УДК 625.7

МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РЕГЕНЕРОВАНИХ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ У НЕУКРІПЛЕНИХ ШАРАХ ОСНОВИ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ

Терещенко Т.А., *канд. хім. наук, провідний науковий співробітник відділу конструкцій дорожнього одягу*

Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна (ДП «ДерждорНДІ»)

Види регенерованих дисперсних матеріалів для дорожнього будівництва

Асфальтобетон та цементобетон належать до дорожньо-будівельних матеріалів, придатних для ресайклінгу, у зв'язку з чим у світовій практиці дорожнього будівництва технології їх переробки, а також технології застосування отриманих регенерованих дисперсних матеріалів відносять до високоефективних ресурсозберігаючих технологій.

У дорожній галузі України основні технологічні напрямки переробки та застосування матеріалу зношених асфальтобетонних шарів регламентуються документами [1-4]. Отриманий регенерований дисперсний матеріал призначено для застосування у вигляді кондиційної вторинної сировини – асфальтобетонної крихти, технічні характеристики якої встановлено в [3, 4]. Особливості і перспективи широкого впровадження технологій дорожнього будівництва з застосуванням асфальтобетонної крихти розглянуто у публікаціях [5, 6].

Актуальність впровадження технологій переробки та повторного застосування цементобетону в дорожній галузі Україні зумовлено наявністю понад 2000 км доріг з цементобетонним покриттям, у тому числі таких, що потребують капітального ремонту або реконструкції. Існують два основні технологічні напрямки:

- контрольована деструктуризація покриття без виймання матеріалу з подальшим використанням шару дефрагментованого бетону в конструкції дорожнього одягу;
- багатостадійна механічна переробка матеріалу з використанням подрібнювально-сортувального обладнання.

Сучасним методом контрольованої деструктуризації цементобетонних покриттів є віброрезонансне руйнування з застосуванням низькоамплітудного високочастотного бетонолому. В Україні застосування цієї технології та вимоги до проектування дорожніх одягів з використанням шару дефрагментованого бетону в конструкціях нежорсткого типу регламентовано документами [7-9]. До переваг цієї технології слід віднести відсутність витрат на транспортування та переробку видаленого матеріалу, а також стислі строки виконання робіт. Одним з обмежень для застосування технології є недостатня несна здатність ґрунтів земляного полотна.

Для отримання подрібненого цементобетону (ПЦБ) у вигляді матеріалів стандартних фракцій здійснюють розбирання цементобетонного покриття з наступним переробленням уламків на стандартному подрібнювально-сортувальному обладнанні з використанням ланки дробарок різного типу; для видалення металевих включень додатково застосовують залізовідділювачі. Цей метод дозволяє отримувати кондиційні матеріали, які можуть бути використано в різних конструкціях та в різних шарах дорожнього одягу. До переваг методу слід віднести також можливість використання в шарах дорожнього одягу ПЦБ з різних вихідних ресурсів, зокрема матеріалів механічної переробки плит покриття аеродромного одягу, плит

прогонових будов мостів, елементів та виробів з важких конструкційних бетонів. Обов'язковим є підтвердження екологічної придатності ПЦБ для будівництва автомобільних доріг.

Згідно з розробленим колективом ДП «ДерждорНДІ» документом [10], застосування ПЦБ базується на принципі відповідності стандартним вимогам до дорожньо-будівельних матеріалів необхідного цільового призначення. ПЦБ може бути використано індивідуально або в суміші з новими мінеральними матеріалами при влаштуванні неукріплених та укріплених шарів дорожнього одягу за умов відповідності вимогам до матеріалу одного з видів:

- щебеню з подрібненого цементобетону, вимоги до якого встановлені відповідно до положень стандартів [11, 12]; додатково встановлено вимоги до водопоглинання (не вище ніж 6% за масою);
- піску з відсівів ПЦБ, вимоги до якого встановлені з урахуванням стандартної класифікації [13] за групами піску: середній, крупний, підвищеної крупності; вимоги до зернового складу встановлено окремо у зв'язку з можливістю утворення в піску підвищеної крупності фракції зерен з розміром понад 5 мм у кількості до 20% за масою, а також у зв'язку з наявністю у фракції розміром менше ніж 0,050 мм пилу подрібнення цементного каменю;
- сумішей для шарів основ дорожнього одягу (з застосуванням щебеню та/або піску з ПЦБ), вимоги до яких встановлено відповідно до стандарту [12];
- сумішей, укріплених цементом, вимоги до яких встановлено з урахуванням вимог [14] до матеріалів різних марок залежно від вмісту (наявності) щебеневої або дрібнозернистої фракцій ПЦБ;
- маломіцних матеріалів подрібненого цементобетону, які відносять до маломіцних матеріалів згідно з [15];
- маломіцних матеріалів подрібненого цементобетону, укріплених цементом, вимоги до яких встановлено за марками залежно від вмісту (наявності) щебеневої або дрібнозернистої фракцій ПЦБ.

Маломіцні матеріали ПЦБ класифікуються та можуть бути використано за результатами випробувань як техногенні ґрунти [10].

Матеріали крупнозернистих фракцій ПЦБ містять залишкову розчинову складову, яка характеризується меншою міцністю, підвищеними пористістю та водопоглинанням у порівнянні з кам'яними матеріалами, та кількість якої залежить від технології механічної переробки бетону. Для опрацювання технологічних параметрів процесу виготовлення крупнозернистих фракцій ПЦБ з мінімально можливим вмістом розчинової складової доцільно впровадити методику її кількісного визначення – наприклад, згідно з [16].

При проектуванні дорожніх одягів з передбачуваним використанням ПЦБ, а також при підборі складу матеріалів згідно з [10] слід ураховувати наступні особливості:

- наявність залишкових клінкерних матеріалів у складі розчинової складової, що приводить до поступового часткового цементування неукріплених матеріалів ПЦБ;
- підвищені, у порівнянні з стандартними кам'яними матеріалами, значення вологості, необхідні для досягнення максимальної щільності;
- здатність неукріплених матеріалів ПЦБ до утворення карбонатних осадів, що накладає певні обмеження на використання таких матеріалів у дренажних конструкціях та дренувальних шарах.

Згідно з посібником [17] та технічним звітом [18], практикується також використання подрібненого цементобетону у якості заповнювачів для дорожніх бетонів.

Особливості застосування регенерованих дисперсних матеріалів у неукріплених шарах основи дорожнього одягу згідно зі світовим досвідом дорожнього будівництва

Згідно з даними Федеральної адміністрації доріг США, найбільш дослідженим та впровадженим є застосування регенерованих дисперсних матеріалів з монолітних шарів дорожнього одягу (асфальтобетонних, цементобетонних) у неукріплених шарах основи [19]. У ході реалізації проекту [20] за результатами спостережень упродовж періоду з 2008 р. до 2016 р. було надано порівняльні висновки щодо технічної ефективності застосування в неукріплених шарах основи регенерованих матеріалів:

- *RCA* (*Recycled Concrete Aggregate*, рециклізований заповнювач бетону, згідно з чинною в Україні термінологією – подрібнений цементобетон [10]);
- *RAP* (*Reclaimed Asphalt Pavement*, матеріал регенерованого асфальтобетонного покриття, згідно з чинною в Україні термінологією - асфальтогранулят, асфальтобетонна крихта [21, 3]);
- *RCA* у суміші з сертифікованими кам'яними матеріалами природного походження для шарів основ дорожнього одягу (1:1 за масою).

Відповідно до даних [19], для вихідних матеріалів було визначено наступні основні характеристики:

а) *RCA* (матеріал з різних вихідних ресурсів, відібраний із штабелів):
- вміст залишкової розчинової складової (середнє значення) – 50%;
- водопоглинання – від 5,0% до 6,5%;
- максимальна вага одиниці об'єму сухого матеріалу (MDU_{max}, *maximum Dry Unit Weight*) за модифікованим методом Проктора – від 19,4 КН/м^3 до 20,8 КН/м^3 при оптимальній вологості від 8,7% до 11,8%;

б) *RAP* (матеріал з різних вихідних ресурсів, відібраний із штабелів):
- вміст бітумного в'язного – 5%;
- водопоглинання – від 0,6% до 3,0%;
- максимальна вага одиниці об'єму за модифікованим методом Проктора – від 19,4 КН/м^3 до 21,5 КН/м^3 при оптимальній вологості від 5,2% до 8,8%;

в) сертифікований кам'яний матеріал з гірських порід для шарів основи дорожнього одягу:
- петрографічний склад: кварц, граніт, вапняк, доломіт, з сумарним вмістом матеріалу карбонатних порід ~ 32%;
- максимальна вага одиниці об'єму за модифікованим методом Проктора – 20,1 КН/м^3 при оптимальній вологості 8,9%;

г) суміш *RCA* (згідно з *а*)) та сертифікованого кам'яного матеріалу (згідно з *в*)), 1:1 за масою:
- максимальна вага одиниці об'єму за модифікованим методом Проктора – 21,3 КН/м^3 при оптимальній вологості 8,0% (середні значення).

У ході лабораторних досліджень регенерованих дисперсних матеріалів з застосуванням модифікованого метода Проктора (робота з ущільнення з перерахунку на об'єм становить 2,70 МНм/м^3) з застосуванням методів регресійного аналізу були встановлені кореляційні залежності, наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Залежність показників ущільнювальності від характеристик регенерованих дисперсних матеріалів згідно з [19]

Вид матеріалу	Показник ущільнювальності, одиниця вимірювання	Рівняння кореляційної залежності	R^2
RCA	Оптимальна вологість W_{opt},%	$W_{opt} = -0.064 \cdot K_{\frac{60}{10}} + 0.763 \cdot A + 7.75$	0,65
	MDU_{max}, КН/м^3	$MDU_{max} = -0.374 \cdot W_{opt} + 23.6$	0,83
RAP	Оптимальна вологість W_{opt}, %	$W_{opt} = -0.0626 \cdot K_{\frac{60}{10}} - 1{,}349 \cdot A + 9.84$	0,92
	MDU_{max}, КН/м^3	$MDU_{max} = -0.289 \cdot W_{opt} + 22.42$	0,83

де $K_{\frac{60}{10}}$ – коефіцієнт неоднорідності дисперсного матеріалу;

A – водопоглинання у відсотках.

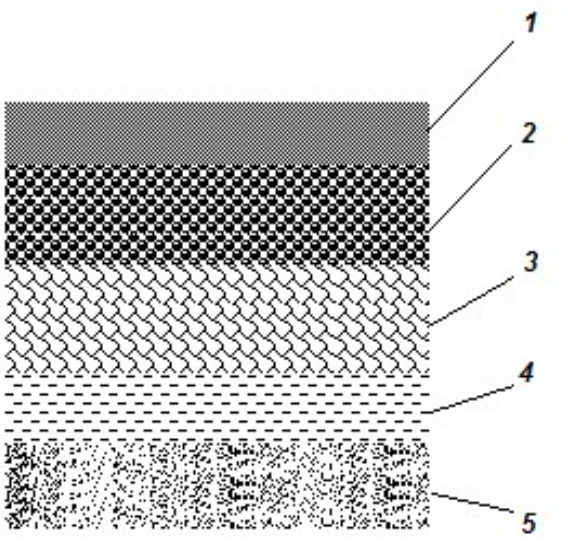
Таким чином було показано, що значення W_{opt} (опосередковано – також значення MDU_{max}) для *RAP* та *RCA* залежать від коефіцієнта неоднорідності та водопоглинання матеріалів. Менші значення R^2 для *RCA* автори [19] пояснюють більшою варіативністю вихідних ресурсів для отримання *RCA*.

Дослідні секції автомобільної дороги (рис. 1) з використанням зазначених вище дисперсних матеріалів було влаштовано в штаті Міннесота на експериментальній ділянці дороги, інтенсивність руху на якій за період спостереження становила $5.7 \cdot 10^6$ *ESALs* (*Equivalent Single Axle Load*, $5.7 \cdot 10^6$ еквівалентів розрахункового навантаження на одну вісь 80 кН); довжина кожної секції становила ~ 150 м (500 футів) [19, 20].

Протягом періоду спостережень на експериментальній ділянці дослідних секцій (рис. 1) були відсутні екстремальні погодні умови (з урахуванням кліматичних умов регіону) та екстремальні навантаження від транспортних засобів за складом та інтенсивністю транспортного потоку – зокрема, кількість вантажних автомобілів у складі транспортного потоку була стабільною та становила приблизно 20% [20].

Обстеження дослідних та контрольної секцій (рис. 1) виконували зі встановленою періодичністю шляхом визначення [20]:

- стану дорожнього одягу за типом та обсягом руйнувань і деформацій;
- глибини колії;
- рівності покриття за показником міжнародного індексу рівності *IRI*;
- коефіцієнта зчеплення;
- прогина та модуля пружності дорожнього одягу методом динамічного навантаження.



1 – шар асфальтобетонного покриття товщиною 127 мм (5 дюймів), влаштований з регенерованої асфальтобетонної суміші, виготовленої за *WMA* – технологією (*WMA, Warm-Mixed Asphalt* – технологія виготовлення теплих асфальтобетонних сумішей, передбачає використання добавок для зниження температури виготовлення та застосування сумішей), з вмістом *RAP* 20%;

2 – шар неукріпленої основи товщиною 305 мм (12 дюймів), влаштований з матеріалу:

- ***дослідна секція I*** - *RCA,* 100%;
- ***дослідна секція II*** - суміш *RCA* з сертифікованим кам'яним матеріалом для шарів основ дорожнього одягу, 1:1 за масою;
- ***дослідна секція III*** - *RAP,* 100%;
- ***контрольна секція IV*** - сертифікований кам'яний матеріал природного походження для шарів основи;

3 – шар неукріпленої додаткової основи товщиною 305 мм (12 дюймів), влаштований з сертифікованого кам'яного матеріалу для шарів додаткової основи[5];

4 – піщаний шар товщиною 178 мм (7 дюймів);

5 – глинистий ґрунт (суглинок)

Рисунок 1 – Конструкція дорожнього одягу з варіантами дослідних та контрольної секцій з використанням регенерованих дисперсних матеріалів згідно з [19, 20]

Характеристики дорожнього одягу всіх секцій протягом періоду спостережень відповідали нормативним вимогам. Результати обстежень [20] показали, що використання *RAP* у неукріплених шарах основи приводить до мінімізації процесів тріщиноутворення - дослідна секція III характеризувалась мінімальним сумарним обсягом відповідних ушкоджень. Поряд з цим дослідна секція III при закінченні періоду спостережень характеризувалась найбільшою глибиною колії (~ 9 мм (0,35 дюйми), визначено за графічними даними [20]), яка, проте, була меншою від критичного значення (12,7 мм (0,5 дюйми). Слід підкреслити, що шар асфальтобетону секцій I - IV було влаштовано з регенерованої асфальтобетонної суміші з використанням 20% *RAP* та з використанням *WMA*-добавок, які сприяють підвищенню жорсткості асфальтобетону та можуть підвищувати стійкість до утворення колії.

Результати обстежень [20] не виявили закономірного впливу регенерованих дисперсних матеріалів неукріплених шарів основи на рівність поверхні покриття та коефіцієнт зчеплення проїзної частини. Значення *IRI* станом на 2016 р. для більшості секцій не перевищували 1,5 м/км (0,96 дюймів/1 миля).

Результати випробувань дорожнього одягу методом динамічного навантаження показали [20], що найбільшим прогином характеризувалась конструкція контрольної секції IV, найменшим – конструкція дослідної секції I.

[5] Найбільший номінальний розмір зерен матеріалів для шарів основи згідно з [22] становить 19 мм, для шарів додаткової основи – 4.75 мм.

Згідно з [19] у процесі створення бази даних для проектування дорожніх одягів, що містять регенеровані дисперсні матеріали, механістико-емпіричним методом, з урахуванням даних динамічних випробувань методом зворотного розрахунку було обчислено модулі пружності шарів основи секцій I – IV з матеріалів[6]:

- *RCA* – 265 МПа;
- суміш *RCA* з сертифікованим кам'яним матеріалом для шарів основ дорожнього одягу, 1:1 за масою – 225 МПа;
- *RAP* - 195 МПа;
- сертифікований кам'яний матеріал природного походження для шарів основи – 97 МПа.

Ці результати було визнано важливим критерієм при наданні висновку щодо застосування регенерованих дисперсних матеріалів на заміну сертифікованих кам'яних матеріалів у неукріплених шарах основи.

При випробуванні матеріалів за методологією *LSME* (*Large-Scale Model Experiment*, великомасштабний прототип конструкції дорожнього одягу, який влаштовують у спеціальному котловані розміром 3 м х 3 м х 3 м) з імітацією 10000 циклів навантаження від транспортного засобу[7], було встановлено [19], що при товщині 300 мм пластичні деформації шару регенерованих дисперсних матеріалів відносяться до цього показника шару сертифікованих кам'яних матеріалів основи наступним чином:

- є вищими на 400% - для *RAP*;
- є нижчими на 70% - для *RCA*;
- є нижчими на 20% - для суміші *RCA* з сертифікованим кам'яним матеріалом (1:1 за масою).

Величину пластичної деформації визначали як різницю значень деформацій шару на поверхні основи та на поверхні земляного полотна. Поряд з цим при випробуванні лабораторних зразків було встановлено [19], що швидкість накопичення пластичних деформацій зразків *RAP* найбільш суттєво зростає з підвищенням температури в інтервалі до 32°C (при інтервалі температур дослідження від 7°C до 50°C включно). Отримані дані щодо пластичної поведінки матеріалів дозволили прогнозувати підвищену здатність дорожніх одягів з застосуванням *RAP* у неукріпленому шарі основи до утворення колії [19], що було підтверджено наведеними вище даними [20] щодо натурних обстежень дослідних та контрольної секцій.

У зв'язку з питаннями застосування *RAP* у неукріплених шарах [основи] дорожнього одягу слід зазначити, що у документі [22] при застосуванні *RAP* на заміну сертифікованих кам'яних матеріалів встановлено обмеження вмісту бітуму в *RAP* значенням 3,5%; аналогічний документ від 2005 р. встановлював більш жорсткі обмеження 3,0%.

Порівняння гранулометричного складу регенерованих дисперсних матеріалів до та після ущільнення за модифікованим методом Проктора показало підвищену чутливість *RCA* до процесу ущільнювання: абсолютне підвищення вмісту дрібнозернистих складових[8] становило 5,3% для *RCA* проти 3,0% для *RAP* [19].

---

[6] Динамічні випробування виконували з застосуванням обладнання *Dynatest 8000 FWD*, яке забезпечує прикладання рівнів навантаження: 2723 кг (26.7 кН); 4079 кг (40.0 кН); 5445 кг (53.4 кН). Прогин вимірювали на відстанях: 0 м; 0.30 м 0.61 м; 0.91 м; 1.22 м; 1.83 м від центра прикладення навантаження. Для розрахунків використовували програмне забезпечення *MICHPAVE* та *MODULUS* із застосовуванням моделі тришарової системи [19].

[7] Випробування передбачає імітацію навантаження від багатовісного транспортного засобу з тиском у шині 0,7 МПа при площі контакту з поверхнею 0,05 м^2. Тривалість одного циклу становить 1 с, де тривалість дії навантаження – 0,1 с, тривалість періоду релаксації – 0,9 с.

[8] Відповідний розмір чарунок сита не зазначено.

Висновки

1. Згідно зі світовим досвідом дорожнього будівництва при проектуванні дорожніх одягів нежорсткого типу з передбачуваним використанням у неукріплених шарах основи асфальтобетонної крихти (АК) слід ураховувати здатність шару матеріалу до пластичної деформації, сумарна величина якої прямо залежить від товщини шару, а також негативний вплив підвищення температур на пружні властивості шару матеріалу. Урахування цих факторів при проектуванні дозволяє усунути потенційний негативний вплив АК на стійкість до утворення колії. З цією метою доцільним є обмеження вмісту бітуму в АК; альтернативою може бути використання АК, бітум у складі якої характеризується низькою пластичністю (низькі значення пенетрації, висока температура розм'якшення).
2. При проектуванні та будівництві неукріплених шарів основи дорожнього одягу з використанням матеріалів ПЦБ слід ураховувати ймовірність підвищеної, у порівнянні з стандартними кам'яними матеріалами, адсорбції (утримування) води в шарі матеріалу, а також підвищену чутливість розрахункових характеристик матеріалу шару до технологічних параметрів процесу ущільнювання у зв'язку з підвищеною здатністю ПЦБ до зміни гранулометричного складу при ущільнюванні.

Література

1. ВБН В.2.3-218-539:2007 Споруди транспорту. Влаштування шарів дорожнього одягу автомобільних доріг загального користування з холодних сумішей, що містять фрезерований асфальтобетон
2. Р В.3.2-03450778-837:2014 Рекомендації з відновлення зношених шарів асфальтобетонного покриття за технологією гарячого ресайклінгу на дорозі
3. Р В.2.7-37641918-887:2017 Рекомендації з підбору складу та застосування бітумомінеральних сумішей з використанням асфальтобетонної крихти
4. ТТР 42.1-37641918-418:2017 Типовий технологічний регламент на виготовлення бітумомінеральних сумішей з використанням асфальтобетонної крихти
5. Терещенко, Т.А. Шляхи розвитку технологій гарячого ресайклінгу дорожнього асфальтобетону [Текст] / Т.А. Терещенко // Автошляховик України. – 2014. - № 2 – С. 42-48. – Бібліогр.: с. 48
6. Терещенко, Т.А. Розрахунок зернового складу мінеральної частини регенерованих асфальтобетонних сумішей при використанні нефракціонованого асфальтобетонного грануляту [Текст] / Т.А. Терещенко // Збірник наукових праць «Дороги і мости». – 2015. – Вип. 15. - С. 59 – 65. – Бібліогр.: с. 65
7. Р А.2.2-218-02070915-714:2007 Рекомендації з проектування конструкцій дорожнього одягу із застосуванням шарів основи, які влаштовуються методом віброрезонансного руйнування
8. МР В.3.2-21-03449261-672:2007 Методичні рекомендації з віброрезонансного руйнування цементобетонних покриттів
9. ТК 03450778-162:2013 Технологічна карта на руйнування цементобетонного покриття за віброрезонансною технологією машиною RB-500
10. МР В.2.3-37641918-882:2017 Методичні рекомендації з проектування шарів дорожніх одягів із застосуванням подрібненого цементобетону
11. ДСТУ Б В.2.7-75-98 Будівельні матеріали. Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови

12. ДСТУ Б В.2.7-30:2013 Матеріали нерудні для щебеневих і гравійних основ та покриттів автомобільних доріг. Загальні технічні умови
13. ДСТУ Б В.2.7-29-96 Будівельні матеріали. Дрібні заповнювачі природні, із відходів промисловості, штучні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Класифікація
14. ДСТУ-Н Б В.2.3-39:2016 Настанова з влаштування шарів дорожнього одягу з кам'яних матеріалів
15. Довідник № 1 розрахункових характеристик ґрунтів, матеріалів покриттів і основ дорожніх одягів та навантажень від транспортних засобів – 39 с
1. Гусев, Б.В. Вторичное использование бетонов [Текст] // Б.В. Гусев, В.А. Загурский – М.: Стройиздат, 1987. – 97 с. – Библиогр.: С. 95-97. – 5000 экз. – ИБ № 4462
16. Chesner, W.H. User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction. Reclaimed Concrete Material [Електронний ресурс] / W.H. Chesner, R.J. Collins, M.H. MakKay // Technical Report FHWA-RD-97-148, Turner-Fairbank Highway Research Center, Federal Highway Administration, Washington, D.C. – 1998. - 736 p. – Режим доступу: http://www.fhwa.dot.gov – Заголовок з екрану
17. Stroup-Gardiner, M. Recycled Materials and Byproducts in Highway Applications. Vol. 6: Reclaimed Asphalt Pavement, Recycled Concrete Aggregate, and Construction Demolition Waste. A Synthesis of Highway Practice [Електронний ресурс] / M. Stroup-Gardiner, T. Wattenberg-Komas // NCHRP Synthesis 435, Transportation Research Board, Washington, D.C. – 2013. – 73 p. – Режим доступу: http://www.trb.org – Заголовок з екрану
18. Edil, T.B. Final Report 2012-35 on Research Project "Recycled Unbound Materials" [Електронний ресурс] // T.B. Edil Office of Policy Analysis, Research & Innovation, Minnesota Department of Transportation. - November 2012. - 340 P. – Режим доступу: http://www.fhwa.dot.gov – Заголовок з екрану
19. Ahn, H.J. Report 2017-15 on Research Project "Forensic Investigation into Recycled Unbound Base and Asphalt Surface Materials" MnROAD Cells 16-23 (Phase II) [Електронний ресурс] // H.J. Ahn. - Office of Materials and Road Research, Minnesota Department of Transportation, June 2017, 61 P. - Режим доступу: http://www.fhwa.dot.gov – Заголовок з екрану
20. ДСТУ-Н Б В.3.2-5:2016 Настанова з ліквідації вибоїн покриття нежорсткого дорожнього одягу автомобільних доріг
21. Standard Specifications for Construction, 2016 Edition [Електронний ресурс] // Minnesota Department of Transportation, 2016. – 709 p. - Режим доступу: http://www.fhwa.dot.gov – Заголовок з екрану