементобетонній суміші. Як правило, виявлено, що ПЦБ з гранітними заповнювачами є більш стійкими до пошкодження від замерзання – відтавання (F / T) порівняно з такими як з вапняком або річковим гравієм. Порівняно тонка цементна паста в ПЦБ дозволяє легше потрапляти воді в заповнювач, а отже властивості заповнювачів дуже важливі для забезпечення відповідної стійкості проти пошкодження замерзання - відтавання.

ПЦБ, як правило, виготовляються із звичайного портландцементу та такої кількості, яка забезпечує покриття достатньою міцністю. Встановлено, що використання додаткових цементуючих матеріалів є ефективним до граничного значення [12] (Fu et al., 2014). Товщина покриття (6–9 мм) є важливим фактором, що впливає як на структурні, так і на гідрологічні характеристики ПЦБ. ПЦБ розроблені з нульовою осадкою конуса (легкоукладальність П0), а добавки використовуються для покращення

працездатності. Додатки використовуються для захоплення повітря та зменшення швидкості випаровування, а також для поліпшення міцності при замерзанні - відтаванні (F / T) (повітровтягувальна хімічні добавки).

3. Основні властивості проникного цементобетону

У різних країнах проведені дослідження з метою оптимізації складів цементобетону і забезпечення його морозо- і морозосолестійкості. Для отримання цих властивостей були встановлені вимоги щодо міцності при стисненні, згині, відкритої пористості і динамічного модуля пружності.

Проникний цементобетон відрізняється від звичайного щільного цементобетону, як правило, тим, що складається з суміші крупного заповнювача і розчинної частини в кількості, необхідній для обмазки і склеювання зерен заповнювача (рис. 3). Зерна крупного заповнювача склеюються в'язким (цементною пастою) при контакті одне з одним, а простір між ними залишається вільним і має систему великих «наскрізних» повітряних пор, розмір яких залежить від розміру зерен заповнювача.

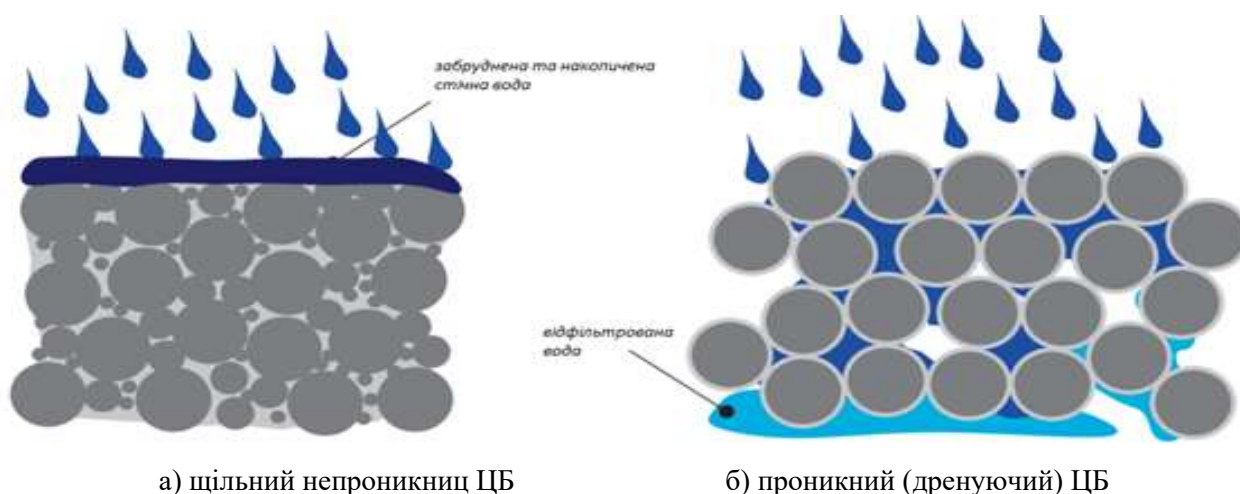


Рисунок 3 – Порівняння проникного цементобетону б) з непроникним а)
Figure 3 – Comparison of pervious concrete б) to impervious concrete а) [12]

Вміст «наскрізної» повітряної пористості може становити 10 – 25% за об'ємом в залежності від призначення (шари основи або покриття), необхідної міцності і морозостійкості цементобетону. Висока пористість (до 25%), доступна для води, досягається за рахунок переривчастого гранулометричного складу мінерального заповнювача. Для регулювання властивостей проникного цементобетону вводять полімерні добавки [7, 13].

Як правило, до важливих механічних властивостей відносять міцність на стиск, міцність на розтяг при згині, втомлюваність, зносостійкість та морозостійкість. Було помічено, що міцність ПЦБ на згині залишається незмінною протягом періоду затвердіння - 7-денна міцність становить 90% від 28-денної міцності. Встановлено, що довговічність ПЦБ є низькою, і для їх збільшення використовуються полімери. Встановлено, що пористість суміші є важливим фактором, що визначає поведінку при втомі. Як правило, ПЦБ з великими розмірами заповнювачів мають високу міцність на стиск завдяки вищому ступеню неоднорідності в структурі пор сумішей.

На даний момент не існує стандартної методики визначення водопроникності проникного бетону в лабораторії. Багато дослідників прийняли техніку ламінарного потоку води, представлені Американським інститутом бетону (ACI) Комітетом проникного бетону 522 [14]. Рисунок 4 (а) показує типовий метод визначення інфільтрації лабораторним пермеаметром. Верхня і нижня трубки (25 мм) спочатку видаляються зі стандартного циліндра 100 мм на 200 мм, щоб забезпечити рівномірний об'єм води і усунути будь-яке засмічення пор на дні зразка. Потім зразок закріплюється в термоусадочних

пластикових та гумових ущільнювальних кільцях. Зразок додатково утримується у гнучких гумових гільзах, з'єднаних з верхньою та нижньою трубами. Для створення зворотного тиску та запобігання кавітації на початку випробування передбачена стоякова труба, рівна висоті зразка. Засувка великого діаметру дозволяє швидко розпочати випробування.

Визначення водопроникності на місцевості є логістично складним; потрібна певна модифікація дорожнього покриття, щоб створити необхідний об'єм зразка, і відповідно велика кількість води. Щоб полегшити ці проблеми, фільтрація використовується як модель водопроникності. У фільтрації повідомляється лише про кількість води, що проходить через поверхню. Потік є ламінарним і поширюється поперек по заповнювачу таким чином, що об'єм змоченого дорожнього покриття набагато перевищує об'єм дорожнього покриття безпосередньо під випробуванням. Через це збільшення обсягу значення фільтрації можуть бути набагато більшими, ніж значення лабораторної водопроникності. Фільтрація виконується в полі за допомогою стандартного методу випробування на ступінь інфільтрації перерізу покриття із проникного бетону ASTM C1701, згідно з яким 300-мм кільце використовується для вимірювання проходу води у техніці постійної потоку.

Висота води підтримується на більш реалістичних від 10 мм до 15 мм для імітації очікуваних глибин дощової води. Хоча випробування на водопроникність на місцевості відрізняється від лабораторного тесту на водопроникність, при випробуванні на фільтрацію використовуються недорогі матеріали, він швидкий, простий у виконанні та здатний відрізнити поточні гідравлічні характеристики покриття. На рисунку 4 (б) показане випробування інфільтрації в польових умовах.



Рисунок 4 – Методи вимірювання інфільтраційних властивостей проникного цементобетону
а – лабораторним пермеаметром; б – польовий метод

Figure 4 – Methods of measuring infiltration requirements of the porous concrete
a – laboratory permeameter; b – field infiltration

Було зазначено, що кількість шарів ущільнення може знадобитися збільшити, щоб зменшити вертикальний розподіл пористості та потенціал руйнування на нижній поверхні, де пористість може бути більшою. Стійкість до стирання ПЦБ може бути оцінена за допомогою тесту Cantabro або тесту на стирання навантаженого колеса при тестуванні на стирання поверхні. Для покращення стійкості ПЦБ до стирання використовували волокно та латекс. ASTM C666 може бути використаний для оцінки морозостійкості ПЦБ, який може зберігати воду в макропорах і, отже, в результаті мати замерзлу воду при низьких температурах.

Властивості пор в цементному камені мають вирішальне значення для забезпечення міцністних та деформативних властивостей ПЦБ. Існує два типи властивостей пор – нетранспортні (NT) та транспортні (Т). Властивості NT включають загальну об'ємну пористість, розмір пор та їх розподіл. Властивості Т включають ефективну пористість, зв'язок пор та звивистість. Повна пористість визначається згідно ASTM C 1688, і фактично змінюється залежно від глибини. Середній ефективний розмір пор 3,4 мм повідомляється в дослідженні [15] (Kuang et al., 2010).

Властивості транспортних пор насправді мають важливе значення для транспортування води з поверхні до низу шару ПЦБ. Повна пористість ПЦБ складається з взаємопов'язаних, капілярних та замкнутих пор. Ефективна пористість - це взаємопов'язана частка пор (50–75% від загальної кількості). Збільшення вмісту цементної пасти зменшує зв'язок пор, що також виявляється залежним від типу заповнювача.

Проникність ПЦБ залежить від розміру заповнювача, рівня ущільнення, зернового складу та вмісту цементу і, як повідомляється, становить від 0,1 до 2 см/с. Дослідження [6] Chandrappa and Bilgiri (2016) надають достовірні висновки стосовно співвідношення між механічними властивостями, пористістю та проникністю ПЦБ (рис. 5).

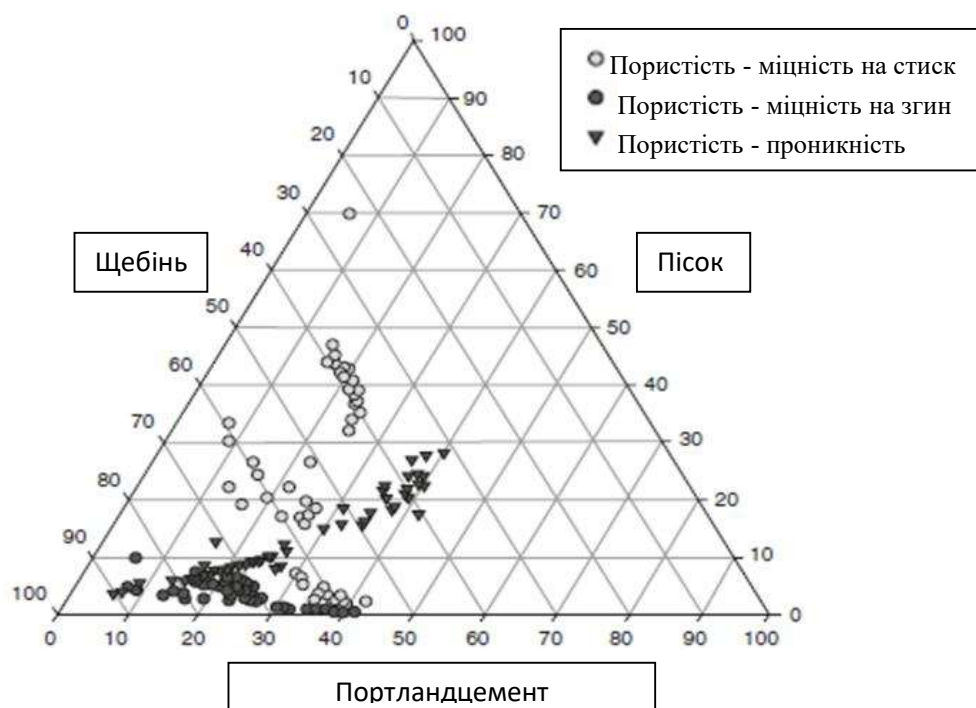


Рисунок 5 - Взаємозв'язок між різними властивостями проникного бетону (робота професора Krishna Prapoorna Biligiri [6, 10])

Figure 5 – Interrelationships between different properties of pervious concrete. (work Professor Krishna Prapoorna Biligiri [6, 10])

4. Проектування дорожнього одягу із водонепроникними шарами

Типовий дорожній одяг із проникним цементобетонним покриттям складається з шару ПЦБ, верхнього необов'язкового шару геотекстилю, шару основи, геотекстилю або геомембрани та додаткової основи на ґрунті земляного полотна (рис. 6).

Крім того, також може бути передбачений перериваючий або дренажний шар. Нижня геомембрана може бути проникною або непроникною, залежно від необхідності просочування води в ґрунт або ні.

Проникний цементобетон влаштовують як у шарах зносу, так і основах покриття. Усе це обумовлено переважаючою характеристикою над іншими цементобетонами – висока інфільтрація.

Проточні покриття дозволяють зливовим водам проникати в землю, тим самим досягаючи зменшення обсягу та забруднення. Типові значення швидкості інфільтрації проникного бетону коливаються від 0,20 см/с до 0,54 см/с. Необхідно, щоб проникні покриття зберегли свою пористість і високий рівень інфільтрації, щоб і надалі відповідати цілям боротьби зі зливовими водами, для яких вони були розроблені. Окрім цього, важливу роль відіграють величина пор, оскільки вони безпосередньо пов'язані зі швидкістю інфільтрації. Нещодавно розроблені комп'ютерні моделі дозволяють віртуально характеризувати попередню мікроструктуру бетону.

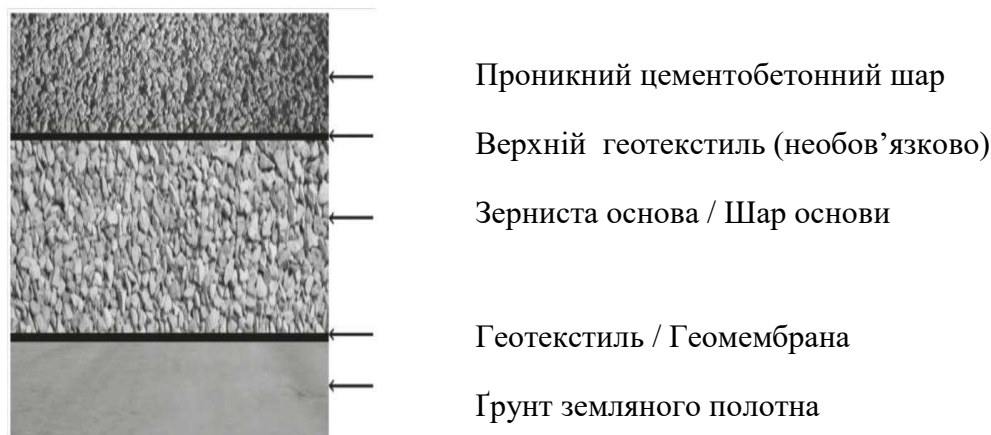


Рисунок 6 - Типовий переріз дорожнього одягу із проникного цементобетону (робота проф. Krishna Prapoorna Biligiri [6, 10])

Figure 6 – Typical cross section of pervious concrete. (work Professor Krishna Prapoorna Biligiri [6, 10])

5. Експлуатаційне утримання проникних покриттів

Типові руйнування для ПЦБ включають зношення швів, забруднення поверхні, сколювання та викришування. Міцність конструкції коритця із ПЦБ значною мірою залежить від товщини зернистої основи. Дослідження з використанням установки з падачим вантажем (FWD) показали, що розрахункові значення модулів ПЦБ, що приймаються при проектуванні, становлять $\frac{1}{4}$ від звичайних цементобетонних покриттів. Встановлено, що ПЦБ успішно пом'якшують неточковий забруднювач стоку шляхом ефективного видалення забруднюючих речовин і, отже, покращення якості інфільтрованої води що містить важкі метали, масла, фекальні матеріали та пил. Існує 3 механізми, за допомогою яких ПЦБ працюють над зменшенням забруднюючих речовин:

1. Фізичне очищення, при якому більша частина зважених твердих речовин поглинається криволинійними шляхами внутрішньої структури.
2. Хімічне очищення, при якому цементобетон, що має лужне середовище виділяє іони OH^- і CO_3^{2-} в контакт з забрудненою водою; іони реагують із забруднювачами і осаджують їх, а рН води також підвищується, роблячи її нейтральною від кислоти.
3. Біологічне очищення, при якому ряд мікробів, що існують у порах, допомагають споживати та розчиняти зважені тверді речовини.

Illgen та співавт. (2007) [16] та Illgen (2008) [17] дають деякі висновки з всебічного польового та лабораторного просочування та модельного дослідження різних типів «проникних» покриттів у Німеччині. Вони зазначили, що рівень інфільтрації різниться як просторово, так і протягом часу експлу-

атації. Наприклад, встановлено, що швидкість просочування між колесами транспортних засобів значно вища, ніж на смузі накату, де засмічення могло бути наслідком зношування від вібрації та удару шини. Також, залежно від типу покриття (наприклад, ФЕМІ або пористі покриття), пористого бетонного покриття), швидкість інфільтрації через 60 хвилин виявилася значно нижчою, ніж через 10 хвилин від початку інфільтрації. Вони прийшли до висновку, що рівень інфільтрації настільки сильно варіюється на конкретному місці через багато факторів, таких як локальне засмічення внаслідок конструкції або удару шини (див., наприклад, рисунок 7, від Illgen, 2008), що має більше сенсу прийняти імовірнісний або стохастичний підхід до цієї проблеми, а не рекомендовані значення або розгляд єдиного рівня проникнення. Вони також зазначили, що для конкретного покриття швидкість інфільтрації значно залежить від інтенсивності дощу - швидкість інфільтрації зростає зі збільшенням інтенсивності дощу, а потім вирівнюється до постійного значення, яке перевищує конкретну інтенсивність дощу.

Великі розміри пор, які дозволяють збільшити інфільтрацію, також можуть дозволити дрібним частинкам осаду накопичуватися в цих пустотах. Засмічення пор може значно обмежити роботу цих систем з гідрологічної точки зору. Щоб мінімізувати засмічення, потрібні правильне влаштування та експлуатація покриття. Вакуумне підмітання вулиць, промивка під тиском або їх комбінація є найбільш часто використовуваними методами для витіснення матеріалів, що закупорюють пори порушених покриттів.

Проникний бетон покращує якість води трьома способами. Перший спосіб полягає в тому, що поруватий бетон використовується разом з інфільтраційним або утримуючим шаром, запобігаючи рух забрудненої води по течії. Другий спосіб полягає в тому, що забруднюючі речовини в межах стоку дощової води адсорбуються на частинках заповнювача, коли вода проникає через систему. Третій спосіб полягає в тому, що покриття затримує відклади, до яких адсорбуються забруднювачі (поживні речовини та метали), в пористих пустотах.

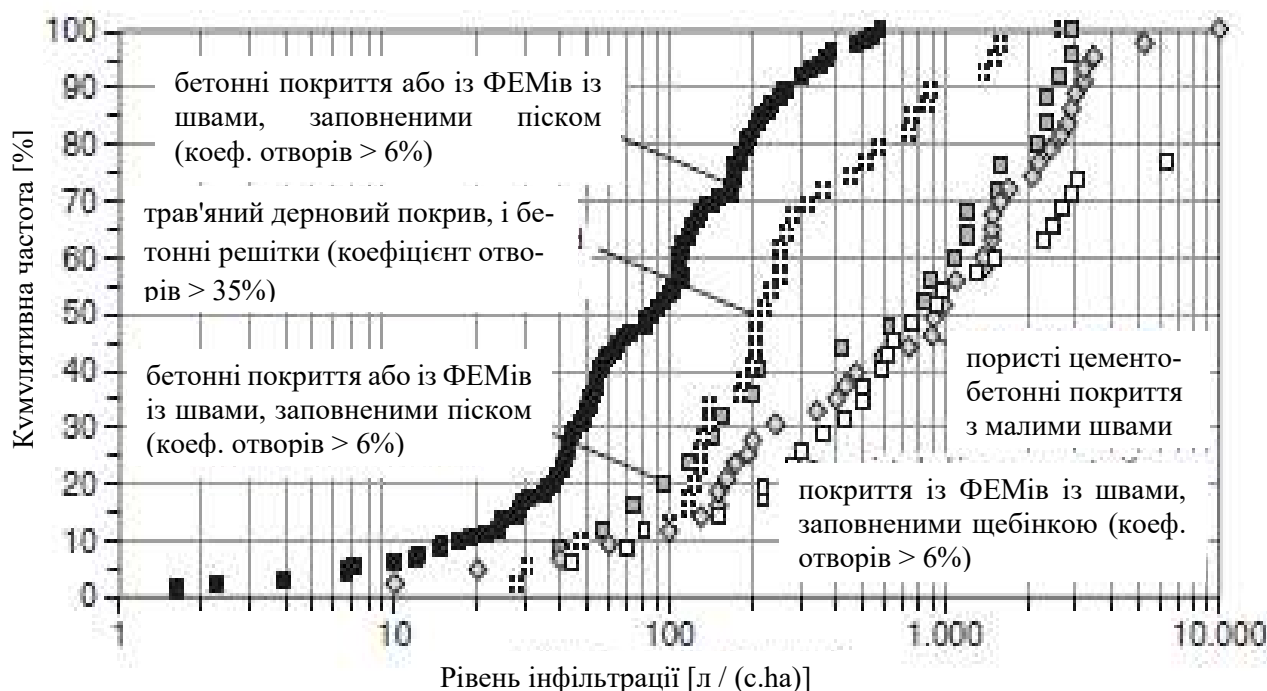


Рисунок 7 - Кумулятивна частота кінцевих показників інфільтрації загальних типів дорожнього покриття (проф. Dr.- Ing. Marc Illgen [10, 15-16])

Figure 7 – Cumulative frequency of final infiltration rates of common pavement types. (Prof. Dr.- Ing. Marc Illgen [10, 15-16])

Збільшення товщини може призвести до збільшення потенціалу очищення. Дослідження повідомляють про вилучення 94,3% фосфору. Повідомлено про позитивний досвід щодо видалення як важких металів (промислова зона), так і фекальних речовин та фосфору (стічні води).

Екораціональний потенціал у поєднанні з підвищеною безпекою руху сприяє використанню ПЦБ як будівельного матеріалу для парковок та дорожніх покриттів. Однак більш широкого застосування дренуючого бетону можна досягти, пом'якшивши наступні три ризики:

Ризик засмічення органічними та неорганічними матеріалами знижує гідропровідність.

Обмеження міцності зв'язку між заповнювачами збільшує ризик викришування заповнювача покриття, надмірного розтріскування та дефектоутворення, що призводить до прискореного зношування, особливо при інтенсивному русі великовантажних транспортних засобів.

Велика частка площі поверхні матеріалу, що зазнає негативного впливу навколишнього середовища, збільшує ризик втрати цілісності конструкції через зменшення довговічності [6-10].

Встановлено, що міцність зменшується приблизно на 50% за кожні 10% збільшення пористості [8] (Deo and Neithalath, 2010).

Як правило, міцність ПЦБ достатня для пропуску транспортних засобів з невеликою інтенсивністю руху. Пустоти засмічуються сміттям і пилом, а також здатність ПЦБ до інфільтрації, а отже, з часом при експлуатації знижується ефективність стоку зливової води. Повідомлялося, що верхні 25 мм ПЦБ засмічуються. Потенціал засмічення є нижчим при співвідношенні розміру пор або великих часток до великих або низьких пор, а максимум - коли розмір пор та розмір матеріалу, що забивається, однакові.

Найважливішою характеристикою проникного цементобетону є покращення зчеплення шасі ПС з вологим покриттям, швидке відведення зливових вод з поверхні покриття, зменшення ефекту аквапланування, зниження рівня шуму і вібрації ПС. Покриття з водонепроникного пористого матеріалу є альтернативним способом організації поверхневого водовідведення. Принцип роботи таких покриттів полягає у вільному прониканні зливових вод всередину дренуючого матеріалу покриття з можливістю їх подальшої фільтрації. Швидкість фільтрації при цьому залежить від дренуючої здатності цементобетону і поперечних ухилів покриття [6].

6. Техніко-економічні показники використання ПЦБ

Для проникного цементобетону не спостерігається значного збільшення початкових витрат відносно звичайного цементобетонного покриття (Tennis et al. 2004). Оскільки проникний цементобетон повноцінно виступає одночасно в ролі покриття та елемента дренажної та водовідвідної систем. Така технологія дорожнього покриття створює більш ефективне використання земель, усуваючи необхідність утримувати водойми, елементи водовідвідних систем або каналізаційну систему. Вартість життєвого циклу проникного цементобетону також набагато нижча за звичайне покриття, оскільки його можна переробити в кінці життєвого циклу. Це було широко визнано як варіант із найнижчою вартістю життєвого циклу, який доступний для влаштування (Ferguson 2005). Унікальна текстура поверхні пористого цементобетону в порівнянні зі звичайним бетонним покриттям забезпечує посилене тертя для шин транспорту і стійкість до заносу, запобігає виникненню небезпеки руху, особливо в сувору погоду, таку як сніг або дощ. Відкрита поверхня дренуючого цементобетону забезпечує швидке просочування та запобігає появі калюж, що може усунути розхитування та занос при температурі замерзання. Досвід показує, що пористе цементобетонне покриття дозволяє швидко розморожуватись через великі відкриті пустоти на поверхні (Bean et al. 2007). Порівняно зі звичайними покриттями, поруваті бетонні покриття мають багато інших переваг, перелічених нижче (Bean et al. 2007), (US EPA 1999), (Ferguson 2005):

- Можливість швидшого відводу поверхневих вод і зменшення витрат на дренажні споруди та водовідвідні системи;

- Зменшення температури покриття, забезпечення вільного обміну вологи та повітря у підземному ґрунті, що відповідно приносить користь росту рослин прилеглих територій;
- Збільшення опору ковзання та тертя поверхні, що забезпечить безпечний рух транспорту;
- Зменшення рівня шуму, на відміну від звичайного бетонного покриття. Розглядається як екологічний та переробний будівельний матеріал [18].

Недоліки проникного бетону

Великі переваги, пов'язані з екологічними, економічними та структурними проблемами, були рушійною силою все більшого застосування проникного бетону у всьому світі. Однак існують також недоліки та проблеми, які не були повністю вирішені, і ці проблеми перешкоджають використанню та влаштуванню проникного бетону. Проте його широке застосування було обмежене суперечливою інформацією та відсутністю єдиних стандартів, що стосуються довговічності, заморожування, міцності та належних вимог щодо використання та конструкції одягу. Недоліки проникного бетону, перелічені нижче, згадуються в міжнародній літературі, і для вирішення цих проблем необхідні додаткові дослідження (Balades et al. 1995), (Bean et al. 2007), (US EPA 1999) [17]:

- Порушаний бетон не справляється з постійним інтенсивним рухом вантажівок та легкових транспортних засобів через низьку міцність на стиск та вигин;
- Великі витрати на обслуговування та очищення покриття. Засмічення поверхні проникного цементобетонного покриття за досить короткий період значно зменшують його початкову дренажну здатність. Дренажна функція може повністю втратитись, якщо не проводити ефективного та своєчасного очищення;
- Стійкість проникного цементобетону до циклів заморожування-розморожування та дії протиожеледних хімікатів значно менша, ніж у звичайного цементобетону;
- Є проблеми з улаштуванням. З різними заповнюючими матеріалами рівень ущільнення також змінюється. Земляне полотно з рівномірною та стабільною поверхнею, належним вмістом вологи та достатньою проникністю є ключовим фактором для відводу води, яка інфільтрується через проникне цементобетонне покриття. Надмірне ущільнення може також спричинити набухання основи дорожнього чи аеродромного одягу.
- Вплив на сусіднє середовище та розвинену територію. Необхідно перешкоджати рухливим відкладам з околиць або з будівельних майданчиків перекривати пори. Необхідний нагляд повинен бути врахований при розробці. Зокрема, стік з освоєної території, ймовірно, міститиме нижчі рівні навантаження відкладень, що спричинить засмічення
- Початковий захист важливий для тривалого терміну експлуатації пропускового бетонного покриття. Наприклад, попередній бетон слід обробити після закінчення сусідньої ділянки та не допускати руху транспорту на попереднє покриття. Зазвичай це обговорюється під час передбудівельної наради [17].

Встановлено, що ПЦБ знижують вартість життєвого циклу на 30% у порівнянні зі звичайними покриттями зі зливовими стоками. FHWA повідомляє, що вартість встановлення ПЦБ на 15–20% перевищує звичайний цементобетон. В даний час ПЦБ рекомендується використовувати для доріг з низькою інтенсивністю руху, місцевих вулиць, доріжок та проїздів. Продовжуються дослідження щодо розробки високоміцних ПЦБ, які в майбутньому можуть бути використані на автомобільних дорогах та аеродромах.

Висновки

У роботі розглядається проникний бетон як стійке рішення об'єктів транспортної інфраструктури для міських територій. На основі огляду літератури, проникний бетон можна успішно використовувати при правильному проектуванні, укладанні та обслуговуванні.

Огляд світового досвіду досліджень пористого (дренуючого) цементобетону, улаштування та експлуатації шарів дорожнього та аеродромного одягів з нього показує техніко-економічну доцільність і ефективність їх застосування.

Це матеріал з високою відкритою пористістю, яка забезпечує хороші шумопоглинаючі властивості і дренажну здатність в поєднанні з шорсткістю, рівністю і поперечним тертям

Однак у проникного бетону є деякі проблеми з експлуатаційними характеристиками, в основному менша міцність і довговічність через його пористу структуру та ризик втрати гідравлічної провідності через засмічення сміттям та твердими предметами. Проникний бетон загалом підходить для малогабаритних дорожніх та аеродромних робіт, таких як паркінги, місця стоянок ПС, проїзди, зупинки транспорту, заїзди громадського транспорту для посадки пасажирів, велосипедні доріжки, або тротуари тощо. Однак тут є великі перспективи для дослідження технологічних аспектів, щоб скористатися перевагами та усунути недоліки даного матеріалу, оскільки пористе покриття здається перспективним елементом будівництва для довговічної експлуатації.

Перелік посилань

1. Павліха Н.В. Модернізація транспортних коридорів в умовах економічної нестабільності / Н.В. Павліха, П.В. Кузьмін // Збірник наукових праць Національного університету державної податкової служби України. – Ірпінь, 2011. Вип.11. С. 404-417..
2. American Concrete Institute. *Pervious Concrete*. ACI Committee 522, technical committee document 522R-06, 2006.
3. Tennis, P.D., Leming, M.L., and Akers, D.J. *Pervious Concrete Pavements*. EB302, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, 2004.
4. ДСТУ 8858:2019 Суміші цементобетонні дорожні та цементобетон дорожній. Технічні умови.
5. Радовский Б.С. Вероятностно-геометрический подход к структуре и оценке физико-механических свойств материалов дорожной конструкции. // Новое в проектировании конструкций одежд. М: 1988. С. 37 – 50.
6. Chandrappa A. and Biligiri K. Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research findings and future prospects: a state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 111: 2016. PP. 262–274.
7. Ланге Ю.Г. Применение пористого (дренирующего) цементобетона при строительстве слоев дорожной одежды. Обзорная информация. [Электронный ресурс] – 2007. – Вып.6. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data1/56/56228/index.htm> .
8. Deo O. and Neithalath N. A review of sustainable drainage systems (SuDS): a soft option for hard drainage. *Geography*. 88 (2): 2011. PP. 99–107.
9. Nguyen D.H., Sebaibi N., Boutouil M., Leleyter L. and Baurd F. *Wetlands* (third edition). Chichester: Wiley. 2014.
10. Yahia A. and Kabagire D. Hydrologic behaviour of stormwater infiltration trenches in a central urban area during 2/3 years of operation. *Water Science and Technology*, 39 (2): 2014. PP. 217–224.
11. G.L. Sivakumar Babu, Prithvi S. Kandhal, Nivedya Mandankara Kottayi, Rajib Basu Mallick, Amirthalingam Veeraragavan. *Pavement Drainage. Theory and Practice*. New York. CRC Press Taylor & Francis Group. 2019. 243 p.

12. Fu, T.F., Yeih, W., Chang, J.J. and Huang, R. 2014. The influence of aggregate size and binder material on the properties of pervious concrete. *Journal of Advances in Materials Science and Engineering*, 2014: 17 p.
13. Zhong R., Wille K. Material design and characterization of high performance pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 2015, issue 98 (9), pp.51-60. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.027.
14. John T. Kevern. Evaluating Permeability and Infiltration Requirements for Pervious Concrete. – *Journal of Testing and Evaluation*. 2007. PP. 544-553.
15. Kuang X., Sansalone, J., Ying, G. and Ranieri, V. 2010. Pore-structure models of hydraulic conductivity for permeable pavement. *Journal of Hydrology*, 399: PP. 148–157.
16. Illgen, M. 2008. Infiltration and surface runoff processes on pavements: Physical phenomena and modelling. 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, 2008.
17. Illgen, M., Harting, K., Schmitt, T.G. and Welker, A. 2007. Runoff and infiltration characteristics of pavement structures – review of an extensive monitoring program. *Water Science and Technology*, 56 (10): PP. 133–140.
18. Kováč1 M., Sičáková A. Pervious concrete as a sustainable solution for pavements in urban areas / M. Kováč, A. Sičáková // “Environmental Engineering” (27–28.04.2017) 10th International Conference. Lithuania, 2017, pp. 2-8.

PROSPECTS OF USING PENETRATED CEMENT CONCRETE IN THE CONSTRUCTION OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE OBJECTS

Gameliak I., Doctor of Technical Science (s), National Transport University, Kyiv, Ukraine, gip65n@gmail.com

Rutkovska I., Candidate of Science (Engineering), National Transport University, Kyiv, Ukraine, ria_ntu@ukr.net

Herasimenko A., National Transport University, Kyiv, Ukraine, alla_gerasimenko@ukr.net

Filishchuk M., National Transport University, Kyiv, Ukraine, mariaoleksuk6@gmail.com

Abstract. This article presents the analysis of the international experience of the use of pervious concrete in transport infrastructure. It provides the advantages and disadvantages of the material and the results of personal laboratory tests of relevant concrete samples.

The object of the research is the use of pervious concrete in the construction of transport infrastructure.

The objective of the paper is to justify the use of pervious concrete in the construction of transport infrastructure by analyzing previous international experience and lab tests of the corresponding concrete samples.

Research methods included a analysis of the international and domestic literature, the evaluation of the experience in the use of the pervious concrete, and laboratory tests of the corresponding concrete samples.

A review of the world experience connected with research of pervious (draining) concrete, installation and operation of layers of aerodrome surface made of it, proved their technical and economic relevance and effectiveness of their application. Pervious concrete is a material with high open porosity, which provides good sound-absorbing properties and drainage ability together with roughness, smoothness, and transverse friction.

These are advantages of pervious concrete pavements, according to foreign studies: a rapid removal of water from the surface of the pavements in case of rain and improved drainage of road and airfield pavements reduce the risk of aquaplaning vehicles and increase traffic safety in rainy weather; increased and stable surface roughness; reduced level of noise provided by vehicles. The draining ability of the pavements makes it almost dry. It also has a high degree of sound absorption.

The results of the article can be implemented in various technologies of construction and repair of transport infrastructure.

The search for the optimal composition of pervious concrete for its further use in the technology of construction and repair of various objects is the main purpose of predictive assumptions about the development of the object of study.

Keywords: pervious concrete, road, airfield, road pavement, road surface, water permeability, defects.

References

1. Pavlihin N.V., Kuzmin P.V. Modernizatsia transportnih koridoriv v umovah ekonomichnoi nestabilnosti [Modernization of transport corridors in conditions of economic instability] – Irpin, 2011. – issue 11, pp. 404-417.
2. American Concrete Institute. *Pervious Concrete*. ACI Committee 522, technical committee document 522R-06, 2006.
3. Tennis, P.D., Leming, M.L., and Akers, D.J. Pervious Concrete Pavements. EB302, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, 2004.
4. DSTU 8858:2019 Sumishi tsementobetonni dorozhni ta tsementobeton dorozhnii. Tekhnichni umovy.
5. Radovskyi B.S. Veroiatnostno-heometrycheskyi podkhod k strukture y otsenke fizyko-mekhanicheskikh svoistv materialov dorozhnoi konstruksyy. // Novoe v proektyrovanny konstruksii odezhd. M: 1988. S. 37 – 50.
6. Chandrappa A. and Biligiri K. Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research findings and future prospects: a state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 111: 2016. PP. 262–274.
7. Lange Yu. H. Primenenie poristogo (dreniruyushchogo) tsementobetona pri stroitelstve sloyev dorozhnoy odezhdyy [The use of porous (drainage) cement concrete in the construction of pavement layers. Survey information] – 2007. – issue 6. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data1/56/56228/index.htm>
8. .Deo O. and Neithalath N. A review of sustainable drainage systems (SuDS): a soft option for hard drainage. *Geography*. 88 (2): 2011. PP. 99–107.
9. Nguyen D.H., Sebaibi N., Boutouil M., Leleyter L. and Baurd F. *Wetlands* (third edition). Chichester: Wiley. 2014.
10. Yahia A. and Kabagire D. Hydrologic behaviour of stormwater infiltration trenches in a central urban area during 2/3 years of operation. *Water Science and Technology*, 39 (2): 2014. PP. 217–224.
11. G.L. Sivakumar Babu, Prithvi S. Kandhal, Nivedya Mandankara Kottayi, Rajib Basu Mallick, Amirthalingam Veeraragavan. *Pavement Drainage. Theory and Practice*. New York. CRC Press Taylor & Francis Group. 2019. 243 p.
12. Fu, T.F., Yeih, W., Chang, J.J. and Huang, R. 2014. The influence of aggregate size and binder material on the properties of pervious concrete. *Journal of Advances in Materials Science and Engineering*, 2014: 17 p.
13. Zhong R., Wille K. Material design and characterization of high performance pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 2015, issue 98 (9), pp.51-60. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.027.
14. John T. Kevern. Evaluating Permeability and Infiltration Requirements for Pervious Concrete. – *Journal of Testing and Evaluation*. 2007. PP. 544-553.
15. Kuang X., Sansalone, J., Ying, G. and Ranieri, V. 2010. Pore-structure models of hydraulic conductivity for permeable pavement. *Journal of Hydrology*, 399: PP. 148–157.

16. Illgen, M. 2008. Infiltration and surface runoff processes on pavements: Physical phenomena and modelling. 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, 2008.
17. Illgen, M., Harting, K., Schmitt, T.G. and Welker, A. 2007. Runoff and infiltration characteristics of pavement structures – review of an extensive monitoring program. *Water Science and Technology*, 56 (10): PP. 133–140.
18. Kováčl M., Sičáková A. Pervious concrete as a sustainable solution for pavements in urban areas / M. Kováč, A. Sičáková // “Environmental Engineering” (27–28.04.2017) 10th International Conference. Lithuania, 2017, pp. 2-8.