

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СКРІПНИХ РОЗЧИНІВ В ПОРИСТІЙ СТРУКТУРІ ЩЕБЕНЕВОЇ ОСНОВИ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ ПРИ ІМПУЛЬСНОМУ ІН'ЄКЦІЙНОМУ ЗАКРІПЛЕННІ

Вінницький національний технічний університет

Стаття присвячена дослідженню особливостей розповсюдження технологічних скріпних розчинів у пористій структурі щебеневої основи асфальтобетонного покриття за допомогою імпульсної ін'єкції. Для цього використовується математична модель, що ґрунтується на рівняннях Дарсі, Нав'є-Стокса та Шведова-Бінгама. Дослідження проводяться для різних зразків щебених основ з використанням імпульсної ін'єкції розчину. Отримані результати дозволяють краще зрозуміти процес проникнення розчину в пори та щілини матеріалу і вивчати вплив різних факторів, таких як інтенсивність, величина та амплітуда періодичних імпульсів гідродинамічного тиску, властивості технологічного скріпного розчину і фракційність щебеневого матеріалу. Ці результати також надають підстави для оптимізації технології влаштування асфальтобетонного покриття на закріпленій щебеневої основі, що може покращити якість та тривалість служби дорожньої конструкції. Отримані результати і використані математичні моделі також можуть бути корисними для інших галузей, які використовують пористі матеріали зі скріпними розчинами, наприклад, для технологій підвищення несучої здатності ґрунтових основ фундаментів, ліквідації зсувів земляних схилів та інших подібних випадків. Визначено перспективи подальшого використання запропонованої технології в інших областях будівництва.

Ключові слова: технологічні скріпні розчини, пориста структура, щебенева основа, асфальтобетонне покриття, імпульсна ін'єкція, математична модель, рівняння Дарсі, рівняння Нав'є-Стокса, рівняння Шведова-Бінгама, проникнення розчину, гідродинамічний тиск, фракційність щебеневого матеріалу, оптимізація технології, якість дорожньої конструкції.

Вступ

Актуальність досліджень щодо особливостей розповсюдження технологічних скріпних розчинів в пористій структурі щебеневої основи асфальтобетонного покриття при імпульсному ін'єкційному закріпленні полягає в тому, що це є актуальною областю досліджень в галузі дорожнього будівництва та реконструкції.

Основа асфальтобетонного покриття, яка складається з щебеневої структури, є важливою складовою дорожньої інфраструктури. Ця основа повинна мати достатню міцність та стійкість, щоб витримувати навантаження транспортних засобів і зберігати свої властивості протягом тривалого періоду експлуатації.

Одним з методів покращення міцності щебеневої основи є імпульсне ін'єкційне закріплення, яке використовує технологічні скріпні розчини. Ці розчини забезпечують з'єднання щебеневої основи в щільну структуру, що підвищує її міцність та стійкість.

Однак, існує потреба в дослідженнях, спрямованих на вивчення особливостей розповсюдження цих технологічних скріпних розчинів у пористій структурі щебеневої основи. Це включає аналіз процесу розподілу та проникнення розчинів у пори та щілини щебеневої структури, вивчення впливу різних факторів, таких як: в'язкість розчину, періодично створюваний тиск імпульсного ін'єктора на ефективність закріплення.

Результати таких досліджень можуть допомогти вдосконалити технологію імпульсного ін'єкційного закріплення та оптимізувати процеси, що пов'язані з покращенням міцності щебеневої основи. Це може призвести до збільшення тривалості експлуатації дорожнього покриття, зменшення витрат на ремонт та підвищення безпеки руху на дорозі.

Отже, дослідження з цієї тематики мають практичне значення для розвитку дорожнього будівництва та можуть сприяти покращенню якості та ефективності будівництва і реконструкції доріг.

Основна частина дослідження

При ін'єкційному закріпленні щебеневої основи під влаштуваннями асфальтобетонного покриття імпульсним способом важливу роль відіграє динамічний тиск, з яким до неї подається ін'єктуюча суміш. Імпульсне закріплення щебеневої основи передбачає створення додаткового динамічного тиску, який накладається на стаціонарний потік ін'єктуючої суміші. Сумарний тиск який буде створюватись устаткуванням [4-9] представляє собою суму статичного і динамічного тиску ін'єкування, та визначається згідно формул (1)-(3):

$$P = P_{cm} + P_{дин.}, \quad (1)$$

де P_{cm} і $P_{дин.}$ – статична та динамічна складова тиску нагнітання відповідно.

Статичний тиск нагнітання технологічного скріпного розчину представляє собою півсуму максимального і мінімального тиску розчину і визначається за наступною формулою:

$$P_{cm.} = (P_{max} + P_{min}) / 2, \quad (2)$$

де P_{max} та P_m – значення максимального та мінімального тиску нагнітання розчину при імпульсному підсиленні щелевих основ під влаштування асфальтобетонних покриттів.

Відповідно динамічна складова тиску визначається згідно формули:

$$P_{дин} = 0,5P_{cm} \cos(\omega t), \quad (3)$$

де ω – частота повторення гідравлічних імпульсів тиску; t – тривалість нагнітання.

Загальний тиск ін'єктування, який буде створюватись при імпульсному закріпленні щелевої основи буде визначатись згідно формули (4) (рис. 1):

$$P = P_{cm} + P_{дин} = P_{cm} \cdot (1 + \cos(\omega t)), \quad (4)$$

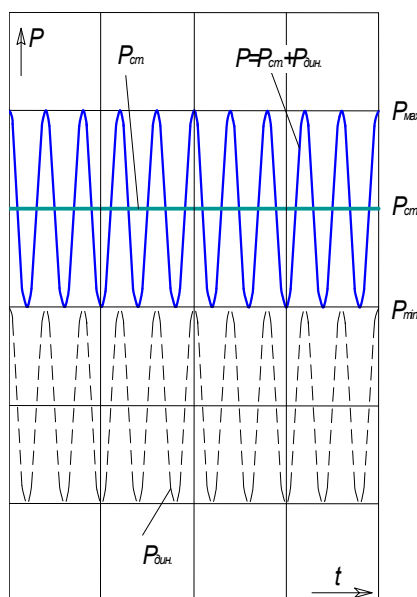


Рисунок 1– Графік залежності тиску нагнітання розчину в свердловину від тривалості ін'єктування

Розглянемо процес розповсюдження в'язкопластичних технологічних скріпних розчинів в деформованому каналі щелевої основи розташовано на незначній глибині (розрахункова схема представлена на рис. 2).

Під дією перепаду тиску при нагнітанні розчину здійснюється збільшення розкриття каналу у масиві щелевої основи, тобто утворюються канали руху розчину. Причому рух розчину підпорядковується реологічному закону Шведова-Бінгама [5-7, 9]. При русі технологічної рідини утворюється структурне ядро. По мірі збільшення радіуса розповсюдження і зменшення швидкості його руху в каналі технологічних розчин буде набирати пластичну міцність. Розміри структурного ядра технологічного скріпного розчину визначаються з рівняння [5,6,9]:

$$h_0 = h - \sqrt{\frac{Q \cdot \eta}{2\pi \cdot r \cdot \tau_0}}, \quad (5)$$

- де h_0 – ширина ядра потоку, м;
 h – половинне розкриття каналу ґрунту, м;
 Q – витрата тампонажного розчину, який нагнітається, м³/с;
 η – структурна в'язкість технологічного розчину, Па·с;
 r – радіус розповсюдження розчину, м;
 τ_0 – динамічне напруження зсуву, Па.

Величина розкриття каналу ґрунту при нагнітання технологічних скріпних розчинів залежить від величини перепаду тиску та глибини ділянки, яка підсилюється і буде визначатись з формули [5,9]:

$$\frac{\Delta\delta}{\delta_0} = -\beta_i \cdot \Delta P, \quad (6)$$

де $\Delta\delta$ – приріст розкриття каналу у щебені, м;
 δ_0 – початкове розкриття каналу у щебені, м;
 β_i – комплексний параметр розкриття каналу, Па⁻¹;
 ΔP – перепад тиску, Па.

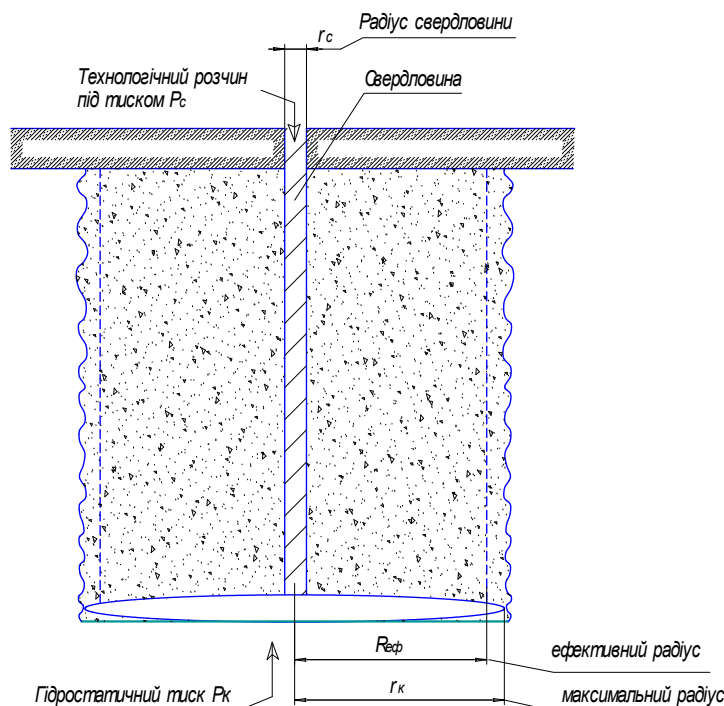


Рисунок 2 – Розрахункова схема для формування математичної моделі розповсюдження технологічних розчинів у щебеневій основі

Тоді з врахуванням формули (6) і враховуючи, що канал буде знаходитись під кутом α до вертикалі та положення каналу буде визначатись в декартовій системі координат, то половинне розкриття каналу у щебеневій основі буде визначатись з формули:

$$h = \frac{\delta_0}{2} \cdot (1 + \beta_i \cdot (\Delta P + \lambda' \cdot \gamma \cdot r \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha)), \quad (7)$$

де λ – коефіцієнт бічного тиску [4];
 γ – питома вага щебеню, Н/м³;
 ΔP – перепад тиску, Па;
 r – радіус розтікання технологічного скріпного розчину, м;
 φ – полярний кут, град;
 α – кут нахилу каналу до вертикалі, град.

Для загального випадку руху технологічного розчину в пористій структурі ґрунтового масиву, з урахуванням реологічного закону Шведова-Бінгама можна записати [1-7, 10,11,13]:

$$-\frac{dP}{dr} = \frac{\tau_0}{h_0} - \lambda_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha, \quad (8)$$

де λ_p – питома вага технологічного скріпного розчину, Н/м³;
 dP – перепад тиску, Па;
 dr – радіус розповсюдження розчину, що відповідає перепаду тиску dP , м;
 τ_0 – динамічне напруження зсуву технологічного скріпного розчину, Па;
 h_0 – ширина потоку, м;
 φ – полярний кут розтікання технологічного скріпного розчину, град.;
 α – кут нахилу каналу до вертикалі, град.

Тоді підставляючи в рівняння (4) рівняння (1) та (3) отримаємо:

$$-\frac{dP}{dr} = \frac{\tau_0}{\frac{\delta_0}{2} \cdot (1 + \beta_i \cdot (P_0 - P_k + \lambda' \cdot \gamma \cdot r \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha)) - \sqrt{\frac{Q \cdot \eta}{2\pi \cdot r \cdot \tau_0}}} - \lambda_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha \quad (9)$$

Проінтегруємо рівняння (9) і отримаємо залежність перепаду тиску від радіуса розповсюдження технологічного скріпного розчину в товщі масиву щебеневі основи [4-8]:

$$-\int_{P_c}^{P(r)} dP = \int_{r_c}^{r_{\max}} \frac{2 \cdot \tau_0 \cdot dr}{\delta_0 \cdot (1 + \beta_i \cdot (P_0 - P_k + \lambda' \cdot \gamma \cdot r \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha)) - 2 \sqrt{\frac{Q \cdot \eta}{2\pi \cdot r \cdot \tau_0}}} - \int_{r_c}^{r_{\max}} \lambda_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha \cdot dr \quad (10)$$

$$P_{cm} (1 + \cos(\omega t)) - P(r) = \int_{r_c}^{r_{\max}} \frac{2\tau_0 \cdot dr}{\delta_0 \cdot (1 + \beta_i \cdot (P_0 - P_k + \lambda' \gamma r \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha)) - 2 \sqrt{\frac{Q \cdot \eta}{2\pi \cdot r \cdot \tau_0}}} - \lambda_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha \cdot (r_{\max} - r_c)$$

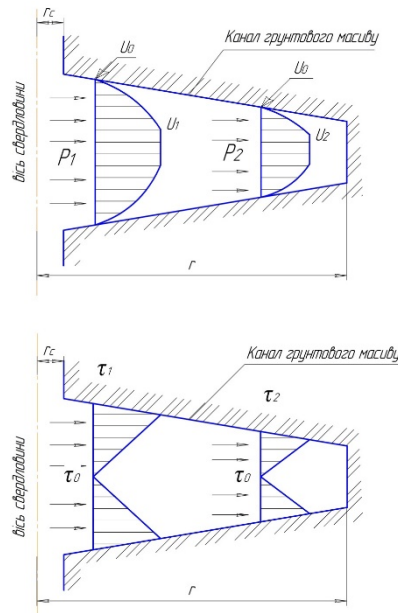


Рисунок 3 – Епюри руху для в'язкопластичних технологічних скріпних розчинів в каналі масиву щебеневі основи

При досягненні технологічним скріпним розчином радіуса r рух розчину припиняється і при цьому витрата прямує до нуля. Тому розміри ядра потоку практично досягають стінок каналу щебеневі основи і розчин починає набирати пластичну міцність.

Знайдемо максимальний радіус розповсюдження технологічного скріпного розчину r_k . Тиск технологічного розчину на відстані r_k від свердловини дорівнює P_k , тобто $P(r_k) = P_k$. При умові, що витрата прямує до нуля маємо:

$$P_{cm} (1 + \cos(\omega t)) - P_k = \lim_{Q \rightarrow 0} \int_{r_c}^{r_{\max}} \frac{2\tau_0 \cdot dr}{\delta_0 \cdot (1 + \beta_i \cdot (P_0 - P_k + \lambda' \gamma r \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha)) - 2 \sqrt{\frac{Q \cdot \eta}{2\pi \cdot r \cdot \tau_0}}} - \lambda_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha \cdot (r_{\max} - r_c) \quad (11)$$

$$\lambda_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha \cdot (r_{\max} - r_c)$$

Оскільки підінтегральний вираз є безперервною функцією, то згідно теореми про інтеграли [14, 15] маємо:

$$\lim_{Q \rightarrow 0} \int_{r_c}^{r_{\max}} \frac{2\tau_0 \cdot dr}{\delta_0 \cdot (1 + \beta_i \cdot (\Delta P + \lambda' \gamma r \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha)) - 2\sqrt{\frac{Q \cdot \eta}{2\pi \cdot r \cdot \tau_0}}} =$$

$$\int_{r_c}^{r_{\max}} \lim_{Q \rightarrow 0} \frac{2\tau_0 \cdot dr}{\delta_0 \cdot (1 + \beta_i \cdot (\Delta P + \lambda' \gamma r \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha)) - 2\sqrt{\frac{Q \cdot \eta}{2\pi \cdot r \cdot \tau_0}}} = . \quad (12)$$

$$\int_{r_c}^{r_{\max}} \frac{2\tau_0 \cdot dr}{\delta_0 \cdot (1 + \beta_i \cdot (\Delta P + \lambda' \gamma r \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha))}$$

Таким чином отримуємо, що перепад тиску від свердловини до максимального радіуса r_k буде дорівнювати:

$$\Delta P = \int_{r_c}^{r_{\max}} \frac{2\tau_0 \cdot dr}{\delta_0 \cdot (1 + \beta_i \cdot (P_{cm} (1 + \cos(\omega t)) - P_k + \lambda' \gamma r \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha))} - \lambda_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha \cdot (r_{\max} - r_c) \quad (13)$$

Розв'язок інтегрального рівняння (13) представляє собою складну математичну задачу, яку можна розв'язати методом ітерації [14].

В першому наближенні розв'язок рівняння (13) матиме вигляд:

$$\Delta P = \int_{r_c}^{r_{\max}} \frac{2\tau_0 \cdot dr}{\delta_0 \cdot (1 + \beta_i \cdot (\Delta P + \lambda' \gamma r \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha))} - \lambda_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha \cdot (r_{\max} - r_c). \quad (14)$$

Для того щоб спростити перетворення над отриманим рівнянням (14) введемо позначення:

$$K = \delta_0 \cdot (1 + \beta_i \cdot \Delta P), \quad (15)$$

$$L = \delta_0 \cdot \beta_i \cdot \lambda' \cdot \gamma \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha. \quad (16)$$

Із врахуванням, того, що пористе середовище є неідеальним, то необхідно ввести параметр, який буде характеризувати характер розташування та криволінійність пор у масиві щелепової основи A , який коливається в межах 1,5 – 4 [4-8].

Тоді вираз (7) набуде такий вигляд:

$$\Delta P = \int_{r_c}^{r_{\max}} \frac{2\tau_0 \cdot dr}{A(K + L \cdot r)} - \lambda_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha \cdot (r_{\max} - r_c) =$$

$$\frac{2\tau_0}{AL} \int_{r_c}^{r_{\max}} \frac{dr}{r + \frac{K}{L}} - \lambda_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha \cdot (r_{\max} - r_c) =$$

$$\frac{2\tau_0}{AL} \ln \frac{r_{\max} \cdot L + K}{r_c \cdot L + K} - \lambda_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha \cdot (r_{\max} - r_c) =$$

$$\frac{2\tau_0}{AL} \ln \left(1 + \frac{(r_{\max} - r_c) \cdot L}{K + r_c \cdot L} \right) - \lambda_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha \cdot (r_{\max} - r_c)$$

Підставляючи значення в (10) значення K та L отримаємо:

$$\Delta P = \frac{2\tau_0}{A \cdot (\delta_0 \cdot \beta_i \cdot \lambda' \cdot \gamma \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha)} \ln \left(1 + \frac{(r_{\max} - r_c) \cdot \delta_0 \cdot \beta_i \cdot \lambda' \cdot \gamma \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha}{\delta_0 \cdot (1 + \beta_i \cdot \Delta P) + r_c \cdot \delta_0 \cdot \beta_i \cdot \lambda' \cdot \gamma \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha} \right) - \lambda_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha \cdot (r_{\max} - r_c). \quad (18)$$

Враховуючи, що $(r_c - r_a) \cdot \delta_0 \cdot \beta_i \cdot \lambda' \cdot \gamma \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha < 1$, і розкладаючи отриманий логарифм в ряд Тейлора [14, 15], отримаємо:

$$\Delta P = \frac{2\tau_0 \cdot (r_{\max} - r_c)}{A \cdot \delta_0 \cdot (1 + \beta_i \cdot \Delta P + r_c \cdot \beta_i \cdot \lambda' \cdot \gamma \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha)} - \lambda_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha \cdot (r_{\max} - r_c). \quad (19)$$

З рівняння (19) можна визначити максимальний радіус розповсюдження технологічного розчину при перепаді тиску в каналі ґрунту $\Delta P = P_{cm}(1 + \cos(\omega t)) - P_k$ буде дорівнювати:

$$r_{\max} = \frac{(P_{cm}(1 + \cos(\omega t)) - P_k) \cdot \delta_0 \cdot (1 + \beta_i \cdot (P_{cm}(1 + \cos(\omega t)) - P_k) + r_c \cdot \beta_i \cdot \lambda' \cdot \gamma \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha)}{2\tau_0 - A \cdot (1 + \beta_i \cdot (P_{cm}(1 + \cos(\omega t)) - P_k) + r_c \cdot \beta_i \cdot \lambda' \cdot \gamma \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha) \cdot \lambda_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha} + r_c. \quad (20)$$

Для спрощення виразу введемо позначення:

$$D = (1 + \beta_i \cdot (P_{cm}(1 + \cos(\omega t)) - P_k) + r_c \cdot \beta_i \cdot \lambda' \cdot \gamma \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha). \quad (21)$$

Комплексний безрозмірний параметр D в практичних розрахунках приблизно дорівнює 1 і тому ним можна знехтувати, тоді рівняння (12) з врахуванням (13) матиме такий вигляд:

$$r_{\max} = \frac{(P_{cm}(1 + \cos \alpha) - P_k) \cdot \delta_0}{2\tau_0 - A \cdot \lambda_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha} + r_c. \quad (22)$$

Таким чином, максимальний радіус розповсюдження технологічного скріпного розчину у масиві щелевеної основи під асфальтобетонне покриття є прямо пропорційним перепаду тиску і початковому розкриттю каналу і обернено пропорційним динамічному напруженню зсуву у розчині.

Висновки

1. В статті досліджено особливості розповсюдження технологічних скріпних розчинів в пористій структурі щелевеної основи асфальтобетонного покриття при імпульсному ін'єкційному закріпленні.

2. Здійснено аналіз результатів теоретичних досліджень, що показали, що використання імпульсного ін'єкційного закріплення сприяє більш ефективному розповсюдженню технологічних скріпних розчинів у пористій структурі щелевеної основи.

3. Встановлено, що при імпульсному ін'єкційному закріпленні технологічні скріпні розчини проникають глибше в пористу структуру щелевеної основи, що сприяє покращенню її фіксації, а також забезпеченню більш стійкого асфальтобетонного покриття.

4. Результати досліджень свідчать про великий потенціал імпульсного ін'єкційного закріплення, як ефективного інструменту для покращення якості щелевеної основи та асфальтобетонного покриття.

5. Закріплення щелевеної основи ін'єкційним насиченням основи в'язучими скріпними розчинами має важливе значення для покращення якості асфальтобетонного покриття і забезпечення його тривалої експлуатації. Основні причини важливості закріплення щелевеної основи перераховані нижче:

– Покращення стійкості покриття: Щелевена основа ін'єкційним насиченням в'язучими скріпними розчинами набуває більшої міцності і стійкості. Це допомагає запобігти появі тріщин, провалення дорожнього покриття і його руйнуванню, забезпечуючи більш тривалу експлуатацію.

– Покращення адгезії: Ін'єкційне насичення основи в'язучими скріпними розчинами допомагає забезпечити кращу адгезію між щелевеною основою і асфальтобетонним покриттям. Це робить покриття більш стійким до зносу, вібрації та інших механічних навантажень.

– Запобігання просідання: Щелевена основа, яка не закріплена ін'єкційним насиченням, може просідати під дією навантаження, особливо в умовах підвищеної вологості. Це може призвести до утворення колії, яка скорочує термін служби покриття. Ін'єкційне насичення дозволяє зміцнити основу та запобігти просіданню.

– Запобігання проникненню вологи: Закріплення щелевеної основи ін'єкційним насиченням допомагає утворити захисний шар, який запобігає проникненню вологи у щелевену основу. Це знижує ризик руйнування основи внаслідок замерзання та розморожування та забезпечує її більшу міцність.

Отже, закріплення щелевеної основи ін'єкційним насиченням в'язучими скріпними розчинами є необхідним кроком для покращення якості і тривалості асфальтобетонного покриття. Це допомагає забезпечити стійкість покриття, покращити його адгезію і запобігти просіданню та проникненню вологи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Cambefort, Henri (1964). Injection des sols. Tome 1: Principes et méthodes. Publisher: Paris : Eyrolles. 390 p.
2. Glossop R. The invention and development of injection process. Geotechnique, sept. 1960 –dec. 1961.
3. Babaskin Y.G., Kolivoska J. Sucasny stav a perspectiva rozvoja medzinarodnych ciest v Bieloruakej republike. Silnicni obzor № 8. Praha, 1997. S. 252-256.
4. Гамеляк І.П., Коц І.В., Бадьора Н.П. Ремонт дорожнього та аеродромного одягу з використанням гідроімпульсного ін'єкційного устаткування. Науково-технічний збірник «Автомобільні дороги та дорожнє будівництво», №85. 2012. С.59-65.
5. Бадьора Н. П., Коц І. В. Дослідження динаміки робочого процесу установки імпульсної дії для нагнітання сумішей в ґрунтовий масив. Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві. 2010. №1. С.58-61.
6. Бадьора Н.П., Коц І.В., Колісник О.П., Павлюк О.І. Гідродинаміка руху в'язко-пластичних розчинів в пористому середовищі при гідроімпульсному підсиленні несучих основ споруд. Науково-технічний збірник «Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві». 2012. № 1. С. 90-94.
7. Коц І.В., Бадьора Н.П. Дослідження процесу імпульсного підсилення несучих основ споруд при ін'єкційному закріпленні ґрунтових масивів. Науково-технічний збірник «Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві». 2013. № 1. С. 72-76.
8. Патент на корисну модель № 79358, МПК8 E02D 3/12, E02D 5/42. Ін'єкційний спосіб укріплення ґрунтів / Коц І.В., Бадьора Н.П.; заявник та власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № у 201209822; заявл. 14.08.2012; опубл. 25.04.2013 - Бюл. №8.
9. Бадьора Н.П., Коц І.В. Аналіз теоретичних та експериментальних досліджень ін'єкційного закріплення ґрунтових масивів. Вісник Хмельницького національного технічного університету. Технічні науки. 2014. №2 (211). С. 46-50.
10. Яхно О.М., Узунов О.В., Луговський О.Ф., Коц І.В. та інші Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка: підручник. За загальної редакції О.М. Яхна. Вінниця, ВНТУ, 2017. 711 с.
11. Туз, В., Лебедь, Н. (2019). Гідродинаміка газорідних потоків на капілярно-пористих структурах. Scientific Works, 83(1), 39-44. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v83i1.1415>
12. Яхно О.М., Дубовицкий В.Ф. Основы реологии полимеров. К.: Вища шк., 1976. 188 с.
13. Bruce R. Munson, Theodore H. Okiishi, Wade W. Huebsch, Alric P. Rothmayer. Fundamentals of Fluid Mechanics. Publisher: John Wiley & Sons. 2013. 747 p.
14. Dwight, Herbert B. Tables of Integrals and Other Mathematical Data. Publisher : Macmillan USA; 4th edition (1 Dec. 1961). 336 pages.
15. Кочеткова І.Б., Сушко Л.Ф., Запорожченко О.С. Вища математика в формулах та таблицях. Ч.2: Навч. посібник-довідник. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2014. 48 с.

REFERENCES

1. Cambefort, Henri (1964). Injection des sols. Tome 1: Principes et méthodes. Publisher: Paris : Eyrolles. 390 p.
2. Glossop R. The invention and development of injection process. Geotechnique, sept. 1960 –dec. 1961.
3. Babaskin Y.G., Kolivoska J. Sucasny stav a perspectiva rozvoja medzinarodnych ciest v Bieloruakej republike. Silnicni obzor № 8. Praha, 1997. S. 252-256.
4. Hameliak I.P., Kots I.V., Badora N.P. Remont dorozhnogo ta aerodromnogo odiahu z vykorystanniam hidroimpulsnoho inieksiinoho ustatkuvannia. Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk «Avtomobilni dorohy ta dorozhnie budivnytstvo», №85. 2012. С.59-65.
5. Badora N. P., Kots I. V. Doslidzhennia dynamiky robochoho protsesu ustanovky impulsnoi dii dlia nahnitannia sumishei v ґruntovyi masyv. Suchasni tekhnolohii, materialy ta konstruktсии v budivnytstvi. 2010. №1. С.58-61.
6. Badora N.P., Kots I.V., Kolisnyk O.P., Pavliuk O.I. Hidrodynamika rukhu v'язko-plastychnykh rozchyniv v porystomu seredovyschi pry hidroimpulsnomu pidsylenni nesuchykh osnov sporud. Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk «Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruktсии v budivnytstvi». 2012. № 1. S. 90-94.
7. Kots I.V., Badora N.P. Doslidzhennia protsesu impulsnoho pidsylennia nesuchykh osnov sporud pry inieksiinomu zakriplenni ґruntovykh masyviv. Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk «Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruktсии v budivnytstvi». 2013. № 1. S. 72-76.
8. Patent na korysnu model № 79358, МПК8 E02D 3/12, E02D 5/42. Inieksiinyi sposib ukriplennia ґruntiv / Kots I.V., Badora N.P.; zaiavnyk ta vlasnyk patentu Vinnytskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet. – № у 201209822; zaiavl. 14.08.2012; opubl. 25.04.2013 - Biul. №8.
9. Badora N.P., Kots I.V. Analiz teoretychnykh ta eksperymentalnykh doslidzhen inieksiinoho zakriplennia ґruntovykh masyviv. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnichni nauky. 2014. №2 (211). S. 46-50.
10. Yakhno O.M., Uzunov O.V., Luhovskyi O.F., Kots I.V. ta insh Prykladna hidroaeromekhanika i mekhanotronika: pidruchnyk. Za zahalnoi redaktsii O.M. Yakhna. Vinnytsia, VNTU, 2017. 711 s.
11. Tuz, V., Lebed, N. (2019). Hidrodynamika hazoridnykh potokiv na kapiliarno-porystykh strukturakh. Scientific Works, 83(1), 39-44. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v83i1.1415>
12. Yakhno O.M., Dubovytskyi V.F. Osnovy reolohii polimeriv. K.: Vyshcha shk., 1976. 188 s.
13. Bruce R. Munson, Theodore H. Okiishi, Wade W. Huebsch, Alric P. Rothmayer. Fundamentals of Fluid Mechanics. Publisher: John Wiley & Sons. 2013. 747 pages.
14. Dwight, Herbert B. Tables of Integrals and Other Mathematical Data. Publisher : Macmillan USA; 4th edition (1 Dec. 1961). 336 pages.
15. Kochetkova I.B., Sushko L.F., Zaporozhchenko O.Ie. Vyshcha matematyka v formulakh ta tablytsiakh. Ch.2: Navch. posibnyk-dovidnyk. Dnipropetrovsk: NMetAU, 2014. 48 s.

Іван Васильович Коц – к.т.н., професор кафедри інженерних систем у будівництві, завідувач і науковий керівник науково-дослідної лабораторії гідродинаміки, факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Email: ivkots@vntu.edu.ua. ID ORCID: 0000-0003-0870-6385.

Олег Олегович Горюн – асистент кафедри інженерних систем в будівництві, факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії. Вінницький національний технічний університет, Україна, м. Вінниця, email: oleggoriun@vntu.edu.ua. ID ORCID 0000-0001-5678-835X.

I. Kots
O. Horiun

PECULIARITIES OF THE DISTRIBUTION OF TECHNOLOGICAL FASTENING SOLUTIONS IN THE POROUS STRUCTURE OF THE CRUSHED STONE BASE OF THE ASPHALT CONCRETE PAVEMENT DURING IMPULSE INJECTION FASTENING

Vinnytsia National Technical University

The article is dedicated to the investigation of the peculiarities of spreading technological binding solutions within the porous structure of gravel base in asphalt concrete pavement through impulse injection fixation. The research utilizes a mathematical model based on Darcy's, Navier-Stokes, and Shvedov-Bingham equations to analyze the process of solution penetration into the material pores under the influence of impulse hydrodynamic pressures. The study is conducted on samples of various gravel bases, applying impulse solution injection. The obtained results provide a better understanding of the solution penetration process into the material pores and canals and examine the influence of various factors such as intensity, magnitude, and amplitude of periodic impulse hydrodynamic pressures, properties of technological binding solution, and fractionation of the gravel material. They also serve as a basis for optimizing the technology of asphalt concrete pavement construction on fixed gravel base, which can enhance the quality and durability of the road structure. The obtained results and utilized mathematical models can be beneficial not only for the road construction industry but also for other fields that utilize porous materials with binding solutions, such as technologies for improving the load-bearing capacity of foundation soil bases, landslide mitigation, and other similar cases.

Key words: *Technological binders, porous structure, gravel base, asphalt concrete pavement, impulse injection, mathematical model, Darcy's equation, Navier-Stokes equation, Shvedov-Bingham equation, solution infiltration, hydrodynamic pressure, gravel material gradation, technology optimization, road construction quality.*

Ivan V. Kots – Ph.D. (Eng.), professor of the department of engineering systems in construction, faculty of construction, civil and environmental engineering, head and scientific leader of the hydrodynamics research laboratory, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, E-mail: ivkots@vntu.edu.ua. ID ORCID: 0000-0003-0870-6385.

Oleh O. Horiun – assistant of the department of engineering systems in construction, faculty of construction, civil and environmental engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail : oleggoriun@vntu.edu.ua. ID ORCID 0000-0001-5678-835X.