

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВОДОПРОНИКНИХ УДОСКОНАЛЕНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ДОЩОВИМ СТОКОМ

© Качмар І. З., Жук В. М., 2019

В умовах різкого зростання площ урбанізованих водонепроникних територій питання управління поверхневим стоком є особливо актуальним. Для вирішення цієї проблеми розроблено та досліджено цілу низку методів, що ґрунтуються на накопиченні, тимчасовому затриманні та фільтрації дощового стоку. Використання водопроникних удосконалених покриттів – це ефективний метод регулювання поверхневого стоку, поширений у закордонній практиці, що дає змогу зменшити поверхневий стік, забезпечує його часткове очищення, покращує безпеку руху на дорогах. У роботі проаналізовано ефективність управління дощовим стоком за допомогою водопроникних удосконалених покриттів. Проаналізовано основні конструктивні особливості влаштування систем ВУП для ґрунтів різної проникності. Розглянуто типовий склад пористого бетону та проаналізовано його основні фізико-механічні та гідравлічні характеристики. Окреслено оптимальні діапазони зміни міцності на стиск пористих бетонів (5–30 МПа), об’ємної пористості (15–25 %) та коефіцієнта фільтрації (2–5,4 мм/с), що підтверджено власними експериментальними дослідженнями авторів (коефіцієнт вільної фільтрації – 7,4–23,0 мм/с при об’ємній пористості зразків 0,189–0,349 та міцності на стиск 4,04–13,85 МПа). Проаналізовано можливий вплив холодних кліматичних умов та процесу кольматації на функціонування водопроникних удосконалених покриттів.

Ключові слова: управління дощовим стоком, водопроникні удосконалені покриття, пористий бетон, об’ємна пористість, коефіцієнт фільтрації, міцність на стиск.

I. Z. Kachmar, V. M. Zhuk
Lviv Polytechnic National University
Department of Hydraulic and Sanitary Engineering

FEATURES OF THE USE OF PERVIOUS PAVEMENTS FOR THE STORMWATER MANAGEMENT

© Kachmar I. Z., Zhuk V. M., 2019

In conditions of intensive increasing of urbanized impervious areas, stormwater management became especially relevant. To solve this problem, a number of methods have been developed and investigated, which are based on the retention, detention or filtration of stormwater runoff. Stormwater management by the pervious pavements is an effective method to control surface runoff; it is widely used in foreign practice, allowing to reduce the runoff volume, provides its preliminary treatment, improves the safety on the roads. Efficiency of stormwater management using the permeable pavement systems is discussed in the paper. The review identified four typical pervious paving surfaces: porous concrete, porous asphalt, permeable interlocking concrete pavers, concrete and plastic grid pavers. The main characteristics of these types of pervious pavement are discussed in this paper. Besides the

structural features of the previous pavement systems for soils of different permeability are analyzed. The typical composition of porous concrete and its basic physical-mechanical and hydraulic parameters are considered. The optimal ranges of compressive strength of porous concrete (5–30 MPa), volume porosity (15–25 %), and filtration coefficient (2–5.4 mm/s) are determined, which are in good accordance with author's experimental results (permeability coefficient 7.4–23.0 mm/s, volume porosity 0.189–0.349 and the compressive strength 4.04–13.85 MPa). The possible influences of cold climatic conditions and the clogging process onto the permeable pavements maintenance are discussed. Different methods of maintenance, including vacuum sweeping and high pressure washing are considered.

Key words: stormwater management, pervious pavement, porous concrete, volume porosity, filtration coefficient, compressive strength.

Постановка проблеми. Протягом останніх десятиліть спостерігається значне зростання обсягів дощового стоку, пов'язане з інтенсивною розбудовою міст та з відповідним збільшенням площ водонепроникних територій. Питання комплексного регулювання поверхневого стоку постає все гостріше та потребує ефективного вирішення. Сьогодні відомо близько двох десятків методів управління поверхневим стоком, серед яких особливе місце займають фільтраційні методи. Одним з найперспективніших фільтраційних методів регулювання дощового стоку є влаштування водопроникних удосконалених покриттів (ВУП).

Мета роботи – на підставі огляду наукових праць проаналізувати ефективність регулювання дощового стоку за допомогою водопроникних удосконалених покриттів.

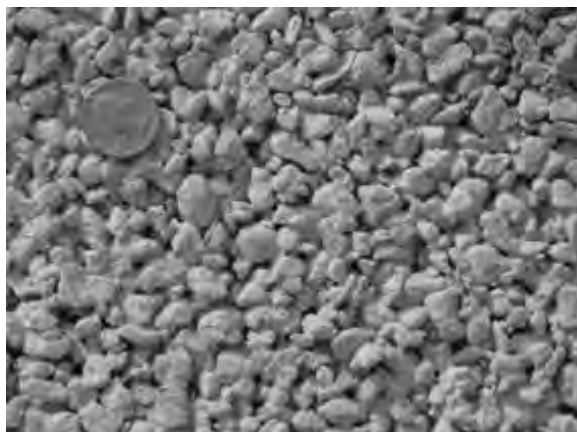
Використання водопроникних удосконалених покриттів – це один з найперспективніших фільтраційних методів регулювання дощового стоку [7, 11, 12, 14, 15, 17]. Принцип роботи ВУП ґрунтується на процесі інфільтрації дощових стічних вод з удосконаленого покриття безпосередньо в ґрунт або через дренажну систему в каналізаційну мережу. Найпоширенішими системами ВУП є покриття з пористого бетону та асфальту, проникна бруківка та проникні блоки (рис. 1).

Пористий бетон почали використовувати в будівництві ще на початку ХІХ ст., тоді як науково обґрунтоване застосування ВУП для регулювання дощового стоку розпочалося у США та Японії у 1970-ті рр. [1, 11]. Сьогоднішні системи ВУП широко використовують у інженерній практиці багатьох країн світу: США, Канади, Великобританії, Нідерландів, Німеччини, Франції, Швейцарії, Росії, Індії, Японії, Австралії та ін. [1, 8, 11, 13, 17]. Наприклад, у Швейцарії близько третини від загальної протяжності автомагістралей збудовано з використанням технології ВУП [13], а у Нідерландах близько 90 % дорожніх покриттів замінено на пористий асфальт [8]. Останнє десятиліття фільтраційні методи регулювання поверхневого стоку активно досліджують також і в Україні [19, 20, 22, 23].

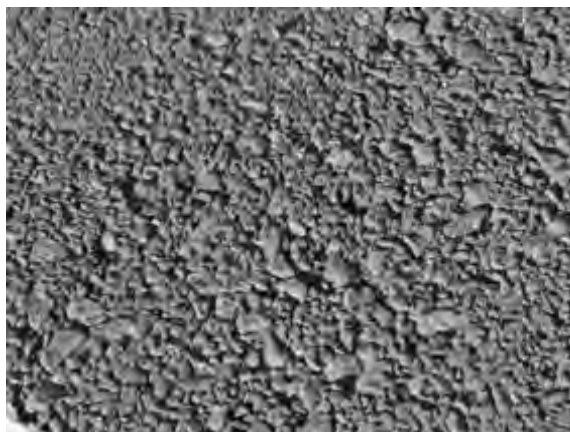
ВУП мають економічні та екологічні переваги порівняно з водонепроникними покриттями. ВУП дають змогу зменшити обсяг дощового стоку, що надходить у каналізаційну мережу, забезпечують його очищення та сприяють поповненню запасів ґрунтових вод; забезпечують зниження рівня шуму та покращують безпеку руху на дорогах, оскільки ВУП мають більший опір ковзанню порівняно з аналогічними водонепроникними покриттями. Влаштування ВУП зменшує необхідність у будівництві спеціальних споруд для регулювання поверхневого стоку, знижує ефект “теплового острова”, дає змогу зменшити кількість антиобморозувальних засобів.

Пористий асфальт виготовляють з використанням звичайного бітумного асфальту та заповнювачів різних фракцій за винятком дрібного заповнювача, з можливим використанням модифікаторів.

Проникні блоки бувають різних форм і розмірів. Із готових блоків формують моделі з отворами, крізь які просочується поверхневий стік. Площа отворів, як правило, становить 8–20 % від загальної площі поверхні покриття; отвори заповнюють дрібною гравійною сумішшю чи ґрунтом. Товщина такого покриття – 60 мм і більше. Проникну бруківку влаштовують як і пористі блоки, заповнюючи отвори дрібним проникним матеріалом (щебінь, гравій).



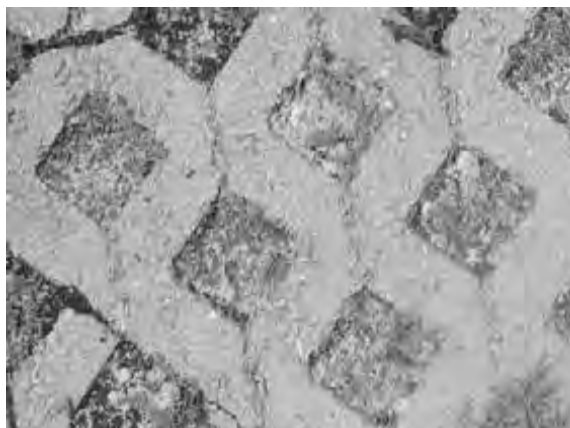
a



б



в



г

Рис. 1. Види пористих покриттів: а – пористий бетон; б – пористий асфальт; в – проникна бруківка; г – проникні блоки

Пористий бетон виготовляють з портландцементу, заповнювача і води; дрібний заповнювач майже не використовують. Додатковими в'язучими можуть бути: зола, пуцолан, доменний гранульований шлак. На відміну від традиційних бетонів, водопроникні бетони характеризуються високою пористістю – в межах від 15 % до 35 %. За відсутності піску основними характеристиками цементної суміші є: водно-цементне масове відношення В/Ц, відношення крупного заповнювача до цементу З/Ц (за масою). Питома маса пористих водопроникних бетонів становить 1300–2000 кг/м³ [2, 15, 16]. У табл. 1 наведено рекомендації щодо складу пористих бетонів, наведені у різних джерелах [2, 3, 4, 14, 16].

Таблиця 1

Рекомендовані пропорції будівельних матеріалів для виготовлення пористого бетону

Показник	Рекомендовані значення, за даними:				
	[2]	[3]	[4]	[14]	[16]
Маса складових пористого бетону, в 1 м ³ :					
– цемент, кг	315–415	321–487	287–345	237–326	270–415
– крупний заповнювач, кг	1200–1400	1373–1692	1542–1620	–	1190–1480
Відношення В/Ц (мас.)	0,28–0,4	0,25–0,35	0,3	0,26–0,35	0,27–0,34
Відношення З/Ц (мас.)	(4,0-6,0):1	(3,0-5,0):1	(4,5–5,6):1	–	(4,0–4,5):1

Ефективність роботи ВУП істотно залежить від його конструктивних характеристик та їх відповідності місцевим кліматичним та технічним умовам. ВУП рекомендують влаштовувати на ґрунтах, що характеризуються коефіцієнтом фільтрації понад 12,7 мм/год і вмістом глинистих

частинок не більше 30 % (рис. 2, а) [6, 9]. Проте, навіть повністю водонепроникна ґрунтова основа не є перешкодою для використання водопроникних покриттів – у цьому випадку влаштовують спеціальний дренаж (рис. 2, б) [3].

Як правило, товщина пористого покриття залежить від виду покриття, а також від функціонального призначення ділянки з пористим покриттям (пішохідна доріжка, паркінг, міжбудинкові дороги та ін.) і змінюється в межах 65–200 мм [9, 10, 11, 17].

Фільтрувальний шар 2 влаштовують з гравію фракції 10–20 мм завтовшки 25–50 мм. Цей шар слугує своєрідним фільтром та основою для рівномірного укладання пористого покриття [10]. Шар для накопичення стоку 3, як правило, складається з крупного гравію чи щебеню фракції 40–70 мм, пористість якого становить 30–40 %. Висота цього шару залежить від необхідного обсягу для тимчасового затримання дощового стоку, з розрахунком, щоб повне його спорожнення відбулося за час від 12 до 72 год (оптимальний час – 24 год), а в процесі наповнення вода не піднімалася вище від нижньої поверхні пористого покриття 1 [17]. Необхідний обсяг для тимчасового затримання шаром 3 залежить від обсягу стоку, що випав безпосередньо на пористе покриття та від обсягу стоку, що потрапляє на пористе покриття з навколишніх водонепроникних територій.

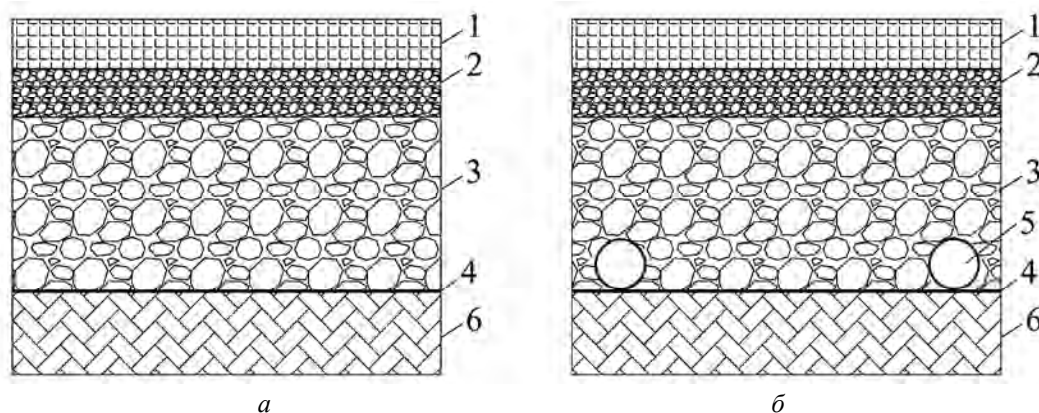


Рис. 2. Типові конструкції водонепроникних удосконалених покриттів:

а – без дренажної системи (при $k_f > 12,7$ мм/год); б – з використанням дренажу (при $k_f \leq 12,7$ мм/год); 1 – водонепроникне пористе покриття; 2 – верхній фільтрувальний шар; 3 – шар накопичення стоку; 4 – геотекстильне полотно; 5 – дренажні труби; 6 – природний ґрунт

У випадках, якщо коефіцієнт фільтрації ґрунту $k_f < 12,7$ мм/год, у конструкції ВУП додатково передбачають дренажну систему 5 (рис. 2, б). Для її влаштування, як правило, використовують перфоровані пластикові труби діаметром 100–150 мм [16]. Для можливості збору стоку і відведення його в каналізаційну мережу дренажні лінії розташовують в нижній частині покриття. Пропускна здатність дренажної системи повинна бути більшою ніж максимальна витрата притоку.

Геотекстильне полотно 4 виконує функцію бар'єра для запобігання проникненню осадів у кам'яне завантаження [9, 11], хоча можна і уникати використання геотекстильного полотна, оскільки його засмічення з часом може вплинути на фільтраційну здатність покриття загалом.

Мінімальна допустима глибина залягання ґрунтових вод від низу ВУП становить 0,6–1 м. Рекомендований похил покриття не повинен перевищувати 2–5 %, а похил місцевості – 0,5 % [6, 9, 11].

Результати фізико-механічних досліджень ВУП показали, що залежно від пористості та водно-цементного відношення міцність покриттів на стиск становить 5–30 МПа, а на згин – 1,0–3,8 МПа [1, 2, 15, 16]. На початку експлуатації дорожнього покриття з ВУП за інтенсивного руху транспорту можливе незначне відокремлення слабозв'язаного заповнювача, проте через кілька тижнів стан покриття повністю стабілізується [16].

Дослідження гідравлічних характеристик свідчать, що відносна затримувальна здатність ВУП у межах 70–80 % річного стоку; коефіцієнт фільтрації – 2–5,4 мм/с [13], а для водонепроникних покриттів цей показник не перевищує 10^{-3} см/с; пористість водонепроникного покриття становить

15–25 % [9, 11, 17] та іноді досягає 35–40 % [3, 17]. Коефіцієнт стоку для нового ВУП змінюється в межах $\psi_{\text{mid}}=0,18\text{--}0,29$ [7], що значно менше, ніж для удосконалених водонепроникних покриттів (згідно з чинними в Україні нормами $\psi_{\text{mid}}=0,95$).

Експериментальні результати, представлені авторами в роботі [21], підтвердили особливо високу пропускну здатність взірців пористого бетону: коефіцієнт вільної фільтрації – 7,4–23,0 мм/с за об'ємної пористості зразків 0,189–0,349 та міцності на стиск – 4,04–13,85 МПа.

Важливою перевагою ВУП є забезпечення попереднього очищення поверхневого стоку. Як показали численні експериментальні дослідження, водопроникні удосконалені покриття затримують 82–95 % від загального вмісту завислих речовин [7, 9, 14]. Є також дані щодо ефекту очищення за іншими показниками: за загальним фосфором – 50–80 %; за загальним азотом – 65–80 %; за важкими металами – 60–90 % [9, 14, 18]. Встановлено, що важкі метали, які затримуються під час інфільтрації у порожнинах покриття, не становлять загрози забруднення довкілля навіть після 8 років експлуатації [11].

Окремою проблемою є функціонування ВУП у холодних кліматичних умовах. Важливим завданням при влаштуванні водопроникних покриттів у таких умовах є визначення мінімальних розмірів шару накопичення стоку 3, достатніх, щоб уникнути насичення водою верхніх шарів та їх промерзання. Відомі результати експериментальних досліджень, які свідчать, що водопроникні покриття успішно використовували у холодних кліматичних умовах протягом 10–15 років і більше [14], окрім того вони забезпечують швидше танення снігу, що дає змогу зменшити використання антиобморожувальних засобів [1, 15, 18]. Підвищити функціональні показники пористого бетону в умовах холодного клімату можна, використовуючи спеціальні повітрязахоплюючі добавки, латексні добавки та волокна, дрібний заповнювач у невеликих кількостях, а також влаштуванням посиленого дренажу [12, 14, 15]. Отже, за умови недопущення насичення водою верхнього шару, системи ВУП цілком ефективно функціонують в холодних кліматичних умовах.

У процесі експлуатації ВУП доволі високою є ймовірність їх забруднення піском, пилом, завислими речовинами, що зменшує проникність покриття та його ефективність. У зв'язку з цим ВУП доцільно використовувати в регіонах, де немає проявів вітрової ерозії [11]. Зменшення ефекту кольматації ВУП досягається за рахунок високого рівня благоустрою (огороження газонів і ґрунтових покриттів бордюрами та ін.), а також за допомогою регулярного очищення ВУП (миття під високим тиском, вакуумне підмітання та комбіноване очищення) за умов постійного спостереження за станом покриття. Є дані, що очищення ВУП відновлює їх фільтраційну здатність до 80–90 % від початкового значення [6, 11, 17, 18].

Висновки. Використання водопроникних удосконалених покриттів – це перспективний метод управління дощовим стоком, що дає змогу регулювати гідрологічний баланс урбанізованих територій, зменшити пікові навантаження на мережі та споруди водовідведення та частково очистити поверхневий стік. Проаналізовано конструктивні особливості влаштування систем ВУП для ґрунтів різної проникності. Розглянуто та проаналізовано типовий склад пористого бетону та його основні фізико-механічні та гідравлічні характеристики; окреслено діапазони зміни об'ємної пористості, міцності на стиск та коефіцієнта фільтрації, підтверджені власними експериментальними дослідженнями авторів.

Невирішеними залишають теоретичні та практичні питання, пов'язані із водорегулювальною функцією ВУП. Детальнішого дослідження потребують також питання, що стосуються динаміки пропускання поверхневого стоку, зміни пористості ВУП в часі внаслідок кольматації, методів вимірювання фактичного коефіцієнта фільтрації ВУП та ін.

1. Arhin S. A., Madhi R. *Optimal mix designs for pervious concrete for an urban area // International Journal of Engineering Research & Technology, Vol. 3, No. 12. – 2014. – P. 42–50.*
2. Bassuoni M. T., Sonebi M. *Pervious concrete: A sustainable drainage solution // Concr., The Concr. Soc. – 2010. – 44. – 14–16.*
3. Chandrappa A. K., Biligori K. P. *Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: A hydrodynamic approach // Constr. Build Mater. –*

2016. – 123. – P. 627–637. 4. Crouch L. K., Pitt J., Hewitt R. Aggregate effects on pervious portland cement concrete static modulus of elasticity // *J. Mater. Civ. Eng.* – 2007. – 19. – P. 561–568. 5. Cui X., Zhang J., Huang D., Gon X. Measurement of permeability and the correlation between permeability and strength of pervious concrete // *1st International Conference on Transportation Infrastructure and Materials.* – 2016. – P. 885–892 6. Debo T. N., Resse A. J. *Municipal stormwater management.* – Lewis Publisher. – 1995. – 1154 p. 7. Ferguson B. K. *Porous pavements – Integrative studies in water management and land development.* – 2005. – 600 p. 8. García L. Á., Schlangen E., Van de Ven M. Induction healing of asphalt mastic and porous asphalt concrete // *Contents lists available at ScienceDirect “Construction and Building Materials”* (2011): p. 3746–3752. 9. *Georgia stormwater management manual* // AMEC Earth and Environmental Center for Watershed Protection. – Vol. 2: *Technical Handbook.* – 2001. – 844 p. 10. Houle K. M., Roseen R. M., Ballesterio T. P., Briggs J. F., Houle J. J. *Examinations of pervious concrete and porous asphalt pavements performance for stormwater management in Northern climates* // *Proc., World Environmental and Water Resources Congress, Great Rivers, 2009.* – P. 1105–1122. 11. Patil V. R., Gupta A. K., Desai D. B. Use of pervious concrete in construction of pavement improving their performance // *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering.* – 2009. – № 2 p. 54-56. 12. Pindado M. A., Aguado A., Josa A. Fatigue behavior of polymer modified porous concretes // *Cem. Concr. Res.* – 1999. – 29. – p. 1077–1083. 13. Poulikakos L. D. et al. *Mechanical properties of porous asphalt. Recommendations for standardization* // *Swiss Federal Laboratory for Materials Testing and Resarch. Switzerland.* – 2006. – 110 p. 14. Schaefer V., Wang K., Suleiman M., Kevern J. *Mix design development for pervious concrete in cold weather climates* // *National Concrete Pavement Technology: Final Report.* – 2006. – 85 p. 15. Sonebia M., Bassuonib M., Yahiac A. *Pervious concrete: Mix design, properties and applications* // *RILEM Technical Letters.* – 2016. – p. 109–115. 16. Tennis P. D., Leming M. L., Akers D. J. *Pervious concrete pavement* // *Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, USA.* – 2004. – 36 p. 17. Wanielista M., Chopra M., Spence J., Ballock C. *Construction and maintenance assessment of pervious concrete pavements* // *Stormwater Management Academy University of Central Florida, Orlando: Final Report.* – 2007. – 182 p. 18. Weiss P. T., Kayhanian M., Khazanovich L., Gulliver J. S. *Permeable pavements in cold climates: State of the art and cold climate case studies. Report.* Minnesota. USA. – 2015. – 375 p. 19. Жук В. М., Бошота В. В. Теоретичне дослідження залежності висоти наповнення ексфільтраційної траншеї від розрахункової тривалості дощу // *Вісн. Нац. ун-ту “Львів. політехніка” “Теорія і практика будівництва”.* – 2012. – № 742. – С. 249–256. 20. Жук В. М., Качмар І. З. Теоретичний розрахунок накопичення поверхневого стоку на поверхні водопроникних удосконалених покриттів // *Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Теорія і практика будівництва”.* – 2015. – № 823. – С. 122–128. 21. Качмар І. З., Жук В. М., Вовк Л. І. Експериментальні дослідження гідравлічних та фізико-механічних характеристик зразків з пористого водопроникного бетону // *Ресурси природних вод Карпатського регіону / Проблема охорони та раціонального використання: Матеріали П'ятнадцятої міжнародної науково-практичної конференції: Збірник наукових статей – Львів: НУ “Львівська політехніка”, 2016. – С. 171–174.* 22. Ткачук О. А., Шевчук О. В. Конструктивні особливості інфільтраційних майданчиків з водопроникними покриттями // *Науково-технічний, виробничий та інформаційно-аналітичний журнал “Наука та будівництво”, Київ.* – 2016. – 1(7). – С. 38–41. 23. Ткачук С. Г., Жук В. М. *Регулювання дощового стоку в системах водовідведення: монографія.* – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 216 с.

References

1. Arhin S. A. and Madhi R. (2014), “Optimal mix designs for pervious concrete for an urban area”, *International Journal of Engineering Research & Technology*, Vol. 3, No 12, pp. 42–50. 2. Bassuoni M. T. and Sonebi M. (2010), “Pervious concrete: A sustainable drainage solution”, *Concr., The Concr. Soc.*, No 44, pp. 14–16. 3. Chandrappa A. K. and Biligori K. P. (2016), “Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: A hydrodynamic approach”, *Constr. Build Mater.*, No 123, pp. 627–637. 4. Crouch L. K., Pitt J. and Hewitt R. (2007), “Aggregate effects on pervious

portland cement concrete static modulus of elasticity”, *J. Mater. Civ. Eng.*, No 19., pp. 561–568.

5. Cui X., Zhang J., Huang D. and Gon X., (2016), “Measurement of permeability and the correlation between permeability and strength of pervious concrete”, *1st International Conference on Transportation Infrastructure and Materials*, pp. 885 – 892.

6. Debo T. N. and Resse A. J., (1995), *Municipal stormwater management*, Lewis Publisher, 1154 p.

7. Ferguson B. K. (2005), *Porous pavements*, CRC Press, Boca Raton, 577 p.

8. García L. Á., Schlangen E. and Van de Ven M., (2011), “Induction healing of asphalt mastic and porous asphalt concrete”, *Contents lists available at ScienceDirect “Construction and Building Materials”*, pp. 3746-3752.

9. *Georgia stormwater management manual: Technical Handbook (2001): AMEC Earth and Environmental Center for Watershed Protection, Vol. 2, 844 p.*

10. Houle K. M., Roseen R. M., Ballesterio T. P., Briggs J. F. and Houle J. J. (2009), “Examinations of pervious concrete and porous asphalt pavements performance for stormwater management in Northern climates”, *Proc., World Environmental and Water Resources Congress, Great Rivers*, pp. 1105–1122.

11. Patil V. R., Gupta A. K. and Desai D. B (2009), “Use of pervious concrete in construction of pavement improving their performance”, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, No 2, pp. 54-56.

12. Pindado M. A., Aguado A. and Josa A. (1999), “Fatigue behavior of polymer modified porous concretes”, *Cem. Concr. Res.*, No 29, pp. 1077–1083.

13. Poulikakos L. D. et al. (2006), “Mechanical properties of porous asphalt. Recommendations for standardization”, *Swiss Federal Laboratory for Materials Testing and Resarch, Switzerland*, 110 p.

14. Schaefer V., Wang K., Suleiman M. and Kevern J.(2006), “Mix design development for pervious concrete in cold weather climates”, *National Concrete Pavement Technology: Final Report*, 85 p.

15. Sonebia M., Bassuonib M. and Yahiac A. (2016), “Pervious concrete: Mix design, properties and applications”, *RILEM Technical Letters*, No1, pp. 109–115.

16. Tennis P. D., Leming M. L. and Akers D. J. (2004), *Pervious concrete pavement: Portland Cement Association and National Ready Mixed Concrete Association*, Skokie, Illinois, USA, 36 p.

17. Wanielista M., Chopra M., Spence J. and Ballock C. (2007), *Construction and maintenance assessment of pervious concrete pavements: Stormwater Management Academy University of Central Florida, Orlando*, 182 p.

18. Weiss P. T., Kayhanian M., Khazanovich L. and Gulliver J. S. (2015), *Permeable pavements in cold climates: State of the art and cold climate case studies, Report. Minnesota, USA*, 375 p.

19. Zhuk V. M. and Boshota V. V. (2012), “Teoretychne doslidzhennja zalezhnosti vysoty napovnennja eksfiljtracijnoji transheji vid rozrakhunkovoji tryvalosti doshcu”. [Theoretical study of the dependence of the height of filling of the exfiltration trench from the estimated rain duration], *Visn. Nac. un-tu “Lviv. politekhniky” “Teorija i praktyka budivnyctva”*, Lviv: NU “Lvivs’ka politekhniky”, No 742, pp. 249–256 [in Ukrainian].

20. Zhuk V. M. and Kachmar I. Z. (2015), “Teoretychnyj rozrakhunok nakopychennja poverkhnevogho stoku na poverkhni vodopronyknjkh udoskonalenykh pokryttiv”. [Theoretical calculation of the accumulation of surface runoff on the surface of permeable pavement], *Visn. Nac. un-tu “Lviv. politekhniky” “Teorija i praktyka budivnyctva”*, Lviv: NU “Lvivs’ka politekhniky”, No 23, pp. 122–128 [in Ukrainian].

21. Kachmar I. Z., Zhuk V. M. and Vovk L. I. (2016), “Eksperymentaljni doslidzhennja ghidravlichnykh ta fizyko-mekhanichnykh kharakterystyk zrazkiv z porystogho vodopronyknogho betonu”. [Experimental studies of hydraulic and physical-mechanical characteristics of samples from porous concrete], *Resursy pryrodnykh vod Karpatsjkogho rehionu, Problema okhorony ta racionaljnogho vykorystannja. Materialy P’jatnadcjatoji mizhnarodnoji naukovo-praktychnoji konferenciji: Zbirnyk naukovykh statej*, Lviv: NU “Lvivska politekhniky”, No 15, pp. 171–174 [in Ukrainian].

22. Tkachuk O. A. and Shevchuk O. V. (2016), “Konstruktyvni osoblyvosti infiljtracijnykh majdanchykiv z vodopronyknymy pokryttjamy”. [Constructive features of infiltration areas with water-permeable pavement], *Naukovo-tekhnichnyj, vyrobnychyj ta informacijno-analitychnyj zhurnal “Nauka ta budivnyctvo”*, Kyjiv, No 1(7), pp. 38–41 [in Ukrainian].

23. Tkachuk S. G., Zhuk V. M. (2012), *Reguljuvannja doshhovogho stoku v systemakh vodovidvedennja: monohrafija. [Regulation of rain drainage in sewage systems: monograph]*, Lviv: Vydavnyctvo Lvivskoji politekhniky, 216 p. [in Ukrainian].