

Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ГО МІНЦЮНЬ

УДК 625.855.3

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ТА
ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІНИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ ДОРІГ ПРИ ВПЛИВІ
ПРОТИОЖЕЛЕДНИХ РЕЧОВИН В УМОВАХ КЛІМАТУ
ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОГО КИТАЮ**

Спеціальність 192 – «Будівництво та цивільна інженерія»

Галузь знань 19 – «Архітектура та будівництво»

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Го Мінцзюнь

Науковий керівник:

Ковальський Віктор Павлович,
кандидат технічних наук, доцент

Вінниця – 2023

АНОТАЦІЯ

Го Мінцзюнь Удосконалення методики визначення та прогнозування зміни експлуатаційних характеристик асфальтобетонного покриття доріг при впливі протиожеледних речовин в умовах клімату Північно-Західного Китаю. – Кваліфікаційна наукова робота на праця рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» (19 «Архітектура та будівництво»). – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2023.

У вступі обґрунтовано актуальність обраного напрямку дослідження, проаналізовано сучасний стан досліджень впливу протиожеледних речовин на експлуатаційні властивості асфальтобетонного покриття, визначено мету, завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження, подано науково-теоретичну новизну та практичне значення, відомості про апробацію та впровадження результатів дослідження, структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі розглянуто загальноприйняті методи очищення доріг від снігу. Зокрема, описано характеристику основних протиожеледних речовин, що застосовуються в даний час. Детально проаналізовано вплив протиожеледних речовин на експлуатаційні характеристики асфальтобетону, такі як, водостійкість, високотемпературні та низькотемпературні показники.

Таким чином, аналізуючи сучасний стан досліджень впливу протиожеледних речовин на експлуатаційні характеристики асфальтобетону, можна зробити відповідні висновки. Більшість існуючих досліджень водостійкості асфальтобетону враховували лише вплив окремого фактору. Системна оцінка впливу протиожеледної речовини на водостійкість асфальтобетону в багатofакторних умовах не проводилась. На теперішній час практично відсутні дослідження щодо питання впливу сумісної дії гідродинамічного тиску та протиожеледної речовини на властивості асфальтобетону, тому дослідження питання системного впливу багатofакторних умов на зміну експлуатаційних характеристик асфальтобетону є безперечно актуальним.

У другому розділі описано методику проведення досліджень, наведено характеристику використаних матеріалів, розроблені за складом два типи асфальтобетону для виготовлення еталонних зразків, а також розглянута методологія аналізу ентропії сірої кореляції для встановлення впливу основних факторів.

Досліджено кліматичні особливості в Північно-Західному регіоні Китаю та встановлено, що температура дорожнього покриття в зимовий період може досягати $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, а відносна вологість - менше 30 %. Відповідно до встановленої мінімальної температури були проведенні дослідження з визначення точки замерзання семи протижеледних речовин різної концентрації, з яких були вибрані три оптимальні, необхідної концентрації (20% NaCl, 15% $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ та 20% $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$), для дослідження їх впливу на експлуатаційні властивості асфальтобетону.

З метою визначення зернового складу та вмісту бітуму в асфальтобетоні, детально описані методи розрахунку для двох складів асфальтобетону типу AC-13 та AC-16. Детально представлені випробування на занурення у воду за Маршаллом, на визначення границі міцності розтягу при розколюванні, на стійкість асфальтобетонних покриттів до утворення колії, на тріщиностійкість при низьких температурах та визначення залишкової пористості асфальтобетону. Також визначені відповідні характеристики двох типів зразків з асфальтобетону, які задовольняють вимогам стандарту.

У третьому розділі, з метою дослідження впливу протижеледних речовин на експлуатаційні властивості асфальтобетону, були досліджені два склади асфальтобетонів AC-13 і AC-16. Дані зразки асфальтобетону після 30 циклів поперемінного насичення та зневоднення у розчинах протижеледних речовин оптимальної концентрації випробовувались на занурення у воду за Маршаллом, на стійкість асфальтобетонних покриттів до утворення колії та тріщиностійкість при низьких температурах. Результати експериментів показали, що зі збільшенням кількості циклів поперемінного насичення в розчинах протижеледних речовин, показники залишкової стабільності,

динамічної стабільності та деформації розтягу при згині суттєво знижуються.

При цьому встановлено, що найбільше зменшилася деформація розтягу при згині (близько 40%), тоді як залишкова стабільність і динамічна стабільність зменшилися лише (близько 20%). Це свідчить, що протиожеледні речовин при поперемінному насиченні та зневодненні найбільше впливають на низькотемпературні характеристики асфальтобетону. Завдяки аналізу ентропії сірої кореляції встановлено, що на водостійкість та високотемпературні характеристики асфальтобетону найбільше впливає склад асфальтобетону, тоді як види протиожеледних речовин найбільше впливають на низькотемпературну тріщиностійкість асфальтобетону.

У четвертому розділі проведено дослідження впливу протиожеледних речовин на водостійкість асфальтобетону в умовах 30 циклів заморожування-відтавання за трьох температурних умов, а саме -5°C , -15°C і -25°C . Для проведення досліджень використовували зразки з асфальтобетонів АС-13 і АС-16, а також три види протиожеледних речовин (20% NaCl, 15% $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ і 20% $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$). Для визначення зміни водостійкості, після циклів заморожування-відтавання, були проведені випробування на занурення у воду за Маршаллом та визначення границі міцності на розтяг при розколюванні.

Після аналізу результатів досліджень та побудови логістичних моделей зроблені наступні висновки. Розчин протиожеледної речовини при температурі заморожування, попередньо насичених зразків асфальтобетону, вище температури замерзання протиожеледних речовин, має незначний вплив на водостійкість, який обумовлено хімічною корозією. Експериментальні дані показують, що залишкова стабільність знижується приблизно на 8%, а коефіцієнт МРР приблизно на 14%. Коли температура зразків асфальтобетону стає нижчою за температуру замерзання розчину протиожеледної речовини, відповідно, відбувається збільшення об'єму розчину, що призводить до часткового руйнування асфальтобетону та до значного зниження водостійкості. Експериментальні дані показують, що залишкова стабільність знижується приблизно на 19%, а коефіцієнт МРР - на 35%. Відповідно, за результатами

проведених досліджень надані практичні рекомендації щодо використання протижеледних речовин в залежності від їх типу, концентрації, виду асфальтобетону та температури навколишнього середовища.

Серед трьох розчинів протижеледних речовин, вплив розчину $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ на водостійкість асфальтобетону був більш вагомим, ніж вплив розчинів NaCl та $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$. Збільшення кількості циклів заморожування-відтавання призводить до більшої втрати залишкової стабільності та коефіцієнта MPR АС–16 порівняно з АС–13. Потенційною передумовою таких результатів є те, що вміст дрібного заповнювача АС–13 на 4% більший, ніж у АС–16, що покращує водостійкість асфальтобетону та стійкість до впливу протижеледних речовин.

Побудовані за експериментальними даними логістичні моделі мають високу кореляцію з варіаціями експлуатаційних характеристик асфальтобетону, при цьому коефіцієнти кореляції перевищують 0,96, що підтверджує закономірність зміни експлуатаційних характеристик асфальтобетону.

У п'ятому розділі теоретично обґрунтовано вплив гідродинамічного розмиву на структуру асфальтобетону, який спричинений рухом автомобіля по поверхні дорожнього покриття. Для підтвердження впливу гідродинамічного розмиву на властивості асфальтобетону була розроблена методика проведення досліджень та виготовлена установка, яка може забезпечувати швидкий процес циклічної зміни тиску і вакууму, що призводить до динамічної зміни тиску у порах зразка асфальтобетону.

Відповідно до розробленої методики та при використанні зробленої установки, досліджено вплив гідродинамічного розмиву розчинами протижеледних речовин (20% NaCl , 15% $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ і 20% $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$) на характеристики зразків з асфальтобетону АС–16 та АС–13.

Для визначення впливу гідродинамічного розмиву, в умовах дії протижеледних речовин на еталонні зразки асфальтобетону, були визначені наступні характеристики: залишкова стабільність, коефіцієнт міцності на розтяг при розколюванні та залишкова пористість.

Аналіз отриманих експериментальних даних дозволив зробити наступні висновки. Сумісна дія протижеледних речовин та гідродинамічного розмиву здатна суттєво впливати на швидкоплинні зміни експлуатаційних характеристик асфальтобетону. Вперше отримано графічні інтерпретації трьох стадій зміни властивостей асфальтобетону при гідродинамічному впливі протижеледних речовин. Відповідно, це стадії фізичного, хімічного та сумісного фізико-хімічного гідродинамічного руйнування.

Стосовно трьох протижеледних речовин, то $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ має найбільший вплив на швидкоплинне пошкодження асфальтобетону, помірний вплив характерний для NaCl , натомість $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ має найменший вплив.

Аналізуючи результати експериментальних досліджень двох асфальтобетонів, очевидно, що АС–13 є більш стійким до комбінованої дії протижеледної суміші та гідродинамічного розмиву, ніж АС–16. Це пов'язано з тим, що збільшення частки дрібного заповнювача в асфальтобетоні підвищує його стійкість до впливу гідродинамічного розмиву. Результати дисперсійного аналізу показують, що число циклів гідродинамічного розмиву є основним фактором, що впливає на інтенсивність руйнування асфальтобетону.

У шостому розділі описано основні принципи класичної моделі прогнозування $\text{GM}(1, N)$ та проведений аналіз її недоліків. Виявлено, що базові значення класичної моделі є лише середніми значенням отриманих результатів, що серйозно впливає на точність моделі прогнозування. За рахунок інтегрування базових значень, з використанням формули Сімпсона, було отримано більш точні базові значення, що дозволило удосконалити модель прогнозування $\text{NPGM}(1, N)$. Порівняння точності двох моделей показало, що удосконалена модель прогнозування $\text{NPGM}(1, N)$ на 13–16% точніша за модель $\text{GM}(1, N)$, а відповідно середнє значення відносної похибки при перевірці на адекватність удосконаленої моделі не перевищує 2%. Тому, для прогнозування змін технічних параметрів асфальтобетону під час чергування циклів насичення, заморожування-відтавання та гідродинамічного розмиву, було використано удосконалену модель $\text{NPGM}(1, N)$.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:***вперше:***

- досліджено зміну температурних параметрів шарів асфальтобетонного покриття масиву експлуатованої дороги, з врахуванням холодного та посушливого клімату Північно-Західного Китаю, що в свою чергу дозволило встановити оптимальні значення концентрації протижеледних речовин, в залежності від точки замерзання, для оцінки їх впливу на властивості асфальтобетону;

– встановлено залежність показників водостійкості асфальтобетону від впливу протижеледних речовин з концентрацією NaCl 20 %, $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ 15 %, $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ 20%, при попередньому заморожуванні-відтаванні зразків асфальтобетону в умовах температур -5°C ; -15°C ; -25°C , що дозволило встановити зниження властивостей асфальтобетону при переході протижеледних розчинів з рідкого агрегатного стану в твердий;

– отримано графічні інтерпретації трьох стадій зміни властивостей асфальтобетону при гідродинамічному впливі протижеледних речовин, що дозволило отримати додаткові уявлення про процес руйнування асфальтобетонного покриття;

удосконалено:

– класичну модель прогнозування експлуатаційних характеристик асфальтобетонного покриття доріг $\text{GM}(1, N)$, за рахунок інтегрування базових значень з використанням формули Сімпсона, що дозволило отримати модель прогнозування $\text{NPGM}(1, N)$, точність якої перевищує аналог на 13–16 %, водночас максимальне значення відносної похибки при перевірці на адекватність не перевищує 4,2 %;

набули подальшого розвитку:

– дослідження зміни кількісних і якісних характеристик зразків моделей асфальтобетону, в умовах попереднього циклічного насичення-зневоднення протижеледними речовинами, що дозволило оцінити вплив основних факторів на експлуатаційні параметри дорожнього покриття.

Практичне значення отриманих результатів, що виносяться на захист, є таким:

– отримана методика дослідження зміни експлуатаційних характеристик асфальтобетонного покриття під впливом протижеледних сумішей і гідродинамічних навантажень може впроваджуватись для дослідження властивостей дорожнього покриття;

– надані практичні рекомендації, що до використання протижеледних речовин залежності від їх типу, концентрації, виду асфальтобетону та температури навколишнього середовища;

– розроблена та виготовлена експериментальна гідродинамічна установка, яка імітує процес впливу рідини на дорожнє покриття від шини автомобіля під час руху дозволить проводити моделювання різних режимів експлуатації для прогнозування зміни експлуатаційних характеристик покриття доріг;

– економічний ефект досягається зменшенням витрат на проведення повного комплексу досліджень та скорочення тривалості робіт за рахунок удосконаленої моделі прогнозування руйнування асфальтобетонного покриття доріг;

– розроблена модель прогнозування зміни експлуатаційних параметрів дорожнього покриття передбачає врахування ступеню пошкодження доріг при використанні протижеледних речовин, що дозволяє своєчасно запланувати дорожньо-ремонтні роботи.

Основні наукові результати та практичні рекомендації впроваджено в умовах будівельної лабораторії підприємства ТОВ «АВ–Поділлябуд», а також використовуються в навчальному процесі у Вінницькому національному технічному університеті при вивченні дисципліни «Будівельні матеріали та виробництво» за освітньо-професійною програмою «Автомобільні дороги, вулиці та дорожньо-транспортні споруди».

Ключові слова: асфальтобетон, математична модель, водостійкість, покриття автомобільних доріг, міцність, тріщиностійкість, корозія, в'яжуче,

гідродинамічний тиск, заповнювачі, насичення, експлуатаційні властивості дорожнього покриття, методика дослідження, протиожеледна речовина, будівельні матеріали.

ABSTRACT

Guo Mingjun. Improvement of the methodology for determining and predicting variations in the performance characteristics of asphalt pavement under the influence of deicing agents in the climate of Northwest China. – Qualifying scientific work on as the manuscript.

Dissertation for obtaining the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 192 «Construction and civil engineering» (19 «Architecture and construction») - Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2023.

The introduction substantiates the relevance of the chosen research area, analyzes the current state of research on the impact of deicing agents on the performance properties of asphalt pavement, defines the purpose, object, subject and methods of the investigation, presents the scientific and theoretical novelty and practical significance, information on the testing and implementation of the investigation results, structure and scope of the dissertation.

The first section discusses commonly used methods of snow removal. In particular, the characteristics of the main deicing agents currently used are described. The impact of deicing agents on the performance characteristics of asphalt concrete, such as water resistance, high-temperature and low-temperature performance, is analyzed in detail.

Thus, analyzing the current state of research on the impact of deicing agents on the performance characteristics of asphalt concrete, the following conclusions can be drawn. Most of the existing studies of asphalt concrete water resistance took into account only the influence of a single factor. A systematic assessment of the effect of deicing agents on the water resistance of asphalt concrete under multifactorial conditions has not been conducted. At present, there are practically no studies on the influence of the combined effect of hydrodynamic pressure and deicing agent on the properties of asphalt concrete, so the study of the systemic effect of multifactorial conditions on the change in the performance characteristics of asphalt concrete is undoubtedly relevant.

The second section describes the research methodology, characterizes the

materials used, describes the composition of two types of asphalt concrete for the manufacture of reference samples, and discusses the methodology for analyzing the gray correlation entropy to determine the influence of the main factors.

The climatic features of the northwestern China were investigated and revealed that the temperature of the road pavement in winter can reach $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the relative humidity is less than 30%. In accordance with the established minimum temperature, tests were carried out to determine the freezing point of seven deicing agents of different concentrations, of which three optimal ones were selected (20% NaCl, 15% $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ and 20% $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$) to study their effect on the performance properties of asphalt concrete.

In order to determine the grain size distribution and content of bitumen in asphalt concrete, the calculation methods for two asphalt concrete compositions, AC-13 and AC-16, are described in detail. The Marshall water immersion test, freeze-thaw splitting test, high temperature rut test, low temperature crack resistance test and porosity test of asphalt concrete are presented in detail, and the corresponding characteristics of two types of asphalt concrete specimens that meet the requirements of the standard are determined.

In the third section, two asphalt concrete compositions AC-13 and AC-16 were studied to investigate the effect of deicing agents on the performance properties of asphalt concrete. After 30 cycles of alternate saturation and dehydration in solutions of deicing agents with optimal concentration, these asphalt concrete samples were examined by Marshall water immersion test, high temperature rut test and low temperature crack resistance test. The results of the experiments showed that with an increase in the number of cycles of alternate saturation in solutions of deicing agents, the indicators of residual stability, dynamic stability and flexural tensile strain significantly decrease.

It was found that the flexural tensile strain decreased the most (about 40%), while the residual stability and dynamic stability decreased slightly (about 20%), which indicates that deicing agents at alternate saturation have the greatest effect on the low-temperature characteristics of asphalt concrete. The analysis of gray

correlation entropy revealed that the water resistance and high-temperature characteristics of asphalt concrete are most affected by the composition of asphalt concrete, while the types of deicing agents have the greatest effect on the low-temperature crack resistance of asphalt concrete.

Section 4 investigated the effect of deicing agents on the water resistance of asphalt concrete under 30 freeze-thaw cycles at three temperature conditions, namely -5°C , -15°C , and -25°C . Samples of AC-13 and AC-16 asphalt concrete, as well as three types of deicing agents (20% NaCl, 15% $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$, and 20% $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$) were used for the study. To determine the change in water resistance after freezing-thawing cycles, Marshall water immersion test and freeze-thaw splitting test were performed.

After analyzing the research results and building logistic models, the following conclusions were made. The freezing temperature of asphalt concrete samples saturated with deicing agents above the freezing temperature of the deicing agents has a slight effect on water resistance, which is due to chemical corrosion. Experimental data show that the residual stability decreases by about 8%, and the tensile strength ratio by about 14%. When the temperature of the asphalt concrete samples falls below the freezing point of the deicing agent solution, the volume of the solution increases, which leads to partial destruction of the asphalt concrete and a significant decrease in water resistance. Experimental data show that the residual stability decreases by about 19%, and the tensile strength ratio - by 35%. Accordingly, based on the results of the research, practical recommendations for the use of deicing agents depending on their type, concentration, type of asphalt concrete and ambient temperature were provided.

Among the three deicing solutions, the effect of $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ solution on the water resistance of asphalt concrete was more significant than the effect of NaCl and $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ solutions. An increase in the number of freeze-thaw cycles leads to a greater loss of residual stability and the tensile strength ratio of AC-16 compared to AC-13. The potential reason for such results is that the content of fine aggregate in AC-13 is 4% higher than in AC-16, which improves the water resistance of asphalt

concrete and resistance to the effects of deicing agents.

The logistic models built on the basis of experimental data have a high correlation with variations in the performance characteristics of asphalt concrete, with correlation coefficients exceeding 0.96, which confirms the regularity of changes in the performance characteristics of asphalt concrete.

Chapter 5 theoretically substantiates the effect of hydrodynamic scour caused by the movement of a car on the road surface upon the structure of asphalt concrete. To confirm the effect of hydrodynamic scour on the properties of asphalt concrete, a research methodology was developed and an apparatus was manufactured that can provide a rapid process of cyclic pressure and vacuum changes, which simulates the dynamic change of pressure in the pores of an asphalt concrete sample.

In accordance with the developed methodology and applying the apparatus, the effect of hydrodynamic scouring with solutions of deicing agents (20% NaCl, 15% $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ and 20% $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$) on the characteristics of asphalt concrete samples AC-16 and AC-13 was studied.

The following characteristics were evaluated to determine the effect of hydrodynamic scouring under the influence of deicing agents on the reference asphalt concrete samples: residual stability, tensile strength ratio, and porosity.

The analysis of the experimental data allowed us to draw the following conclusions. The combined effect of deicing agents and hydrodynamic scouring can significantly affect transient changes in the performance characteristics of asphalt concrete. Graphical interpretations of the three stages of change in asphalt concrete properties under the hydrodynamic effect of deicing agents were obtained for the first time. Accordingly, these are the stages of physical, chemical, and combined physical and chemical hydrodynamic destruction.

Regarding the three deicing agents, $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ has the greatest impact on short-term damage to asphalt concrete, followed by NaCl, while $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ has the least impact.

Analyzing the results of experimental studies of the two asphalt concrete, it is obvious that AC-13 is more resistant to the combined effect of deicing agents and

hydrodynamic scour than AC-16. This is due to the fact that an increase in the proportion of fine aggregate in asphalt concrete increases its resistance to hydrodynamic scour. The results of the analysis of variance show that the number of hydrodynamic scour cycles is the main factor affecting the intensity of asphalt concrete destruction.

Section 6 describes the basic principles of the classical GM (1, N) forecasting model and analyzes its shortcomings. It is found that the baseline value of the classical model is only the average of the obtained results, which seriously affects the accuracy of the forecasting model. By integrating the baseline values using Simpson's formula, more accurate baseline values were obtained, which allowed us to obtain an improved forecasting model NPGM(1, N). Comparison of the accuracy of the two models showed that the improved forecasting model NPGM(1, N) is 13–16% more accurate than the model GM(1, N), and, accordingly, the average value of the relative error when checking the adequacy of the improved model does not exceed 2%. Therefore, the improved NPGM(1, N) model was used to predict changes in the technical parameters of asphalt concrete during the cycles of alternating saturation-dehydration, freeze-thaw, and hydrodynamic scour.

The scientific novelty of the results obtained is that:

for the first time:

– the change in temperature parameters of the asphalt concrete pavement layers of the operated road massif was studied, taking into account the cold and arid climate of Northwest China, which in turn allowed to establish the optimal values of the concentration of deicing agents, depending on the freezing point, to assess their effect on the properties of asphalt concrete;

– the dependence of asphalt concrete water resistance indicators on the effect of deicing agents with a concentration of NaCl 20 %, $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ 15 %, $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ 20 %, during alternate freezing-thawing of asphalt concrete samples at temperatures of $-5\text{ }^\circ\text{C}$, $-15\text{ }^\circ\text{C}$, $-25\text{ }^\circ\text{C}$, which allowed to establish a decrease in the properties of asphalt concrete during the transition of deicing solutions from a liquid aggregate state to a solid state;

– graphical interpretations of the three stages of changes in the properties of asphalt concrete under the hydrodynamic effect of deicing agents were obtained, which allowed to obtain additional insights into the process of destruction of asphalt pavement;

improved:

– the classical model for predicting the performance characteristics of asphalt pavement GM(1, N), by integrating the basic values using the Simpson formula, which allowed to obtain a prediction model NPGM(1, N), the accuracy of which exceeds the analog by 13-16 %, while the maximum value of the relative error when checking for adequacy does not exceed 4.2 %;

further developed:

– study of changes in the quantitative and qualitative characteristics of asphalt concrete model samples under conditions of preliminary cyclic saturation-dewatering with deicing agents, which allowed to assess the impact of the main factors on the operational parameters of the road surface.

The practical significance of the results obtained is as follows:

– the obtained methodology for studying changes in the performance characteristics of asphalt pavement under the influence of deicing agents and hydrodynamic loads can be used to study the properties of the road surface;

– practical recommendations for the use of deicing agents depending on their type, concentration, type of asphalt concrete and ambient temperature were provided;

– an experimental hydrodynamic apparatus that simulates the process of fluid impact on the road surface from a car tire while driving will allow modeling of various operating modes to predict changes in road pavement performance;

– the economic effect is achieved by reducing the cost of conducting a full range of research and reducing the duration of work due to the improved model for predicting the destruction of asphalt pavement;

– the developed model for predicting changes in road pavement performance parameters takes into account the degree of road damage when using deicing agents,

which allows timely planning of road repair works.

The main scientific results and practical recommendations have been implemented in the construction laboratory of AV-Poddillyabud LLC, and are also used in the educational process at Vinnytsia National Technical University in the study of the discipline «Building materials and products» under the educational and professional program «Highways, streets and road transport facilities».

Keywords: asphalt concrete; mathematical model; water stability; road pavement; strength; crack resistance, corrosion, binder; hydrodynamic pressure; aggregates; saturation; pavement performance; research methodology; deicing agent; building materials.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

– матеріали дисертаційної роботи, викладені у квазіперіодичному виданні, що внесено до міжнародних науково-метричних баз Scopus / WoS:

[1] M. Guo, T. Nian, P. Li, V. P. Kovalskiy, “Exploring the short-term water damage characteristics of asphalt mixtures: The combined effect of salt erosion and dynamic water scouring,” *Construction and building materials*, vol. 411, p. 134310, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134310>.

[2] M. Guo, V. P. Kovalskiy, T. Nian, P. Li, “Influence of Deicer on Water Stability of Asphalt Mixture under Freeze–Thaw Cycle”, *Sustainability*, vol. 15(18), p. 13707, 2023. <https://doi.org/10.3390/su151813707>.

– матеріали дисертаційної роботи, викладені у виданнях, що внесені до переліку фахових для захисту дисертацій з технічних наук:

[3] В. П. Ковальський, Г. Мінцзюнь, “Вплив протижеледної солі на пористість асфальтобетону при поперемінному заморожуванні та відтаванні”, *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*, т. 34, № 1, с. 43-50, 2023. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-1-43-50>.

[4] Г. Мінцзюнь, С. В. Королевська, “Стійкість до розтріскування асфальтобетону, насиченого дорожньою сіллю, при заморожуванні”, *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*, т. 33, № 2 с. 54-59, 2022. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2022-2-54-59>.

[5] Г. Мінцзюнь, В. П. Ковальський, “Вплив протижеледної солі на експлуатаційні характеристики асфальтобетонних сумішей у Північно-Західному Китаї: дослідження механічних властивостей та факторів впливу”, *Сучасне будівництво та архітектура*, № 5, с. 90-99, 2023. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2023-5-90-99>.

[6] В. П. Ковальський, Г. Мінцзюнь, “Вплив протиожеледних речовин на залишкову пористість і водопроникність асфальтобетону при поперемінному насиченні та висушуванні”, *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, № 20, с. 63–71, 2023. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-10\(20\)-07](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-10(20)-07).

– матеріали дисертаційної роботи, викладені у закордонному науковому виданні держави, яка входить до Європейського Союзу:

[7] V. P. Kovalskiy, M. Guo, “Effect of deicing salt on permeability coefficient of asphalt mixture under freeze-thaw cycle” *SWorldJournal*, no. 22-02, pp. 3–10, 2023. <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2023-22-02-007>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

[8] Г. Мінцзюнь, та В. П. Ковальський, “Research of mechanical properties of bituminous concrete at low-temperature”, In *Applied Scientific and Technical Research: proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference*, Ivano-Frankivsk, April 1–3, 2020. V. 2: p. 104-105. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/30435>

[9] Г. Мінцзюнь, В. П. Ковальський, та М. Д. Бондар, “Common evaluation methods for water stability of asphalt mixture”, на *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Енергоефективність в галузях економіки України"*, Вінниця, 2021. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2021/paper/view/14092>

[10] В. П. Ковальський, та Г. Мінцзюнь, “The main areas of research on the durability of asphalt concrete under the influence of anti-icing reagents”, на *Органічні і мінеральні в’язучі та дорожні бетони на їх основі : збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції*, Харків, 2022. с. 65-67. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/37030>

[11] Г. Мінцзюнь, та В. П. Ковальський, “Overview of the test method for road pavement at high temperatures”, на *Матеріали XLIX науково-технічної*

конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2020/paper/view/8817>

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ..... | 24 |
| ВСТУП..... | 25 |
| РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ..... | 32 |
| 1.1 Технології прибирання снігу та методи боротьби з ожеледицею | 32 |
| 1.2 Використання протиожеледних речовин..... | 36 |
| 1.3 Недоліки використання протиожеледних речовин..... | 39 |
| 1.4 Вплив протиожеледних речовин на властивості асфальтобетону | 41 |
| 1.5 Робоча гіпотеза та загальна блок-схема досліджень | 48 |
| 1.6 Висновки до розділу 1 | 49 |
| РОЗДІЛ 2 СИРОВИННІ МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ | 51 |
| 2.1 Властивості сировинних матеріалів..... | 51 |
| 2.1.1 Технічна характеристика бітуму | 51 |
| 2.1.2 Властивості заповнювачів та наповнювачів..... | 52 |
| 2.1.3 Обґрунтування вибору та технічні показники протиожеледних речовин | 54 |
| 2.2 Підбір складу та визначення властивостей експериментальних зразків з асфальтобетону..... | 59 |
| 2.3 Визначення властивостей асфальтобетону..... | 65 |
| 2.3.1 Випробування на водостійкість..... | 65 |
| 2.3.2 Випробування стійкості асфальтобетонних покриттів до утворення колії..... | 70 |
| 2.3.3 Випробування на тріщиностійкість при низьких температурах | 71 |
| 2.3.4 Випробування на визначення залишкової пористості..... | 74 |
| 2.4 Методологія аналізу ентропії сірої кореляції для аналізу значущості факторів впливу | 76 |
| 2.5 Висновки до розділу 2 | 79 |

| | |
|---|-----|
| | 21 |
| РОЗДІЛ 3 ВПЛИВ ПРОТИОЖЕЛЕДНИХ РЕЧОВИН НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСФАЛЬТОБЕТОНУ В УМОВАХ ЦИКЛІВ ПОПЕРЕМІННОГО НАСИЧЕННЯ ТА ЗНЕВОДНЕННЯ | 80 |
| 3.1 Методика підготовки зразків для визначення впливу протиожеледних речовин на експлуатаційні характеристики асфальтобетону | 80 |
| 3.2 Вплив протиожеледних речовин на водостійкість асфальтобетону | 82 |
| 3.3 Вплив протиожеледних речовин на стійкість асфальтобетону при високих температурах | 84 |
| 3.4 Вплив протиожеледних речовин на тріщиностійкість при низьких температурах | 86 |
| 3.5 Аналіз впливу основних факторів на властивості асфальтобетону при насиченні та зневодненні у розчинах протиожеледних речовин | 89 |
| 3.6 Висновки до розділу 3 | 92 |
| РОЗДІЛ 4 ВПЛИВ ПРОТИОЖЕЛЕДНИХ РЕЧОВИН НА ВОДОСТІЙКІСТЬ АСФАЛЬТОБЕТОНУ В УМОВАХ ЦИКЛІВ ЗАМОРОЖУВАННЯ-ВІДТАВАННЯ..... | 94 |
| 4.1 Методика визначення водостійкості асфальтобетону після циклів заморожування-відтавання у розчинах протиожеледних речовин | 94 |
| 4.2 Визначення основних характеристик водостійкості асфальтобетону, в умовах впливу протиожеледних речовин, при випробуванні на занурення у воду за Маршаллом | 96 |
| 4.3 Дослідження основних характеристик водостійкості асфальтобетону, в умовах впливу протиожеледних речовин, під час визначення границі міцності на розтяг при розколюванні | 101 |
| 4.4 Комплексний аналіз впливу протиожеледних речовин на водостійкість асфальтобетону в умовах циклів заморожування-відтавання | 106 |

| | |
|--|-----|
| | 22 |
| 4.5 Логістична модель визначення основних критеріїв водостійкості..... | 108 |
| 4.6 Висновки до розділу 4..... | 111 |
| | |
| РОЗДІЛ 5 ВПЛИВ ПРОТИОЖЕЛЕДНИХ РЕЧОВИН НА ВЛАСТИВОСТІ АСФАЛЬТОБЕТОНУ В УМОВАХ ГІДРОДИНАМІЧНОГО РОЗМИВУ | 113 |
| 5.1 Аналіз впливу протиожеледних речовин на властивості асфальтобетону в умовах гідродинамічного розмиву | 113 |
| 5.2 Теоретичне обґрунтування розрахунку гідродинамічного тиску води в порах | 118 |
| 5.3 Експериментальна установка для моделювання гідродинамічного циклу розмиву | 122 |
| 5.4 Методика проведення дослідження впливу гідродинамічного розмиву розчинами протиожеледних речовин на властивості асфальтобетону | 126 |
| 5.5 Випробування зразків асфальтобетону на водостійкість після гідродинамічного впливу протиожеледних речовин..... | 127 |
| 5.6 Дослідження залишкової пористості асфальтобетону при дії гідродинамічного впливу в середовищі протиожеледних речовин | 132 |
| 5.7 Дисперсійний аналіз оцінки значущості факторів на характеристики асфальтобетону в умовах гідродинамічного розмиву | 136 |
| 5.8 Висновки до розділу 5..... | 138 |
| | |
| РОЗДІЛ 6 ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІНИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ ДОРІГ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ПРОТИОЖЕЛЕДНИХ РЕЧОВИН НА ОСНОВІ GREY THEORY | 141 |
| 6.1 Основні принципи моделі прогнозування GM (1,N)..... | 141 |
| 6.2 Удосконалення моделі прогнозування GM(1,N)..... | 143 |
| 6.3 Перевірка точності та адекватності моделі прогнозування NPGM(1,N) | 145 |

| | |
|--|-----|
| | 23 |
| 6.3.1 Порівняння точності моделі NPGM(1,N) з моделлю GM(1,N)..... | 145 |
| 6.3.2 Перевірка адекватності моделі NPGM(1,N) | 147 |
| 6.4 Прогнозування змін експлуатаційних характеристик асфальтобетону за допомогою моделі NPGM(1,N) | 149 |
| 6.4.1 Прогнозування властивостей асфальтобетону при насичено-зневоднених циклах в розчинах протиожеледних речовин ... | 149 |
| 6.4.2 Прогнозування характеристик водостійкості асфальтобетону при циклах заморожування-відтавання в розчинах протиожеледних речовин | 151 |
| 6.4.3 Прогнозування експлуатаційних характеристик асфальтобетону в умовах гідродинамічного впливу протиожеледними речовинами | 154 |
| 6. 5 Висновки до розділу 6 | 156 |
| ВИСНОВКИ | 157 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 160 |
| ДОДАТКИ..... | 172 |
| Додаток А Експериментальні дані, які можуть бути використані як еталон (розділ 3) | 173 |
| Додаток Б Експериментальні дані отримані в результаті досліджень (розділ 4)..... | 177 |
| Додаток В Список публікацій здобувача за темою дисертації | 188 |
| Додаток Г Акти впровадження результатів дослідження | 191 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

| | |
|------------------|---|
| АС-13 | – Асфальтобетон з максимальним розміром мінеральних зерен 13 мм |
| АС-16 | – Асфальтобетон з максимальним розміром мінеральних зерен 16 мм |
| MS ₀ | – Залишкова стабільність асфальтобетону |
| TSR | – Коефіцієнт міцності розтягу при розколюванні (коефіцієнт MPP) |
| DS | – Динамічна стабільність асфальтобетону |
| GM(1, N) | – Прогностична модель на основі теорії сірого |
| NPGM(1, N) | – Покращена модель прогнозування GM(1, N) |
| SBS | – Стирол-бутадієн-стирол |
| П/Р | – Протиожеледні речовини |
| А/Б | – Асфальтобетон |
| ОВБ ₁ | – оптимальний вміст бітуму |

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Сьогодні застосування протижеледних речовин на дорогах є стандартним заходом безпеки руху і широко використовується для зимового утримання різних дорожніх покриттів, мостів і злітно-посадкових смуг аеропортів.

Процес дії протижеледної речовини полягає в розпиленні протижеледної речовини на дорожньому покритті, яка потім взаємодіє з молекулами води, утворюючи сольовий розчин з температурою замерзання нижчою, ніж у чистої води. Такий підхід ефективно знижує температуру замерзання води на дорожньому покритті, перешкоджаючи кристалізації льоду. Як наслідок, це зменшує небезпеку, пов'язану з ожеледицею на дорогах, підвищуючи безпеку дорожнього руху.

Застосування протижеледних речовин є глобальною проблемою, що спонукає численних науковців та дослідницькі установи проводити відповідні дослідження. Дослідження в основному зосереджені на таких сферах: матеріали і конфігурація дорожнього покриття, тип і обсяги застосування протижеледних речовин, вплив кліматичних умов на використання протижеледних речовин, а також наслідки впливу на конструкції дорожнього покриття та навколишнє середовище.

Солі проникають всередину асфальтобетонного покриття і можуть змінювати фізичні та хімічні властивості матеріалу асфальтобетонного покриття, включаючи зміни мікроструктури поверхні покриття, розм'якшення бітуму та дифузію введених речовин в асфальтобетон, що впливає на загальні експлуатаційні характеристики асфальтобетонного покриття.

Для вирішення цієї проблеми особливо важливими є глибокі наукові дослідження механізму взаємодії між протижеледними речовинами та асфальтобетонним покриттям, які дозволять краще зрозуміти вплив протижеледних речовин на експлуатаційні характеристики покриття. За допомогою систематичних експериментів та аналізу даних можна виявити

довгостроковий вплив різних протижеледних речовин на асфальтобетонне покриття в різних кліматичних умовах, що забезпечить наукову підтримку прийняття рішень при утриманні доріг.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Проведені дослідження зміни закономірностей механічних властивостей асфальтобетону під дією протижеледних речовин виконані згідно з проектом науково-технічної підтримки провінції Ганьсу, Китай, "Дослідження впливу протижеледних речовин на довговічність асфальтобетонного покриття міських доріг в зоні сезонної мерзлоти" (№ 1504GKCA031).

Робота виконана за планом наукових досліджень, які проводяться на кафедрі будівництва, міського господарства та архітектури ВНТУ, а саме: 60.К4" «Вдосконалення існуючих та розробка нових будівельних матеріалів з підвищеними технічними та екологічними характеристиками» (2022 – 2024 рр.).

Дана робота виконана за фінансової підтримки Китайської стипендіальної ради (№: 201905650001), Національного фонду природничих наук Китаю (№: 52368066), Програми видатних молодих талантів Ланьчжоуського технологічного університету Хунліу, Китай (№: 04-062005), Фонду природничих наук провінції Ганьсу, Китай (№: 23JRRA773), та проекту Інноваційного фонду університету провінції Ганьсу (№: 2022A-026).

Мета і завдання дослідження.

Метою дослідження є вдосконалення методики оцінки та прогнозування зміни експлуатаційних характеристик асфальтобетонного покриття доріг з урахуванням зміни фізичних, гідрофізичних та механічних властивостей асфальтобетону, при впливі протижеледних речовин в умовах клімату Північно-Західного Китаю.

Для досягнення мети роботи необхідно вирішити наступні задачі:

– дослідити зміну температурних параметрів шарів асфальтобетонного покриття масиву експлуатованої дороги високого класу в провінції Ганьсу, Китай, під впливом сезонного коливання кліматичних режимів зовнішнього

середовища;

– дослідити зміну нормованих експлуатаційних властивостей (колійності, тріщиностійкості, водостійкості) зразків моделей асфальтобетону після поперемінного насичення і зневоднення в розчині протижеледних речовин та визначити основні фактори впливу;

– дослідити зміну водостійкості зразків-моделей асфальтобетонного покриття доріг після поперемінного заморожування та відтавання, з варіюванням граничних значень температури замерзання при насиченні розчинами протижеледних речовин оптимальної концентрації;

– розробити методику дослідження властивостей, виготовити експериментальне обладнання для вивчення впливу гідродинамічного розмиву розчинами протижеледних речовин на властивості асфальтобетону. Провести комплексні експериментальні випробування;

– розглянути класичну модель $GM(1, N)$, виявити недоліки, розробити удосконалену модель $NPGM(1, N)$ для прогнозування впливу протижеледних речовин на властивості асфальтобетону, порівняти точність і адекватність розглянутих моделей;

– застосувати удосконалену модель $NPGM(1, N)$ для прогнозування впливу протижеледних речовин на властивості асфальтобетону та порівняти прогнозовані значення з результатами досліджень.

Об'єктом дослідження є процес зміни експлуатаційних характеристик асфальтобетонного покриття доріг.

Предметом дослідження є встановлення закономірностей комплексного впливу протижеледних речовин на властивості асфальтобетонного покриття доріг.

Методи дослідження: Аналітичні дослідження зміни експлуатаційних характеристик поверхонь асфальтобетонного покриття доріг в умовах клімату Північно-західного Китаю.

Дослідно-експериментальні дослідження експлуатаційних характеристик асфальтобетонних покриттів під впливом протижеледних речовин.

Узагальнення результатів досліджень з використанням аналітичного і математично-статистичного методів опрацювання результатів

Для визначення експлуатаційних параметрів зразків-моделей асфальтобетонного покриття доріг використані стандартні методи визначення фізико-механічних властивостей заповнювачів, бітумів та асфальтобетонів. Використовувалась розроблена методика дослідження експлуатаційних характеристик асфальтобетонного покриття в середовищі протижеледних речовин при гідродинамічному впливі

Теоретичні дослідження здійснювались на основі рівнянь механіки та гідромеханіки, а також із застосуванням сучасних програмних продуктів Matlab, SPSS, Prism, Python. Експериментальні дослідження виконані на спеціальній експериментальній установці із використанням високоточних вимірювальних приладів. Результати експериментів оброблялися із застосуванням методів планування експерименту та математичної статистики.

одержаних результатів полягає в тому, що: вперше

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

вперше:

- досліджено зміну температурних параметрів шарів асфальтобетонного покриття масиву експлуатованої дороги, з врахуванням холодного та посушливого клімату Північно-Західного Китаю, що в свою чергу дозволило встановити оптимальні значення концентрації протижеледних речовин, в залежності від точки замерзання, для оцінки їх впливу на властивості асфальтобетону;

– встановлено залежність показників водостійкості асфальтобетону від впливу протижеледних речовин з концентрацією NaCl 20 %, $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ 15 %, $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ 20%, при попередньому заморожуванні-відтаванні зразків асфальтобетону в умовах температур -5°C ; -15°C ; -25°C , що дозволило встановити зниження властивостей асфальтобетону при переході протижеледних розчинів з рідкого агрегатного стану в твердий;

– отримано графічні інтерпретації трьох стадій зміни властивостей

асфальтобетону при гідродинамічному впливі протижеледних речовин, що дозволило отримати додаткові уявлення про процес руйнування асфальтобетонного покриття;

удосконалено:

– класичну модель прогнозування експлуатаційних характеристик асфальтобетонного покриття доріг $GM(1, N)$, за рахунок інтегрування базових значень з використанням формули Сімпсона, що дозволило отримати модель прогнозування $NPGM(1, N)$, точність якої перевищує аналог на 13–16 %, водночас максимальне значення відносної похибки при перевірці на адекватність не перевищує 4,2 %;

набули подальшого розвитку:

– дослідження зміни кількісних і якісних характеристик зразків моделей асфальтобетону, в умовах попереднього циклічного насичення-зневоднення протижеледними речовинами, що дозволило оцінити вплив основних факторів на експлуатаційні параметри дорожнього покриття.

Практичне значення отриманих результатів:

– отримана методика дослідження зміни експлуатаційних характеристик асфальтобетонного покриття під впливом протижеледних сумішей і гідродинамічних навантажень може впроваджуватись для дослідження властивостей дорожнього покриття;

– надані практичні рекомендації, що до використання протижеледних речовин залежності від їх типу, концентрації, виду асфальтобетону та температури навколишнього середовища;

– розроблена та виготовлена експериментальна гідродинамічна установка, яка імітує процес впливу рідини на дорожнє покриття від шини автомобіля під час руху дозволить проводити моделювання різних режимів експлуатації для прогнозування зміни експлуатаційних характеристик покриття доріг;

– економічний ефект досягається зменшенням витрат на проведення повного комплексу досліджень та скорочення тривалості робіт за рахунок

удосконаленої моделі прогнозування руйнування асфальтобетонного покриття доріг;

– розроблена модель прогнозування зміни експлуатаційних параметрів дорожнього покриття передбачає врахування ступеню пошкодження доріг при використанні протижеледних речовин, що дозволяє своєчасно запланувати дорожньо-ремонтні роботи.

Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів, викладених у дисертаційній роботі, полягає в виборі раціональних складів асфальтобетонів та обґрунтуванні вибору типу протижеледних речовин[1], розробці нового обладнання та методики проведення досліджень[2], експериментальному дослідженні впливу протижеледних речовин на зміну властивостей асфальтобетону за різних умов[3–5], обробці та узагальненні отриманих результатів, аналізі впливу основних факторів на властивості асфальтобетону[6], [7], моделюванні експлуатаційних характеристик та прогнозуванні динаміки зміни властивостей асфальтобетону[2].

Всі основні результати досліджень отримані автором особисто. Формулювання мети і задач дисертаційної роботи, планування експериментальних досліджень та обговорення отриманих результатів виконано спільно з науковим керівником. Особистий внесок автора у спільних публікаціях полягає у постановці задачі дослідження, експериментальному дослідженні впливу протижеледних речовин на зміну властивостей асфальтобетону та узагальненні отриманих результатів.

Обґрунтованість та достовірність отриманих в роботі результатів підтверджується великим обсягом експериментальних досліджень, що отримані з використанням сучасного лабораторного обладнання, відповідністю експериментальних та прогнозованих значень, апробацією результатів роботи та виробничим впровадженням.

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати досліджень доповідалися й обговорювалися: на міжнародних конференціях і семінарах: “Applied Scientific and Technical Research: proceedings of the IV International

Scientific and Practical Conference” (Івано-Франківськ, 2020), “Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Енергоефективність в галузях економіки України» ” (Вінниця, ВНТУ, 2021), “Органічні і мінеральні в’язучі та дорожні бетони на їх основі : збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції” (Харків, ХНАДУ, 2022), “Матеріали XLIX науково-технічної конференції підрозділів” (Вінниця, ВНТУ, 2020).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 11 наукових праць, у тому числі: 2 статті у закордонних виданнях, що включені до наукометричних баз Scopus та Web of Science Core Collection, 4 публікації у наукових фахових виданнях України для публікації результатів дисертаційних досліджень, 1 стаття опублікована у закордонному науковому журналі, що видається в країні, яка є членом ЄС та 4 публікації в матеріалах доповідей і тез науково-технічних конференцій та семінарів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, шістьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 193 сторінок, з яких 134 сторінки основного тексту. Список використаних джерел налічує 147 найменувань. Текст ілюструється 61 рисунком та містить 32 таблиці.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Технології прибирання снігу та методи боротьби з ожеледицею

За останні десятиліття світова транспортна інфраструктура зазнала значного розвитку, що призвело до будівництва великої кількості асфальтових покриттів. Тим не менш, у високоширотних регіонах в зимовий період асфальтове покриття щороку вкривається льодом і снігом, що значно знижує безпеку дорожнього руху і підвищує ймовірність дорожньо-транспортних пригод на відповідних територіях [8], [9]. Наявність снігу та льоду на дорогах знижує коефіцієнт тертя між шинами та поверхнею приблизно на 60–75% [10]. Таке зниження суттєво впливає на динаміку автомобіля, включаючи стабільність керування, ефективність гальмування та зчеплення з дорогою на схилах. Водночас, несприятливі снігові умови можуть викликати паніку у водіїв, що потенційно ставить під загрозу їхню здатність до швидкої та адекватної оцінки ситуації [11], [12]. Згідно зі статистикою, частота дорожньо-транспортних пригод на мільйон кілометрів доріг зі снігом та ожеледицею становить 20,8%, що вдвічі більше, ніж на звичайних дорогах, при цьому більшість аварій призводить до серйозних жертв [13–15].

В усьому світі проводяться масштабні дослідження, спрямовані на вирішення проблематики ожеледиці та снігових заметів у зимовий період [16], [17]. Для забезпечення безпеки дорожнього руху загальні технології очищення доріг від льоду та снігу включають в себе: ручне, механічне прибирання та застосування протиожеледних речовин. Завдяки своїй простоті, ефективності та економічності, застосування протиожеледних речовин часто є найпопулярнішим методом боротьби з ожеледицею та снігом [18]. Тим не менш, їх надмірне використання може спричинити негативний екологічний вплив на прилеглі флору і фауну, посилити корозію будівельних конструкцій і спричинити зниження експлуатаційної характеристики дорожнього покриття

[19], [20].

Сьогодні Китай налічує найрозгалуженішу в світі мережу автомобільних доріг, що складається з величезної кількості національних, провінційних, сільських і міських доріг різної класифікації. Крім того, планується розширення цієї мережі, що сприятиме подальшому розвитку системи автомобільних доріг в країні [21]. Використання протиожеледних реагентів значно знижує довговічність і міцність доріг, проте жодна з існуючих технологій поки що не може повністю замінити протиожеледні речовини у забезпеченні ефективного прибирання льоду та снігу в зимовий період. Таким чином, систематичне дослідження впливу протиожеледних матеріалів на експлуатаційні характеристики доріг є надзвичайно важливим.

Традиційні, економічно ефективні методи очищення доріг від снігу в Китаї включають в себе ручне, механічне та хімічне прибирання снігу [22], [23]. Ручне прибирання снігу передбачає, що працівники відкидають сніг вручну. Хоча цей метод забезпечує ретельне прибирання, проте він страждає від низької ефективності, високої вартості, потенційних транспортних заторів і проблем з безпекою робітників [24]. Для механічного прибирання снігу використовується спеціалізована техніка, яка призначена для різних технологічних етапів прибирання снігу. Найчастіше використовуються такі снігоприбиральні машини, як: щіткові, плужно-щіткові, роторні, шнекороторні та ін. Хоча механічні методи є більш ефективними, ніж ручне прибирання, проте вони можуть заважати руху автотранспорту, завдавати шкоди дорожньому покриттю, а також потребують значних витрат на обладнання та технічне обслуговування [25], [26]. Хімічне прибирання снігу, переважно, передбачає застосування протиожеледних речовин для танення льоду та снігу. Залежно від хімічного складу, ці реагенти можна розділити на хлоридні, не хлоридні та змішані. Незважаючи на те, що вони ефективно і швидко руйнують лід, їх використання має значний вплив на експлуатаційні характеристики доріг і навколишнє середовище [27–29]. Класифікація технології прибирання снігу розглянута на рис. 1.1.

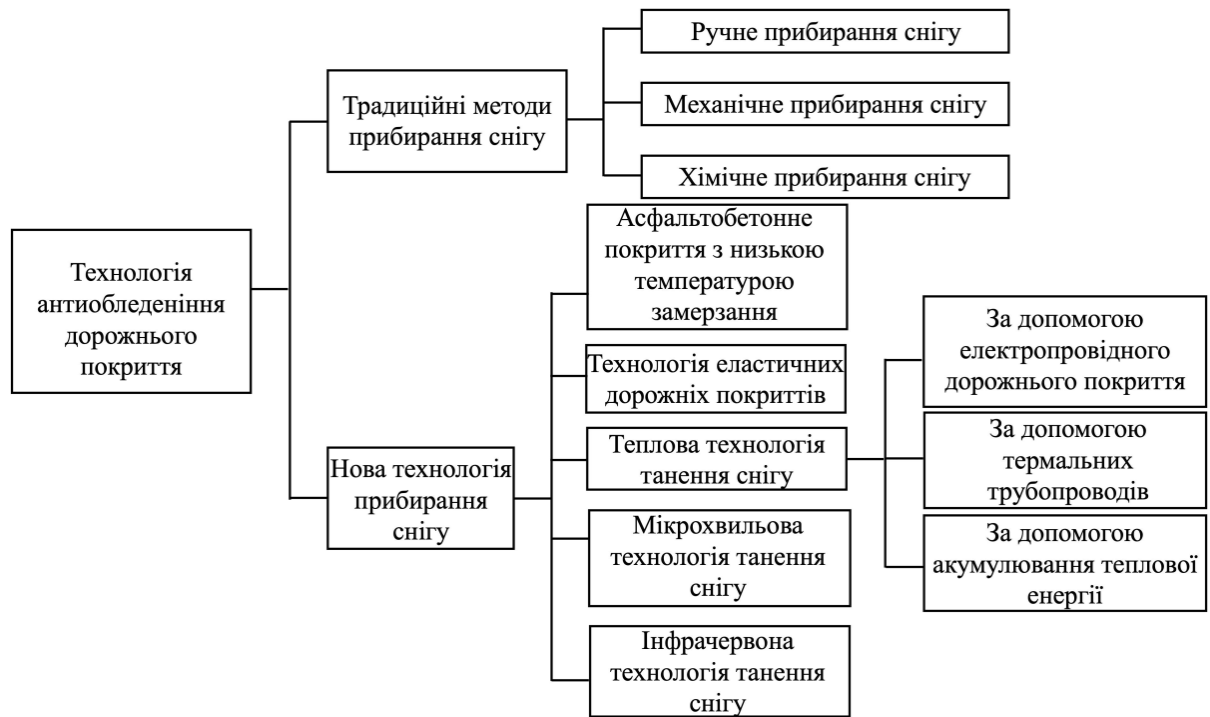


Рисунок 1.1 – Класифікація технології прибирання снігу

Враховуючи обмеження, притаманні традиційним методам прибирання снігу, дослідники ретельно вивчають та впроваджують новітні технології, які включають термічний метод видалення снігу, еластичну технологію дорожнього покриття, дороги з низькою точкою замерзання рідини, мікрохвильову та інфрачервону технології плавлення снігу [30–34].

Теплова технологія прибирання снігу. Дана технологія переважно використовує тепло, отримане з таких джерел, як сонячна енергія, геотермальна енергія, гаряча вода від електростанцій для розтоплення льоду та снігу. До конструктивних методів у цій категорії відносять методи плавлення снігу за допомогою струмопровідного бетону, за допомогою теплових труб та танення снігу за допомогою акумулювання сонячного тепла [30], [35–37]. Технологія електропровідного танення снігу в бетоні включає в себе такі струмопровідні елементи, як сталь і вуглецеві волокна. Для створення струмопровідної системи електроди розміщуються послідовно, в наслідок чого відбувається електропрогрів дорожнього полотна, що сприяє таненню снігу та ожеледі. Дана технологія дозволяє уникнути пошкоджень,

пов'язаних з використанням протиожеледних речовин або механічним прибиранням снігу, але для ефективного танення снігу необхідний потужний електричний струм, що потенційно генерує значне магнітне поле, яке може поставити під загрозу безпеку дорожнього руху [35], [38], [39]. Технологія танення снігу за допомогою теплових трубопроводів, наповнених нагрітою рідиною, передбачає їх прокладання під дорогою, за рахунок яких передається тепло дорожньому покриттю, що в подальшому сприяє таненню снігу. Цей метод вимагає мінімальних початкових інвестицій і дозволяє використовувати різні джерела енергії. Проте прокладання трубопроводів більш великого діаметру може спричинити концентрацію напружень у шарах дорожнього покриття. Під дією транспортних навантажень ці трубопроводи можуть бути пошкоджені, що може призвести до порушення їх конструктивної цілісності [36], [40]. Технологія сонячного нагрівання для танення снігу протягом літніх місяців використовує та акумулює сонячне випромінювання в ґрунті земляного полотна під проїжджою частиною, а потім віддає його взимку, щоб сприяти таненню льоду та снігу. Хоча цей підхід використовує екологічно чисту енергію, забезпечуючи мінімальний вплив на навколишнє середовище і зниження експлуатаційних витрат, проте через значні початкові інвестиції його впровадження залишається складним і співвідношення витрат і прибутку є недостатньо вигідним [37], [41], [42].

Технологія еластичного дорожнього покриття передбачає додавання до складу дорожніх матеріалів вискоеластичних гранульованих компонентів. У поєднанні з асфальтобетоном ці компоненти створюють характерну шорстку дорожню поверхню. Під час ожеледиці при контакті з шинами така поверхня сприяє швидкому руйнуванню льоду та таненню снігу, тим самим переважаючи традиційні види покриттів з точки зору запобігання ожеледиці. Крім того, такі покриття демонструють підвищену стійкість до високих температур. Тим не менш, цей метод підходить переважно для регіонів, де температура взимку не знижується нижче $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ [31], [43], [44].

Асфальтобетонне покриття з низькою температурою замерзання

передбачає додавання до асфальтобетонної суміші добавок з низькою температурою замерзання. Ці добавки, завдяки осмотичній та капілярній дії, поступово потрапляють на поверхню і сприяють таненню льоду та снігу [45], [46]. В даний час існує два основних методи використання цих низькотемпературних добавок: перший - добавка до асфальтобетону, як наповнювач, додається під час будівництва нових доріг, замінюючи частину мінерального порошку; другий - модифікатори та низькотемпературні наповнювачі поєднуються з емульгованим асфальтобетоном для існуючих покриттів, утворюючи ремонтний шар [32], [47], [48].

Технологія боротьби з ожеледицею за допомогою мікрохвиль полягає в нагріванні поверхні розділу між шаром льоду та дорожнім покриттям, що сприяє відшаруванню пласта льоду, з подальшим його механічним видаленням. Перевага цього методу полягає в його ефективності, оскільки метою є не розтоплення всього льоду і снігу, а лише їхнє відокремлення від поверхні дороги, що дозволяє оптимізувати споживання енергії і зберегти цілісність дорожнього покриття. Проте, мікрохвильова технологія має свої недоліки, головним з яких є її повільний темп, що ускладнює швидке очищення дорожнього покриття від ожеледиці [33], [49], [50].

Технологія інфрачервоного танення снігу ґрунтується на подібності частоти інфрачервоних променів до частоти коливань молекул льоду та снігу. Інтенсифікуючи рух цих молекул, температура підвищується, що полегшує видалення льоду та снігу. Цей метод забезпечує високий коефіцієнт використання енергії та комплексне очищення від льоду та снігу. Однак його ефективність може бути обмежена при дуже низьких температурах навколишнього середовища, коли швидкість підвищення температури може бути недостатньою для ефективного видалення льоду [34], [51], [52].

1.2 Використання протиожеледних речовин

В Китаї щорічно використовується близько 10 мільйонів тонн різних

протиожеледних речовин для очищення доріг, і їх використання зростає з кожним роком [53], [54]. В даний час протиожеледні суміші в основному поділяються на три категорії: перша - хлорні протиожеледні суміші, переважно NaCl, MgCl₂, CaCl₂, KCl тощо; друга - нехлорні протиожеледні суміші, переважно неорганічні солі, спирти, аміни, ацетат, ацетат калію тощо; третя - змішані протиожеледні суміші, які переважно складаються з комбінації хлорних і нехлорних солей, що часто доповнюються антикорозійними засобами [55–57]. Класифікація протиожеледних речовин розглянута на рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Класифікація протиожеледних речовин

Хлорна сіль є найпершою і найбільш використовуваною сіллю для боротьби з ожеледицею в даний час. Її основним компонентом є сіль хлору, включаючи широко використовувані NaCl, MgCl₂, CaCl₂, KCl тощо. Хлорид магнію має найкращі показники танення снігу, але він має певну токсичність, тому його використання обмежено. Хлорид кальцію може виділяти теплову енергію при розчиненні, що є ефективною сіллю для боротьби з ожеледицею, але зберігати його проблематично та має велику вартість. Хлорид натрію має

свої переваги: нетоксичний, забезпечує належний ефект танення снігу та має низьку ціну, тому наразі він найбільш широко використовується як протижеледна речовина на основі хлору [58], [59].

Нехлорні протижеледні речовини, вперше розроблені Міністерством транспорту США у 1980-х роках, спочатку містили ацетат кальцію та магнію. З продовженням досліджень вони перетворилися на дві основні категорії: органічні протижеледні речовини на основі поліолів, виготовлені з рідких поліорганічних кислот і поліолів; органічні протижеледні речовини на основі ацетатів, що складаються переважно з ацетатних груп. Поліольні органічні протижеледні речовини в основному складаються з природних рослин, які можуть розкладатися і метаболізуватися в природі, в той же час, ця протижеледна речовина має незначний вплив на тварини і рослини. Органічна протижеледна речовина на основі ацетату використовує целюлозу з побутових відходів та вапняк, що містить карбонат магнію, як основну сировину для виробництва. Він менше забруднює навколишнє середовище, добре впливає на танення снігу, має високу ефективність і очевидне пригнічення корозії металу, проте його собівартість дуже висока і тому, протижеледна речовина на його основі не може бути використана в широких масштабах [60–62].

Змішана протижеледна речовина отримується при змішуванні хлорної та нехлорної протижеледних речовин в певних пропорціях та вибіркового додаванні добавок, таких як інгібітор іржі та корозії, щоб вона мала переваги ефективного танення снігу та захисту навколишнього середовища [63–65]. Змішуючи хлорид натрію і СМА в певній пропорції, Фанг та інші вчені приготували змішану протижеледну речовину. Її корозія на металах значно зменшилася порівняно з корозією хлорної протижеледної речовини, а ціна була набагато нижчою, ніж у нехлорної протижеледної речовини. При цьому розчинність отриманої речовини була меншою ніж у хлорної протижеледної речовини [57], [66].

1.3 Недоліки використання протижеледних речовин

Починаючи з 1960-х років, Сполучені Штати поступово усвідомлювали забруднення навколишнього середовища та вплив корозії спричинений протижеледними речовинами [67]. Шкідливість протижеледних речовин, насамперед, особливо спостерігається в корозії автомобільних доріг і мостів, що відповідно впливає на безпеку руху та економічний розвиток [68]. Більше того, дослідники поступово виявили, що використання протижеледних речовин призвело до серйозного забруднення навколишнього середовища, що мало великий вплив на суспільство та економіку [69–71].

Хлоридна протижеледна речовина є найпоширенішою протижеледною речовиною на сьогоднішній день, тому її наслідки для довкілля також є найбільш значними [72]. Велика кількість хлористого реагенту поступово накопичується в ґрунті по обидва боки дороги [73–75]. У дощових регіонах сіль поширюватиметься вздовж акваторії, впливаючи на весь водозбір. Хоча концентрація сольового розчину зменшується, масштаб наслідків - розширюється. Однак, у районах з низькою кількістю опадів або тривалою посухою сіль недостатньо змивається дощем, тому ґрунт біля дороги матиме високий вміст протижеледного реагенту [76], [77]. Вчені провели деякі дослідження щодо дифузії протижеледної речовини. Хізер Робінсон (Heather K. Robinson) [78] та інші вчені зі США виявили, що ґрунт є резервуаром, який накопичує протижеледну речовину, яку застосовували в взимку. Канадський дослідник Нандана Перера та його команда [79] вивчали забруднення ґрунтових вод внаслідок використання протижеледних речовин у Східному Торонто. Вони виявили, що після зимового застосування цих реагентів, незважаючи на те, що вони поширюються вниз за течією через поверхневий стік і підземні води, призводить до залишкового накопичення. Наприкінці літа концентрація хлорид-іонів досягла піку в 505 мг/л, що значно перевищує допустимий рівень 250 мг/л для питної води в Канаді. Шведський дослідник Макс Л [64] визначив, що 67% свердловин, розташованих у радіусі

100 метрів від місця використання протижеледних речовин, продемонстрували значне підвищення концентрації хлоридів.

Незалежно від того, чи зноситься протижеледна речовина вниз за течією річки, чи залишається в ґрунті, вона завдасть шкоди екологічному середовищу в межах свого впливу [73], [80]. У Норвегії Урма Махрош [81] дослідила вплив хлоридних протижеледних речовин на запліднення та ранні стадії росту атлантичного лосося. Дослідження показало, що життєздатність ікринок лосося знижується, а також підвищується ймовірність аномалій у молодих лососів. В Ополе, Польща, Ізабела Чернявська-Куша провела дослідження згубного впливу протижеледних речовин на якість ґрунту та навколишніх дерев. Дослідження показало, що підвищення концентрації протижеледних речовин у ґрунті призводить до в'янення та некрозу листя [82]. Кайла Д. Колдсноу (Kayla D. Coldsnow) [83] у США досліджувала зміни чутливості планктону (Дафнія магна) до протижеледних речовин і виявила, що в розчині протижеледної речовини планктон еволюціонує через 2,5 місяці, а протижеледна речовина прискорила еволюцію видів, що перебувають у сфері її впливу. В Едмонтоні, Канада, М.А. Екіза дослідив тривалий вплив протижеледних речовин на міські дерева та ґрунт. Результати показали, що в зонах впливу протижеледних речовин провідність ґрунту та рівень рН були помітно підвищеними порівняно з ділянками, на які не впливали протижеледні речовини. Крім того, в листі дерев у цих зонах спостерігався підвищений рівень натрію, тоді як вміст хлорофілу в них зменшився [84]. Каміло Ордонес-Барона та інші вчені [85] з Канади виявили, що протижеледні речовини знижують клітинну активність дерев, що призводить в подальшому до хвороб та їх загибелі.

Хоча протижеледні речовини ефективно впливають на танення льоду та снігу, вони водночас чинять значний негативний вплив на інфраструктуру [86], [87]. У минулому столітті, коли деякі країни використовували реагенти для боротьби з ожеледицею, було виявлено, що після використання реагентів протягом від 5 до 15 років у конструкціях виникала серйозна корозія

арматури [88], [89]. Це пояснюється тим, що за нормальних умов арматура знаходиться в лужному середовищі, утвореному бетоном, тому на її поверхні утворюється захисна плівка, яка запобігала її корозії. У середовищі, де переважають протижеледні речовини на основі хлоридів, іонізований Cl^- проникає в бетон та руйнує захисний шар бетону. Цей перехід переводить сталь з пасивного стану в активний, що значно прискорює корозію арматури в залізобетоні [90–92]. У Канаді широке застосування протижеледних речовин призвело до значного погіршення стану інфраструктури через корозію. Щорічні витрати на усунення та ремонт пошкоджень, спричинених корозією, перевищують 500 мільярдів доларів США [93], [94]. У 1972 році у Великій Британії було побудовано 11 мостів на 20-кілометровій автомагістралі. Однак, через велике використання протижеледної речовини, через кілька років виникла серйозна корозія, і вартість ремонту мосту склала 160% від вартості будівництва [95]. Внаслідок тривалого впливу протижеледних речовин на деяких мостах у Пекіні, Китай, спостерігається сильна корозія арматури. Повідомляється навіть про те, що бетон шляхопроводів, які були побудовані лише понад десять років тому, має серйозні тріщини і відколи, через що арматура оголюється і піддається корозії [96], [97].

1.4 Вплив протижеледних речовин на властивості асфальтобетону

У 1940-х роках дослідники помітили, що застосування протижеледних речовин призводить до посиленого руйнування асфальтових покриттів [98], [99]. Після 1950 року кілька країн, включаючи США, Канаду та країни Північної Європи, почали впроваджувати стратегії, спрямовані на зменшення негативного впливу протижеледних речовин на дорожнє покриття під час проєктування доріг. Шкідливий вплив протижеледних речовин на асфальтобетон охоплює як фізичні, так і хімічні руйнування. Фізичне руйнування переважно спричиняє руйнування асфальтобетонного покриття, що призводить до відшарування бітумного в'язучого від заповнювача, і

подальшого зниження опору на зсув [100], [101]. І навпаки - хімічні пошкодження виникають внаслідок зміни властивостей бітуму. Сукупна дія температурних коливань і транспортних навантажень спричиняє збільшення об'єму кристалів при висиханні розчину протижеледної солі. Це призводить до зниження несучої здатності асфальтобетону, що в кінцевому підсумку призводить до руйнування покриття [102], [103].

Бітум, будучи найбільш важливим і вразливим компонентом асфальтобетону, відіграє ключову роль у визначенні його експлуатаційних характеристик. Зміни в технічних характеристиках бітуму суттєво впливають на загальні характеристики асфальтобетону. Однак, коли дороги обробляються протижеледними речовинами взимку, бітум є основним матеріалом, який безпосередньо взаємодіє з протижеледною речовиною. Тому було проведено дослідження, щоб зрозуміти вплив протижеледної речовини на властивості бітуму. Вей [104] дослідив вплив двох протижеледних речовин на основі хлору на звичайний бітум і модифікований SBS. Результати показали, що в той час як протижеледні речовини підвищують високотемпературну стійкість чистого бітуму, вони негативно впливають на високотемпературну стійкість бітуму модифікованого SBS. Крім того, вони знижували температурну стійкість чистого бітуму, але підвищували її для SBS-модифікованого. При більш низьких температурах експлуатаційні характеристики бітуму під впливом протижеледних речовин знижувались. Серед двох досліджуваних протижеледних солей, CaCl_2 мав виражений вплив на експлуатаційні характеристики чистого бітуму, тоді як NaCl показав більш значний вплив на модифікований SBS. Важливо, що не було виявлено жодної хімічної взаємодії між протижеледними речовинами та бітумом, це свідчить про те, що при насиченні протижеледними речовинами не змінилась молекулярна структура або функціональні групи в асфальті. Хан [105–107] та ін. досліджували низькотемпературні реологічні характеристики і мікроструктури чистого бітуму, модифікованого SBS і бітуму модифікованого гумовим порошком, після циклічного заморожування-відтавання за допомогою випробування при

згині балочки (BBR) і скануючої електронної мікроскопії (SEM). Результати показали, що модифікатор, присутній в бітуму у специфічній формі, продемонстрував відмінну сумісність з бітумом. Ця сумісність дозволила модифікатору ефективніше зв'язуватися з бітумом, підвищуючи його стійкість до низькотемпературного розтріскування. Однак циклічне заморожування-відтавання солі призвело до руйнування структурної цілісності бітуму, змінивши його низькотемпературні властивості. Після такого циклу модуль жорсткості при зсуві асфальту збільшився, а швидкість його повзучості зменшилася, що призвело до зниження низькотемпературної тріщиностійкості та здатності до зменшення напружень. Тим не менш, модифіковані бітуми продемонстрували вищу низькотемпературну тріщиностійкість порівняно з чистим бітумом. Цуй [108] використовував атомно-силовий мікроскоп і реометр динамічного зсуву для оцінки як чистого бітуму, так і модифікованого крихтою гуми, до і після циклічного заморожування-відтавання з використанням солі. Порівнюючи мікроструктури та динамічні в'язкопружні параметри обох типів бітуму з різною концентрацією солі та тривалістю циклів, було виявлено, що коефіцієнт утворення колії та модуль зчеплення бітум на звичайному бітумі збільшився, при цьому коефіцієнт його деформацій зменшився. На противагу цьому, асфальт, модифікований гумовою крихтою, залишився практично незмінним. Цикл заморожування-відтавання солі підвищив високотемпературні еластичні властивості чистого асфальту, але помітно зменшив його опір деформаціям, в той час як асфальт, модифікований крихтою гуми, залишився практично без змін. Сканування за допомогою атомно-силового мікроскопа показали розширення і подовження комірчастої структури в чистому асфальті після циклу заморожування-відтавання. Однак структура бітуму, модифікованого гумовою крихтою, залишилася незмінною. Дослідження Сяо показали, що занурення бітуму в розчин ацетатної протижелезної речовини призвело до значного збільшення в'язкості асфальту. Спостерігалось виражене розм'якшення бітуму, яке посилювалося зі

збільшенням концентрації розчину та тривалості занурення [109], [110]. Цуй [111] дослідив поведінку низькотемпературної повзучості та зміни в мікроструктурі модифікованого SBS бітумі та його композиті, що піддавалися циклам заморожування-відтавання в розчині солі. Спостереження показали помітну трансформацію мікроструктури після вищезгаданих циклів. Зокрема, поява кристалів солі після цих циклів негативно вплинула на цілісність мембрани бітуму і загальну щільність структури композиту. Крім того, цикл заморожування-відтавання з використанням дистильованої води суттєво вплинув на стійкість асфальту до низькотемпературного розтріскування. При зниженні температури, стійкість до низькотемпературного розтріскування в бітумі, модифікованому SBS, після циклів заморожування-відтавання знижувалась. Крім того, збільшення частоти циклів заморожування-відтавання відповідало зменшенню низькотемпературної тріщиностійкості SBS-модифікованого бітуму та його композиту. Паралельно Цуй [112] провів оцінку високотемпературних, низькотемпературних властивостей та мікроструктурних характеристик як матричного бітуму, так і бітуму, модифікованого SBS, до і після циклів заморожування-відтавання зразків, насичених сіллю. Після циклу проведених досліджень, аналіз виявив чіткі зміни в розмірах і кількості комірчастої структури бітуму. Зокрема, спостерігалось збільшення вмісту асфальтену в звичайному бітумі, що супроводжувалося погіршенням стану дисперсності. Крім того, зазнала руйнування тривимірна сітка модифікатора SBS. Збільшення концентрації протижелезної речовини відповідно зменшувало стійкість звичайного бітуму до низькотемпературного розтріскування. Слід зазначити, що високотемпературні характеристики бітуму, модифікованого SBS, перевершили характеристики бітуму без добавок.

Стійкість асфальтобетону до високих температур є ключовим показником для оцінки схильності дорожнього покриття до постійних деформацій, включаючи утворення колій, зсувів та спучування при впливі літніх підвищених температур [113]. Автором [114] проведено аналіз

основних факторів впливу та запропоновано практичні способи підвищення стійкості до зсуву і стійкості асфальтобетону до утворення колії за рахунок полімер бітумного в'язучого і мінеральної частини.

Були проведені наукові дослідження, щоб визначити вплив протижеледних речовин на стійкість дорожнього покриття до високих температур. Ванг [115] дослідив вплив різних концентрації NaCl на пошкодження бітуму та асфальтобетону. Результати показали, що корозія від NaCl прискорює старіння асфальтобетону, що в подальшому знижує стійкість асфальтобетону до високих температур та низькотемпературного розтріскування, а також водостійкості. Лі [116] дослідив вплив різних концентрацій протижеледних речовин, та кількості циклів заморожування-відтавання на експлуатаційні характеристики асфальтобетонного покриття, використовуючи випробування на розтяг при згині, утворення колії та розколювання при стиску. Дослідження показало, що зі збільшенням кількості циклів заморожування-відтавання та концентрації розчину протижеледної речовини знижується стійкість асфальтобетону до тріщеностійкості, стійкість до високих температур та водостійкості. Слід зазначити, що NaCl має більш виражений вплив на експлуатаційні характеристики асфальтобетонного покриття порівняно з CaCl₂.

Стійкість асфальтобетону до низькотемпературного впливу має вирішальне значення для оцінки схильності дорожнього покриття до тріщиностійкості в умовах від'ємних температур. Під час ожеледиці та снігопадів покриття обробляють протижеледними речовинами, що призводить до танення льоду та снігу. Отже, розуміння впливу протижеледних речовин на властивості асфальтобетону при низьких температурах стало важливим напрямком досліджень для науковців. Чанг [117] дослідив закономірності погіршення низькотемпературних властивостей асфальтобетону в умовах заморожування та відтавання у розчинах солі. Використовуючи низькотемпературне випробування на розтяг при згині і зосередившись на таких ключових показниках, як максимальне відношення

деформації розтягу при згині, модуль жорсткості при згині та коефіцієнт деформації. Дослідження показало, що цикли заморожування-відтавання солі помітно зменшили максимальне відношення деформації розтягу при згині, коефіцієнт деформації та модуль жорсткості при згині асфальтобетону. Крім того, зі збільшенням кількості циклів заморожування-відтавання значення зазначених показників зменшувались. Слід зазначити, що вища концентрація сольового розчину та більш низькі температури заморожування-відтавання погіршили низькотемпературні властивості асфальтобетону. Ванг [118], [119] та ін. досліджували вплив протижеледної солі на тріщиностійкість асфальтобетону під час циклів заморожування-відтавання, використовуючи випробування пів циліндрів на згин. Результати показали, що факторами, які впливають на межу міцності при руйнуванні в порядку зменшення впливу, є тип асфальтобетону, кількість циклів замерзання-відтавання та концентрація протижеледної речовини. Шан [120] встановив залежність між зміною низькотемпературної тріщиностійкості асфальтобетону, модифікованого гумовою крихтою, та кількістю циклів замерзання-відтавання. За допомогою випробувань на повзучість при згині та низькотемпературний розтяг при згин зразків-балок при різних концентрацій розчину протижеледної речовини та кількості циклів заморожування-відтавання було порівняно та проаналізовано зміну деформації розтягу при згині та щільності енергії деформації при згині. Результати показали, що після циклів заморожування-відтавання зазначені показники знижуються, що призводить до зниження низькотемпературної тріщиностійкості. Зі збільшенням кількості циклів замерзання-відтавання асфальтобетон з гарячої суміші характеризується меншою здатність протидіяти руйнуванню, спричиненим циклом замерзання-відтавання солей, порівняно з асфальтобетоном з теплої суміші. Використовуючи цикл заморожування-відтавання в розчині солі, Цуй [121] дослідив зміни низькотемпературної тріщиностійкості асфальтобетону на розтяг при згині. Крім того, для виявлення мікроструктурних перетворень асфальтобетону до і після циклів заморожування-відтавання в соляному середовищі була

використана скануюча електронна мікроскопія. Отримані результати виявили помітний вплив циклів заморожування-відтавання на низькотемпературну тріщиностійкість асфальтобетону, причому найбільш виражені пошкодження спричиняє заморожування-відтавання у воді.

Пошкодження асфальтобетонного покриття, спричинені водою, в першу чергу виникають через недостатню водостійкість асфальтобетону. Чжан [122] провів випробування на заморожування-відтавання асфальтобетону з використанням трьох найпоширеніших розчинів протижеледних солей: NaCl, CaCl₂ і MgCl₂. Потенційний вплив цих протижеледних речовин на асфальтобетон оцінювався на основі експериментальних значень міцності на розколювання та зсув. Результати показали, що всі три протижеледні речовини негативно впливають на властивості асфальтобетонного покриття, причому MgCl₂ має найбільш значний вплив, далі CaCl₂, тоді як NaCl має мінімальний негативний вплив. Цао [123] дослідив вплив двох хлор містких протижеледних речовин у різних концентраціях на механічні властивості заповнювачів та зчеплення між бітумом і заповнювачами. Експерименти показали, що після того, як асфальтобетон пройшов цикли "сухий-вологий" і "заморожування-відтавання", міцність заповнювачів і зчеплення між заповнювачами і бітумом зменшилися. Ма [124] дослідив вплив хлорної солі на міцність асфальтобетону після заморожування та відтавання. Результати показали, що цикл заморожування-відтавання із застосуванням хлорної солі суттєво знижує межу міцності на розрив при розколюванні. Крім того, зі збільшенням кількості циклів заморожування-відтавання міцність на розрив знижувалася. Слід зазначити, що підвищення концентрації хлорної солі посилювали негативний вплив на міцність асфальтобетону після циклів заморожування-відтавання. Фенг [125] дослідив вплив концентрації протижеледної солі, температури замерзання і кількості циклів заморожування-відтавання на асфальтобетон, модифікований гумовою крихтою, оцінюючи його залишкову пористість, границю міцності і модуль Маршалла після циклів заморожування-відтавання в розчині солі. Також

спостерігали за мікроскопічною морфологією. Результати показали, що концентрація протижеледної речовини, температура замерзання і частота циклів заморожування-відтавання впливають на залишкову пористість, границю міцності і модуль Маршалла щебенево-мастикового асфальтобетону. Основними факторами зниження водостійкості асфальтобетону є зменшення адгезії в асфальтобетоні спричинене впливом протижеледної солі, а також збільшення об'єму насиченого замерзлого розчину в асфальтобетоні.

1.5 Робоча гіпотеза та загальна блок-схема досліджень

На основі літературних джерел та попередньо проведених лабораторних досліджень була сформована **робоча гіпотеза**: дослідивши експлуатаційних характеристик асфальтобетонного покриття доріг з урахуванням зміни фізичних, гідрофізичних та механічних властивостей асфальтобетону, при використанні протижеледних речовин в умовах клімату Північно-Західного Китаю, дозволить встановити залежності кількісних і якісних параметрів впливу протижеледних речовин, з концентрацією NaCl 20 %, $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ 15 %, $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ 20 % в умовах температур $-5\text{ }^\circ\text{C}$; $-15\text{ }^\circ\text{C}$; $-25\text{ }^\circ\text{C}$, на експлуатаційні характеристики асфальтобетону. Розробивши нову методику та провівши дослідження визначення зміни експлуатаційних характеристик асфальтобетонного покриття доріг в середовищі протижеледних речовин при гідродинамічному впливі, отримаємо додаткові уявлення про руйнування асфальтобетону. Провівши весь комплекс досліджень та удосконаливши існуючу модель прогнозування експлуатаційних характеристик асфальтобетонного покриття, ми матимемо можливість отримувати більш точні прогнозовані значення властивостей асфальтобетонів, можливо попри збільшення кількості прогнозованих циклів випробувань.

Концептуальні засади, методології та технічні підходи, використані в дисертації, проілюстровано за допомогою блок-схема досліджень на рис. 1.3.

Загальна блок-схема досліджень на рис. 1.3 наглядно ілюструє основні

етапи проведення досліджень. Зазначені критерії оцінки та основні фактори впливу протиожеледних речовин на експлуатаційні властивості асфальтобетону.



Рисунок 1.3 – Загальна блок-схема досліджень

1.6 Висновки до розділу 1

У даному розділі розглянуто сучасні загальноприйняті технології боротьби зі снігом та ожеледицею на дорогах, кілька нових технологій видалення снігу, а також класифікацію протиожеледних реагентів. Детально проаналізовано вплив протиожеледних речовин на зміну властивостей асфальтобетону, особливо вплив протиожеледних речовин на водостійкість, високотемпературні властивості та низькотемпературні властивості асфальтобетону:

1. Аналіз літературних джерел показав, що існуючі дослідження впливу протиожеледних речовин на асфальтобетон не враховують характерні умови

Північно-Західного Китаю і не можуть слугувати базою для проектування та утримання доріг.

2. З'ясовано, що більшість існуючих досліджень впливу протижеледних речовин на властивості асфальтобетону розглядали лише вплив окремого фактору, системних досліджень впливу протижеледних речовин на властивості асфальтобетону в багатофакторних умовах не проводились.

3. Наголошено, що на сьогоднішній день існує дуже мало досліджень щодо пошкодження асфальтобетону від дії короточасних впливів при поєднанні гідродинамічного розмиву протижеледними речовинами, тому існує велика потреба у встановленні закономірностей зміни експлуатаційних характеристик асфальтобетону при сумісній дії зазначених факторів.

4. Проведений огляд технічної літератури за темою дисертації та аналіз стану досліджень впливу протижеледних речовин на характеристики асфальтобетонного покриття дозволив сформулювати робочу гіпотезу та мету роботи. Для досягнення мети були поставлені задачі та розроблена загальна блок-схема досліджень

РОЗДІЛ 2

СИРОВИННІ МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Властивості сировинних матеріалів

Основними сировинними матеріалами для асфальтобетону, як композиційного матеріалу, є бітум, мінеральні заповнювачів, наповнювачі та різноманітні добавки які підвищують експлуатаційні властивості. Мінеральні заповнювачі, як правило, включають певну пропорцію крупних, дрібних заповнювачів та наповнювачів. Ключову роль в експлуатаційних характеристиках асфальтобетонного покриття доріг відіграє раціонально підібрана фракційність та співвідношення заповнювачів у поєднанні з властивостями бітуму. Також на якість асфальтобетону значною мірою впливають властивості сировинних матеріалів. Крім того, властивості асфальтобетону залежать від оптимального вмісту бітуму.

2.1.1 Технічна характеристика бітуму

Для виготовлення експериментальних зразків з асфальтобетону використовувався нафтовий бітум марки KL – 90, виготовлений на нафтопереробному заводі Синьцзян-Карамайському. Відповідні технічні характеристики були визначені відповідно до "Стандартних методів випробувань бітуму та асфальтобетону для дорожнього будівництва" (JTG E20 – 2011) [126] та відповідають "Технічним умовам будівництва асфальтобетонних покриттів автомобільних доріг" (JTG F40 – 2017) [127]. Визначені технічні характеристики бітуму наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічна характеристика нафтового бітуму KL – 90

| Індекс | | Перевірене значення | Вимоги | Метод випробування |
|--|-----------------------------------|---------------------|-----------|--------------------|
| Глибина проникнення голки, мм ⁻¹ , за температури 25 °С | | 88.1 | 80~100 | T0604 |
| PI (індекс пенітрації) | | -1.1 | -1.5~+1.0 | T0604 |
| Розтяжність при 15°С, см | | >100 | ≥100 | T0605 |
| Температура розм'якшення, °С | | 48 | ≥45 | T0606 |
| Температура спалаху, °С | | 300 | ≥245 | T0611 |
| Щільність при 15°С, г/см ³ | | 1.033 | — | T0603 |
| Розчинність, % | | 99.8 | ≥99.5 | T0607 |
| Випробування високо температурного витримування бітуму | Зміна маси, % | -0.11 | -0.4~+0.4 | T0610 |
| | Залишкова пенетрація, % | 73 | ≥57 | T0604 |
| | Залишкова розтяжність при 5°С, см | 22 | ≥8 | T0605 |

2.1.2 Властивості заповнювачів та наповнювачів

Заповнювачі були отримані з діабазу Ваньцзяпінського кар'єру, місто Ланьчжоу, провінція Ганьсу. Технічні показники крупного та дрібного заповнювачів, а також мінерального порошку були визначені відповідно до "Методів випробування заповнювачів для будівництва автомобільних доріг" (JTG E42 – 2005) [128]. Всі показники відповідають вимогам "Технічні норми для будівництва асфальтобетонних покриттів автомобільних доріг" (JTG F40 – 2017) [127]. Детальні результати технічних характеристик представлені в табл. 2.2 – 2.6.

Таблиця 2.2 – Технічні показники дрібного заповнювача (0 – 3 мм)

| Властивості | Перевірене значення | Вимоги | Метод випробування |
|-------------------------------------|---------------------|--------|--------------------|
| Середня щільність, т/м ³ | 2.78 | ≥2.50 | T0328 |
| Вміст пиловидних частинок, % | 2.0 | ≤3 | T0333 |
| Вміст чистого піску, % | 76 | ≥60 | T0334 |

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики крупного заповнювача фракції
(3 – 5 мм)

| Властивості | Перевірене значення | Вимоги | Метод випробування |
|--|---------------------|-------------|--------------------|
| Втрати від стирання в Лос-Анджелесі, % | 7.5 | ≤ 30 | T0317 |
| Середня щільність, т/м ³ | 2.81 | ≥ 2.50 | T0304 |
| Твердість, % | 7.6 | ≤ 12 | T0314 |
| Водопоглинання, % | 1.1 | ≤ 3 | T0304 |

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики крупного заповнювача фракції
(5 – 10 мм)

| Властивості | Перевірене значення | Вимоги | Метод випробування |
|--|---------------------|-------------|--------------------|
| Втрати від стирання в Лос-Анджелесі, % | 9.7 | ≤ 30 | T0317 |
| Середня щільність, т/м ³ | 2.81 | ≥ 2.50 | T0304 |
| Твердість, % | 5.1 | ≤ 12 | T0314 |
| Водопоглинання, % | 0.9 | ≤ 3 | T0304 |

Таблиця 2.5 – Технічні характеристики крупного заповнювача фракції
(10 – 16 мм)

| Властивості | Перевірене значення | Вимоги | Метод випробування |
|--|---------------------|-------------|--------------------|
| Дробильність, % | 17.9 | ≤ 28 | T0316 |
| Втрати від стирання в Лос-Анджелесі, % | 11.7 | ≤ 30 | T0317 |
| Середня щільність, т/м ³ | 2.80 | ≥ 2.50 | T0304 |
| Твердість, % | 4.2 | ≤ 12 | T0314 |
| Водопоглинання, % | 0.8 | ≤ 3 | T0304 |

Таблиця 2.6 – Технічні показники мінерального порошку

| Властивості | Перевірене значення | Вимоги |
|------------------------------|---------------------|------------|
| Щільність, т/м ³ | 2.82 | ≥ 2.5 |
| Вологість, % | 0.89 | ≤ 1 |
| Коефіцієнт гідрофільності, % | ≤ 1 | ≤ 1 |

2.1.3 Обґрунтування вибору та технічні показники протижелезних речовин

Для дослідження зміни температурних параметрів шарів асфальтобетонного покриття масиву експлуатованої дороги високого класу в провінції Ганьсу, Китай, під впливом сезонного коливання кліматичних режимів зовнішнього середовища, було встановлено дев'ять метеорологічних станцій. Місцезорозташування метеорологічних станцій зазначено в табл. 2.7. Встановлення дев'яти метеорологічних станцій забезпечує надійний збір даних, необхідних для аналізу температурного поля дорожнього покриття на північному заході Китаю.

Для влаштування свердловин у тестових точках, в яких встановлюють температурні датчики, використовується свердлильний верстат. Температурні датчики розташовуються на глибині 10 см, 20 см, 30 см, 40 см і 50 см, при цьому пошарово засипають асфальтобетоном та ущільнюють. Вбудовані датчики складаються з монітора вологості та пристрою для вимірювання температури шару асфальтобетону. Технологію встановлення датчиків показано на рис. 2.1.

Таблиця 2.7 – Місцезорозташування метеорологічних станцій

| Місцезнаходження | Дорога | Номер станції |
|--|----------------------------------|---------------|
| Пінчуань | Швидкісна автомагістраль Любай | SK1459+150 |
| Центр технічного обслуговування доріг Цзяюйгуань | Швидкісне шосе Цзяань | XK2425+300 |
| Вихід з тунелю Ушаолін 2 | Швидкісне шосе Ляньхуо | SK1459+15 |
| Гахаї. | Національне шосе 213 | SK382+45 |
| Вангертанг | Швидкісне шосе Лінъхе | XK122+900 |
| Ганьцюань. | Швидкісна автомагістраль Баотянь | XS1353+490 |
| Вуду. | Швидкісне шосе Ланхай | SK927+910 |
| Цицзямяо | Швидкісне шосе Вейву | XK128+950 |
| Матупо | Швидкісна автомагістраль Лейсі | SK1360+350 |



Рисунок 2.1 – Технологія встановлення датчиків

Метеостанція CairoBase збирає відповідні кліматичні дані про: швидкість і напрямок вітру, опади, інтенсивність сонячної радіації та вологість повітря. Вона живиться від сонячної енергії та безпосередньо завантажує дані моніторингу в GPRS, а потім на інтернет-платформу. Періодичність збору даних становить 1 раз/год. Встановлені на метеостанції датчики - це датчики вологості та температури. Метеостанція складається з: анемометра, сонячної батареї, координатора та дощоміра, як показано на рис. 2.2.



Рисунок 2.2 – Метеорологічна станція

Згідно з даними, зібраними метеорологічними станціями, температура дорожнього покриття в китайській провінції Ганьсу в зимовий період може досягати $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, а відносна вологість - менше 30 %.

Для випробування на температуру замерзання було відібрано кілька найпоширеніших хлорвмісних та нехлорвмісних протиожеледних речовин. Для цього було використано прилад, який складається з: двоканального контактного термометра TR6602, морозильної камери з постійною температурою та терморезистора (рис. 2.3).

Для визначення температури замерзання протиожеледні речовини змішували з дистильованою водою у концентраціях 5 %, 10 %, 15 % та 20 %. Результати визначення точки замерзання для кожної протиожеледної речовини представлені в табл. 2.8.

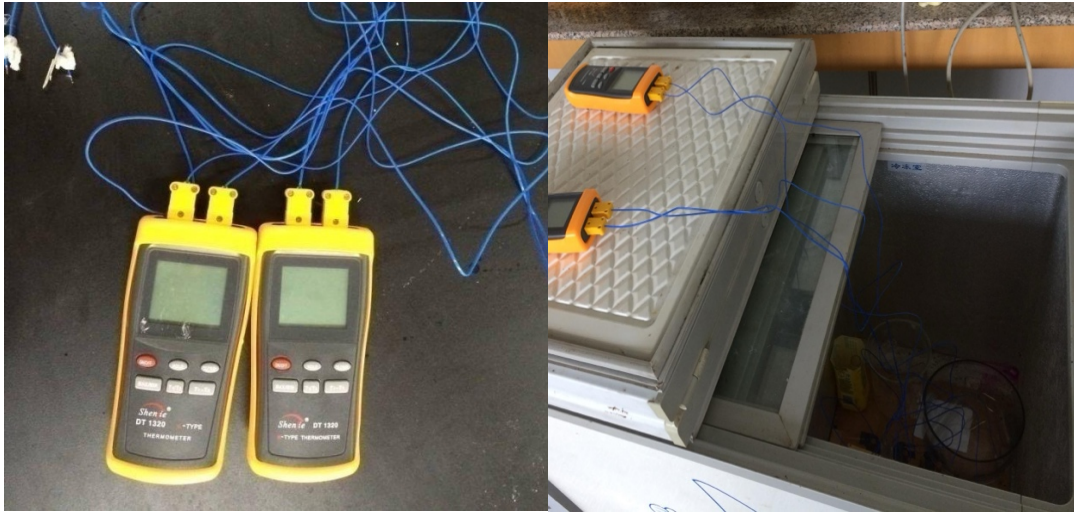


Рисунок 2.3 – Обладнання для визначення температури замерзання протиожеледної речовини

Таблиця 2.8 – Результати випробувань точки замерзання протиожеледних речовин різних концентрації

| Вид протиожеледних речовин | Концентрація, % | | | |
|--|----------------------------|-------|--------|--------|
| | 5% | 10% | 15% | 20% |
| | Температура замерзання, °C | | | |
| CaCl ₂ | -2.35 | -6.00 | -10.70 | -17.73 |
| NaCl | -3.10 | -7.15 | -11.33 | -16.70 |
| CH ₂ CH ₃ OH | -2.05 | -4.77 | -9.48 | -16.70 |
| CH ₃ CH(OH)CH ₂ OH | -1.78 | -3.20 | -6.40 | -8.53 |
| HOCH ₂ CH ₂ OH | -1.93 | -4.23 | -7.85 | -11.25 |
| (CH ₃ COO) ₂ Ca | -1.48 | -3.15 | -5.63 | -8.13 |
| CH ₄ N ₂ O | -2.05 | -3.18 | -5.48 | -7.48 |

Для з'ясування впливу протиожеледних речовин на короткочасне руйнування асфальтобетону було обрано сечовину (CH₄N₂O), хлорид натрію (NaCl) та спирт (CH₂CH₃OH). Зазначені речовини були прийняті з врахуванням таких факторів: поширеність застосування для запобігання ожеледиці та танення снігу, точка замерзання, вартість та вплив на навколишнє середовище. Хлорид натрію, завдяки його ефективності та економічності, широко використовується для зимового утримання доріг. Сечовина, несольова органічна сполука, як добриво, широко застосовується в сільському господарстві, а також використовується для зимового утримання доріг та

аеродромів. Незважаючи на те, що сечовина має вищу температуру замерзання порівняно з хлоридом натрію, її перевагою є те, що вона має незначний вплив на навколишнє середовище та сприяє підживленню рослин. Сечовина має перевагу при використанні в екологічно чистих регіонах. Технічний спирт, який переважно використовують для танення снігу, має низьку температуру замерзання і високу летючість, що дозволяє його використання у суворих зимових умовах навколишнього середовища. На попередньому етапі було визначено температуру замерзання семи найпоширеніших протижеледних речовин у різних концентраціях. Результати показали незначну різницю між точками замерзання $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ при концентрації 15 % і 20 %. І навпаки, різниця в точках замерзання була помітна при порівнянні 15 % і 20 % концентрації для NaCl , так і $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$. Враховуючи ці дослідження, а також вплив на ефективність танення снігу та економічну доцільність, в якості протижеледних речовин для проведення експериментів були прийняті $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ з концентрацією 15 %, NaCl - 20 % та $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ - 20 %.

В якості трьох видів протижеледних речовин вибрали сечовину ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) виробництва Gansu Liuhua (Group) Co, Ltd, технічну сіль (NaCl) виробництва Golmud Baojin Chemical Trading Co, Ltd та технічний спирт ($\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$) виробництва Tianjin Beichen Fangzheng Reagent Factory. Їхні технічні характеристики відповідають відповідним вимогам та представлені в табл. 2.9 – 2.11.

Таблиця 2.9 – Технічні характеристики сечовини ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$)

| | |
|--|---------------|
| Масова частка загального азоту(N), % | ≥ 46.4 |
| Масова частка біурету, % | ≤ 0.5 |
| Вода, % | ≤ 0.3 |
| Масова частка заліза (у Fe), % | ≤ 0.0005 |
| Лужність (у масовій частці NH_3), % | ≤ 0.01 |
| Масова частка сульфатів (в SO_4^{2-}), % | ≤ 0.005 |
| Масова частка нерозчинної у воді залишку, % | ≤ 0.005 |

Таблиця 2.10 – Технічні характеристики промислової солі (NaCl)

| | |
|--|-------|
| NaCl, г/100г | ≥99.1 |
| Вода, г/100г | ≤0.30 |
| Масова частка нерозчинної у воді залишку, г/100г | ≤0.05 |
| Загальний вміст іонів кальцію та магнію, г/100г | ≤0.25 |
| Сульфат-іона, г/100г | ≤0.30 |

Таблиця 2.11 – Технічні характеристики спирту (CH₂CH₃OH)

| | |
|--|-------------|
| Об'ємна частка етанолу (CH ₂ CH ₃ OH), % | ≥99.7 |
| Щільність, при 20°C (г/см ³) | 0.789—0.791 |
| Тест на змішування з водою | Змішується |
| Масова частка залишку після випаровування, % | ≤0.001 |
| Масова частка води, % | ≤0.3 |
| Масова частка метанолу, % | ≤0.05 |
| Масова частка ізопропанолу, % | ≤0.01 |

2.2 Підбір складу та визначення властивостей експериментальних зразків з асфальтобетону

У роботі досліджувались два різних складу асфальтобетонних сумішей АС – 13 та АС – 16. На прикладі асфальтобетону АС – 13, відповідно до методики проектування сумішей за Маршаллом, було проведено розрахунок складу компонентів. Для асфальтобетону АС – 16 лише представлено отримані в результаті розрахунки та технічні характеристики.

Спочатку визначаємо зерновий склад заповнювача. Залежно від номінального розміру заповнювача розрізняють чотири фракції: фракція № 1 (10 – 16 мм), фракція № 2 (5 – 10 мм), фракція № 3 (3 – 5 мм) і фракція № 4 (до – 3 мм). Крупні, дрібні заповнювачі та мінеральний порошок проходять випробування відповідно до стандарту "Методи випробування заповнювачів для дорожнього будівництва" (JTG E42 – 2005) [128]. Відповідні результати випробувань для кожної фракції заповнювачів і мінерального порошку наведені в табл. 2.12.

Таблиця 2.12 – Результати просіювання заповнювачів і мінерального порошку

| Розмір комірок сітки, мм | Відсоток маси, що проходить через сито, % | | | | |
|--------------------------|---|--------------|-------------|-------------|---------------------|
| | Фракція 10–16 | Фракція 5–10 | Фракція 3–5 | Фракція 0–3 | Мінеральний порошок |
| 16 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| 13.2 | 92.3 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| 9.5 | 10.7 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| 4.75 | 1.8 | 3.0 | 94.3 | 94.3 | 100.0 |
| 2.36 | 0.7 | 1.2 | 67.4 | 67.4 | 100.0 |
| 1.18 | 0.7 | 1.0 | 45.0 | 45.0 | 100.0 |
| 0.6 | 0.7 | 1.0 | 29.2 | 29.2 | 100.0 |
| 0.3 | 0.7 | 1.0 | 13.4 | 13.4 | 99.9 |
| 0.15 | 0.7 | 1.0 | 10.0 | 10.0 | 99.7 |
| 0.075 | 0.7 | 1.0 | 3.5 | 3.5 | 89.0 |

На основі результатів досліджень для кожної фракції заповнювачів було підбрано три варіанти зернового складу та визначено їхні властивості. Результати проведених досліджень представлені у табл. 2.13. Рис. 2.4 ілюструє три варіанти зернового складу для асфальтобетону АС – 13.

Таблиця 2.13 – Зернові склади заповнювачів та їх фізичні властивості для асфальтобетону АС – 13

| Зерновий склад | | ЗС № 1 | ЗС № 2 | ЗС № 3 |
|-------------------------------------|---------------------|--------|--------|--------|
| Частка загального обсягу, % | 10–16 мм | 23 | 20 | 31 |
| | 5–10 мм | 20 | 26 | 17 |
| | 3–5 мм | 19 | 20 | 15 |
| | 0–3 мм | 35 | 30 | 32 |
| | Мінеральний порошок | 3 | 4 | 5 |
| Дійсна щільність, т/м ³ | | 2.902 | 2.903 | 2.902 |
| Середня щільність, т/м ³ | | 2.798 | 2.799 | 2.798 |

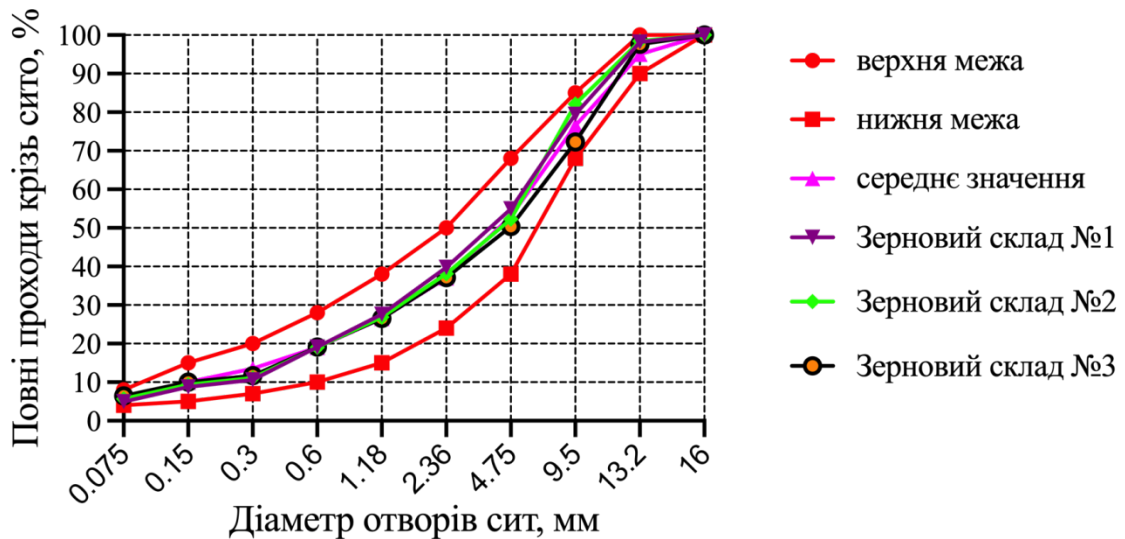


Рисунок 2.4 Фракційна крива трьох зернових складів для асфальтобетону АС – 13

Далі з трьох розглянутих варіантних зернових складів обертаємо оптимальний, при цьому приймаємо витрати бітуму 5,0 %. Відповідно до стандартного процесу, зразки Маршалла формуються з трьох зернових складів, наведених у табл. 2.13, і визначаються наступні властивості: дійсна щільність, залишкова пористість, стабільність та інші показники. Результати значень кожного показника наведені в табл. 2.14. Після порівняння технічних характеристик трьох видів зразків з асфальтобетону з різним зерновим складом встановлено, що зразки асфальтобетону з зерновим складом № 2 є ближчими до проектних вимог. Тому асфальтобетон, з зерновим складом № 2, оптимального складу прийнятий для виготовлення зразків АС – 13.

В попередніх розрахунках було прийнято вміст бітуму 5,0 %. Далі для визначення оптимального вмісту бітуму були розглянуті варіанти дозування 4,5 %, 4,8 %, 5,1 %, 5,4 % та 5,7 %. Зразки виготовлялись з шляхом змішування заповнювачів, які відповідають зерновому складу № 2, з бітумом відповідно до варіантів дозування. Було виготовлено 5 груп по 4 зразка для кожної групи. Після визначення фізичних властивостей зразків, для оцінки стійкості за Маршаллом та осідання, їх занурювали у водяну баню при температурі 60 °С на 30 хвилин. На рис. 2.5 зображено кореляційні криві між

фізико-механічними показниками зразків, визначних за методом Маршалла, та вмістом бітуму.

Таблиця 2.14 – Показники тесту за Маршаллом для трьох зернових складів асфальтобетону

| Зерновий склад | ЗС № 1 | ЗС № 2 | ЗС № 3 | Технічна вимога |
|---|--------|--------|--------|-----------------|
| Середня щільність, т/м ³ | 2.337 | 2.355 | 2.323 | – |
| Дійсна щільність, т/м ³ | 2.466 | 2.470 | 2.464 | – |
| Стабільність, кН | 7.96 | 8.75 | 8.985 | ≥8 |
| Осідання (умовна пластичність), мм | 2.16 | 1.79 | 1.46 | 1.5~4.4 |
| VMA (пористість мінеральної частини), % | 15.9 | 16.2 | 16.7 | ≥13 |
| Залишкова пористість, % | 4.31 | 4.51 | 4.96 | 3~5 |
| Насиченість, % | 72.9 | 72.2 | 70.3 | 65~75 |

З рис. 2.5 видно, що значення вмісту бітуму, яке відповідає піковому значенню стабільності, становить $A_1 = 5,1\%$. Відповідно вміст бітуму, що відповідає максимальному значенню дійсної щільності, становить $A_2 = 5,1\%$. Аналогічно, вміст бітуму, що відповідає середньому діапазону значень залишкової пористості, становить $A_3 = 5,28\%$, а вміст бітуму, що відповідає середньому діапазону насиченості, $A_4 = 4,81\%$. Отже, використовуючи рівняння (2.1), можна визначити значення оптимального вмісту бітуму $ОВБ_1$.

$$ОВБ_1 = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4}{4}, \quad (2.1)$$

де $ОВБ_1$ – оптимальний вміст бітуму;

$A_1 - A_4$ – відповідний вміст бітуму.

Підставивши значення $A_1 - A_4$ в формулу (2.1), отримаємо оптимальне значення вмісту бітуму:

$$ОВБ_1 = (5,1\% + 5,1\% + 5,28\% + 4,81\%) / 4 \approx 5,07\%.$$

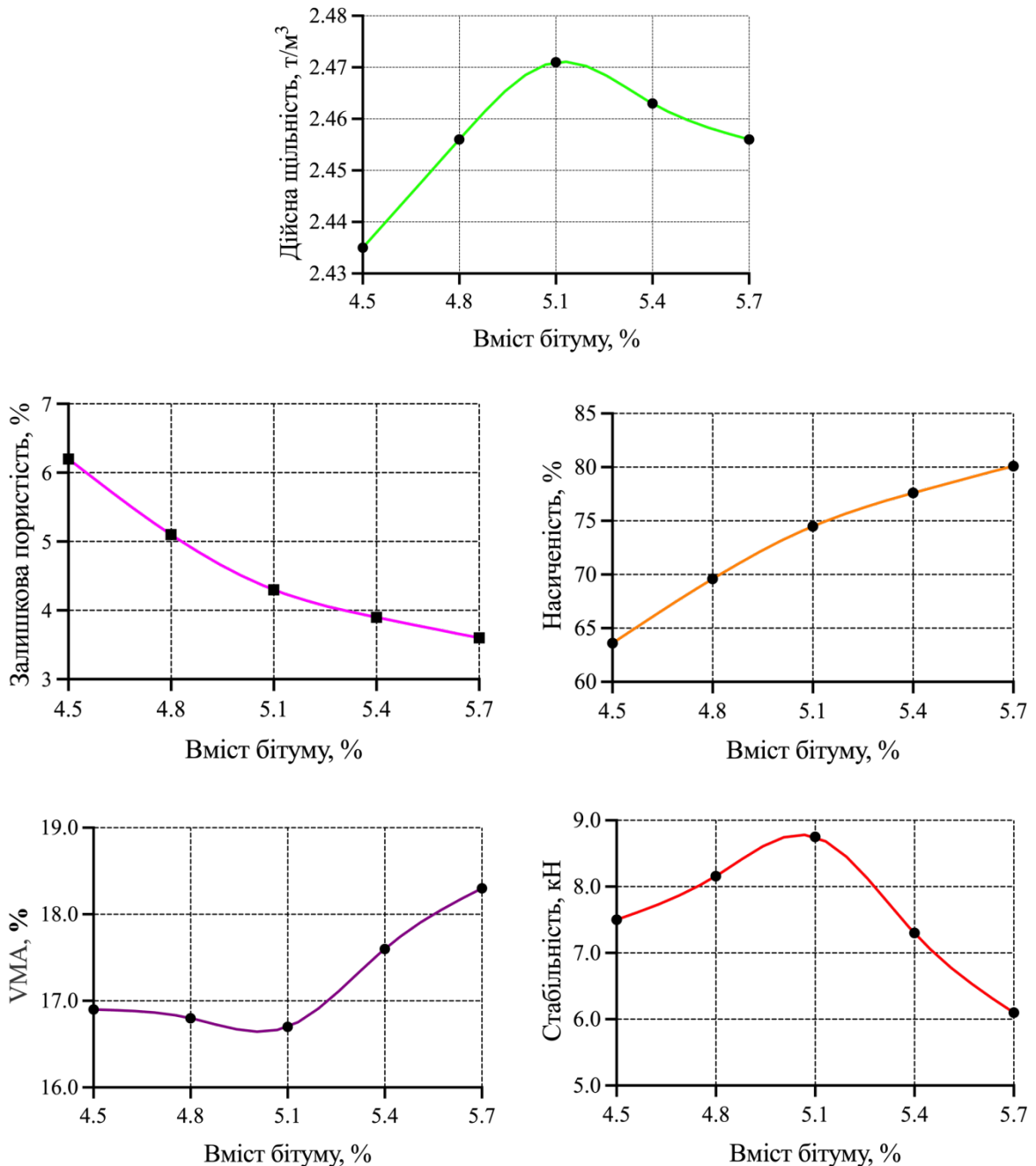


Рисунок 2.5 – Кореляційні криві між фізико-механічними показниками та вмістом бітуму

Відповідно до графіків на рис. 2,5, на яких встановлені залежності між вмістом бітуму та залишковою пористістю, стабільністю, осіданням, пористістю мінеральної частини, насиченням асфальтобетону, середньою щільністю, а також врахуванням діапазону вмісту бітуму, що відповідає технічним вимогам до асфальтобетону, визначаємо межі оптимального вмісту бітуму $ОВБ_{\min} = 4.82\%$ та $ОВБ_{\max} = 5,16\%$. Початкове значення $ОВБ_2$

оптимального вмісту бітуму можна отримати з формули (2.2).

$$ОВБ_2 = \frac{ОВБ_{min} + ОВБ_{max}}{2}, \quad (2.2)$$

$$\text{Після розрахунку, } ОВБ_2 = \frac{4,82\% + 5,16\%}{2} = 4,99\%.$$

Нарешті, оптимальне значення вмісту бітуму ОВБ розраховується за формулою (2.3).

$$ОВБ = \frac{ОВБ_1 + ОВБ_2}{2}, \quad (2.3)$$

$$\text{Після розрахунку, } ОВБ = \frac{5,07\% + 4,99\%}{2} = 5,03\%.$$

Відповідно до карти кліматичного районування Китаю, провінція Ганьсу має спекотне літо, холодну зиму і загалом посушливі умови з низькою річною температурою. Для підвищення довговічності асфальтобетонного покриття в даних умовах оптимальне значення вмісту бітуму, яке вибране для виготовлення зразків з асфальтобетону, становить ОВБ=5,1 %.

Методика визначення складу асфальтобетону АС – 16 виконувалась аналогічно. Результати визначення зернового складу заповнювача представлені в табл. 2.15, а результати випробування за методом Маршалла наведені в табл. 2.16.

Таблиця 2.15 – Результати проєктування асфальтобетону АС–16

| Показники | Розмір комірок сита, мм | | | | | | | | | | |
|--------------------|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | 19 | 16 | 13.2 | 9.5 | 4.75 | 2.36 | 1.18 | 0.8 | 0.3 | 0.15 | 0.075 |
| | Відсоток проходження, % | | | | | | | | | | |
| Верхня межа | 100 | 100 | 92 | 80 | 62 | 48 | 36 | 26 | 18 | 14 | 8 |
| Нижня межа | 100 | 90 | 76 | 60 | 34 | 20 | 13 | 9 | 7 | 5 | 4 |
| Середнє значення | 100 | 95 | 84 | 70 | 48 | 34 | 24.5 | 17.5 | 12.5 | 9.5 | 6 |
| Оптимальна фракція | 100.0 | 95.0 | 87.2 | 70.2 | 52.5 | 34.4 | 24.9 | 16.3 | 11.1 | 8.8 | 6.8 |

Аналогічно, визначено оптимальний вміст бітуму для асфальтобетону АС – 16, який становить 4,5 %.

Таблиця 2.16 – Результати випробування асфальтобетону АС–16 за Маршаллом

| Характеристики асфальтобетону | Вміст бітуму, % | | | | | Технічна вимога |
|--|-----------------|-------|-------|-------|-------|-----------------|
| | 3.9 | 4.2 | 4.5 | 4.8 | 5.1 | |
| Середня щільність, т/м ³ | 2.435 | 2.456 | 2.473 | 2.477 | 2.48 | – |
| Дійсна щільність, т/м ³ | 2.586 | 2.578 | 2.57 | 2.562 | 2.554 | – |
| Залишкова пористість, % | 5.0 | 4.4 | 4.2 | 4.1 | 3.7 | 3~5 |
| VMA(пористість мінеральної частини), % | 14.9 | 15.2 | 15.9 | 15.8 | 16.8 | ≥13 |
| Насиченість, % | 66.3 | 70.9 | 73.6 | 74.0 | 77.8 | 65~75 |
| Стабільність, кН | 8.98 | 9.34 | 10.0 | 9.38 | 9.32 | ≥8 |
| Осідання (умовна пластичність), мм | 2.59 | 3.16 | 3.42 | 3.55 | 3.61 | 1.5~4.4 |

2.3 Визначення властивостей асфальтобетону

Підібравши склад асфальтобетону АС – 13 та АС – 16, виготовивши відповідні зразки, проводимо випробування для оцінки основних експлуатаційних властивостей, які в подальшому будуть використані для оцінки і порівняння впливу протижеледних речовин. Тому, в даному підрозділі наведена методика проведення досліджень з визначення експлуатаційних властивостей еталонних зразків та перевірено на відповідність стандартним вимогам, що в подальшому дає можливість оцінити їх придатність до експлуатації.

2.3.1 Випробування на водостійкість

Для оцінки водостійкості асфальтобетонів АС – 13 і АС – 16 було проведено випробування на занурення у воду за Маршаллом та визначення границі міцності на розтяг при розколюванні. Методика та результати досліджень представлені далі.

1) Випробування на занурення у воду за Маршаллом

Випробування проводилися відповідно до протоколу T0729 – 2011 зі "Стандартних методів випробування бітуму та асфальтобетону для

дорожнього будівництва" (JTG E20 – 2011) [126]. Методика випробування на прикладі асфальтобетону АС–13 виглядає наступним чином. Спочатку формують стандартні зразки відповідно до методу ущільнення за Маршаллом, які мають висоту $(63,5 \pm 1,3)$ мм і діаметр $(101,6 \pm 0,2)$ мм. Процес ущільнення здійснюється по 75 разів у двосторонньому напрямку. Всього за методом Маршалла підготовлюють вісім зразків, розділених на дві групи по чотири зразки. Зразки першої групи занурюють у водяну баню з постійною температурою (60 ± 1) °С на 30 хвилин, а зразки другої групи - на 48 годин. Після термостатування зразки швидко виймають і встановлюють на тестер стабільності Маршалла для випробування, як показано на рис. 2.6. Для проведення дослідження використовувався тестер стабільності Маршалла виробництва компанії «Shanghai Changji Geological Instrument Co., Ltd» марки SYD – 0709A – 100. Випробування проводили при швидкості навантаження (50 ± 5) мм/хв.



Рисунок 2.6 – Тестер стабільності Маршалла

Після випробування за формулою (2.4) розраховували залишкову

стабільність. Результати випробувань представлені в табл. 2.17.

$$MS_0 = \frac{MS_1}{MS} \times 100, \quad (2.4)$$

де MS_0 – залишкова стабільність зразка;

MS_1 – стабільність зразка після занурення у воду на 48 годин (кН);

MS – стабільність зразка після занурення у воду на 30 хв (кН).

Таблиця 2.17 – Результати тесту на занурення у воду за Маршаллом

| Тип асфальтобетону | АС – 13 | АС – 16 |
|---|-----------|-----------|
| Стабільність після занурення у воду на 30 хв, кН | 9.48 | 10.05 |
| Стабільність після занурення у воду на 48 годин, кН | 8.23 | 8.54 |
| Залишкова стабільність, % | 86.81 | 84.98 |
| Технічна вимога, % | ≥ 75 | ≥ 75 |

Наведені в табл. 2.17 значення свідчать, що залишкова стабільність асфальтобетонів АС – 13 та АС – 16 відповідає технічним вимогам.

2) Випробування на визначення границі міцності на розтяг при розколюванні

Випробування асфальтобетону АС – 13 проведено відповідно до Т0729 – 2000 зі "Стандартних методів випробувань бітуму та асфальтобетону для дорожнього будівництва" (JTG E20 – 2011) [126]. Використовуючи методику ущільнення за Маршаллом, виготовляються стандартні зразки висотою $(63,5 \pm 1,3)$ мм і діаметром $(101,6 \pm 0,2)$ мм, які ущільнюють по 50 разів з кожного боку. Виготовлені вісім зразків розподіляють на дві групи по чотири зразки. Другу групу зразків досліджують за наступною методикою:

1). встановлюють тиск у вакуумно-сушильній шафі в межах 97,3 – 98,7 кПа (730 – 740 мм рт. ст.). Зразки витримують протягом 15 хвилин. Згодом, для вирівнювання тиску, відпускають клапан та занурюють зразки у воду на 30 хвилин;

2). кожен зразок з другої групи вкладають у поліетиленові пакети та поливають невеликою кількістю води (приблизно 10 мл), забезпечивши надійну герметизацію. Після чого пакети зі зразками ставлять в морозильну

камеру з регульованою температурою $(-18 \pm 2)^\circ\text{C}$ для заморожування протягом (16 ± 1) годин.

3). після заморожування зразки ставлять у водяну баню при температурі $(60 \pm 1)^\circ\text{C}$, щоб вони термостабілізувалися протягом 24 годин.

Після підготовки зразків другої групи, обидві групи занурюють у водяну баню, з постійною відкаліброваною температурою $(25 \pm 0,5)^\circ\text{C}$, на мінімальну тривалість 2 години. Після виймання зразків з водяної бані, їх поміщають на тестер стабільності Маршалла для визначення міцності на розтяг при розколюванні, як показано на рис. 2.7.



Рисунок 2.7 – Тестер стабільності Маршалла для визначення міцності на розтяг при розколюванні

Коефіцієнт міцності на розтяг при розколюванні (TSR) виводиться за допомогою формул (2.5), (2.6) і (2.7). Результати випробувань представлені в табл. 2.18.

$$R_{T1} = 0.006287 \frac{P_{T1}}{h_1}, \quad (2.5)$$

$$R_{T2} = 0.006287 \frac{P_{T2}}{h_2}, \quad (2.6)$$

$$TSR = \frac{\bar{R}_{T2}}{\bar{R}_{T1}} \times 100, \quad (2.7)$$

де R_{T1} – міцність на розтяг при розколюванні зразка першої групи (МПа);

R_{T2} – міцності на розтяг при розколюванні зразка другої групи (МПа);

P_{T1} – значення руйнівного навантаження для одного зразка першої групи (кН);

P_{T2} – значення випробувального навантаження одного зразка другої групи (кН);

h_1 – висота зразка в першій групі (мм);

h_2 – висота одного зразка другої групи (мм);

\bar{R}_{T1} – середня межа міцності на розтяг при розколюванні зразків першої групи (МПа);

\bar{R}_{T2} – середня межа міцності зразків на розтяг при розколюванні зразків другої групи (МПа);

TSR – коефіцієнт міцності на розтяг при розколюванні (коефіцієнт MPP) (%).

Таблиця 2.18 – Результати випробування міцності на розтяг при розколюванні

| Тип асфальтобетону | АС – 13 | АС – 16 |
|---|-----------|-----------|
| Міцність при розколюванні, МПа | 1.35 | 1.31 |
| Міцність при розколюванні після циклу заморожування-відтавання, МПа | 0.97 | 1.04 |
| Коефіцієнт міцності на розтяг при розколюванні, % | 72.19 | 79.82 |
| Технічна вимога, % | ≥ 70 | ≥ 70 |

Результати випробувань в табл. 2.18 свідчать, що коефіцієнти міцності на розтяг при розколюванні для асфальтобетону марок АС – 13 та АС – 16 відповідають технічним вимогам.

2.3.2 Випробування стійкості асфальтобетонних покриттів до утворення колії

Зразки на визначення стійкості асфальтобетонних покриттів до утворення колії виготовляються з обох складів асфальтобетону відповідно до Т0719 – 2011 "Стандартні методи випробування бітуму та асфальтобетону для дорожнього будівництва" (JTG E20 – 2011) стандартними розмірами 300 мм × 300 мм × 50 мм [126]. Випробування проводили після твердіння протягом 24 годин за допомогою приладу для визначення глибини колії, який показано на рис. 2.8. Для оцінки глибини утворення колії використовується прилад марки SYJMTS, виготовлений Тяньцзіньським заводом випробувальних машин «Meisite». При проведенні даного випробування зразки витримують у високотемпературній шафі протягом 6 годин при температурі 60 °С. Швидкість оціночного колеса двостороннього кочення встановлюється на 42 цикли/хв, а випробувальне навантаження – 0,7 МПа.

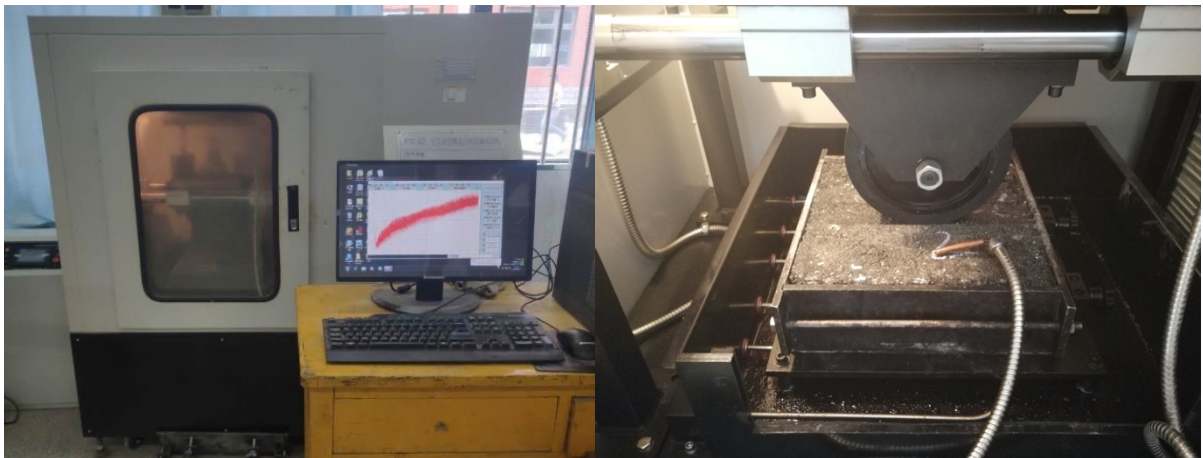


Рисунок 2.8 – Випробування стійкості асфальтобетонних покриттів до утворення колії

Динамічна стабільність визначається за допомогою формули (2.8). Результати оцінки представлені в табл. 2.19.

$$DS = \frac{(t_2 - t_1) \times N}{d_2 - d_1} \times C_1 \times C_2, \quad (2.8)$$

де DS – динамічна стабільність асфальтобетону (разів/мм);

d_1 – величина деформації, що відповідає часу t_1 (45хв) (мм);

d_2 – величина деформації, що відповідає часу t_2 (60 хв) (мм);

C_1, C_2 – коефіцієнти типу випробувального приладу, зазвичай 1.0;

N – кількість зворотно-поступальних обертань випробувального колеса 42 рази /хв.

Таблиця 2.19 – Результати динамічної стабільності

| Тип асфальтобетону | Динамічна стабільність, разів/мм | | | | Технічна вимога |
|--------------------|----------------------------------|------------|------------|------------------|-----------------|
| | Зразок № 1 | Зразок № 2 | Зразок № 3 | Середнє значення | |
| АС-13 | 2309 | 2246 | 2285 | 2280 | ≥ 1000 |
| АС-16 | 2582 | 2679 | 2587 | 2616 | ≥ 1000 |

Результати динамічної стабільності в табл. 2.19 вказують, що асфальтобетони АС – 13 і АС – 16 задовольняють значенням технічних вимог, що свідчить про високу стійкість до утворення колії за підвищених температурних умов.

2.3.3 Випробування на тріщиностійкість при низьких температурах

Для проведення випробування на тріщиностійкість при низьких температурах попередньо виготовляються зразки стандартних розмірів 300 мм × 300 мм × 50 мм. Через 24 години після затвердіння зразки розрізали за допомогою різача по каменю відповідно до схеми, зображеної на рис. 2.9. Спочатку з трьох країв зразка за напрямками А – А, В – В і С – С відрізали шматки по 20 мм, потім послідовно нарізали зразки з 1 по 6. Для охолодження асфальтобетонних зразків та захисту різача від пошкодження під час розрізання потрібно забезпечити безперервний потік води. Нарізані зразки розмірами 250 мм × 30 мм × 35 мм показані на рис. 2.10. Зразки балочок на 4 години поміщають у морозильну камеру з температурою – 10 °С, після чого негайно проводять випробування на згин [126], як показано на (рис. 2.11). Для випробування асфальтобетону на тріщиностійкість при низьких температурах

використовується випробувальна машина марки LWWL, виготовлена компанією «Changsha Yaxing». Відстань між опорами балочки становить 200 мм, а регульована швидкість навантаження - 50 мм/хв.

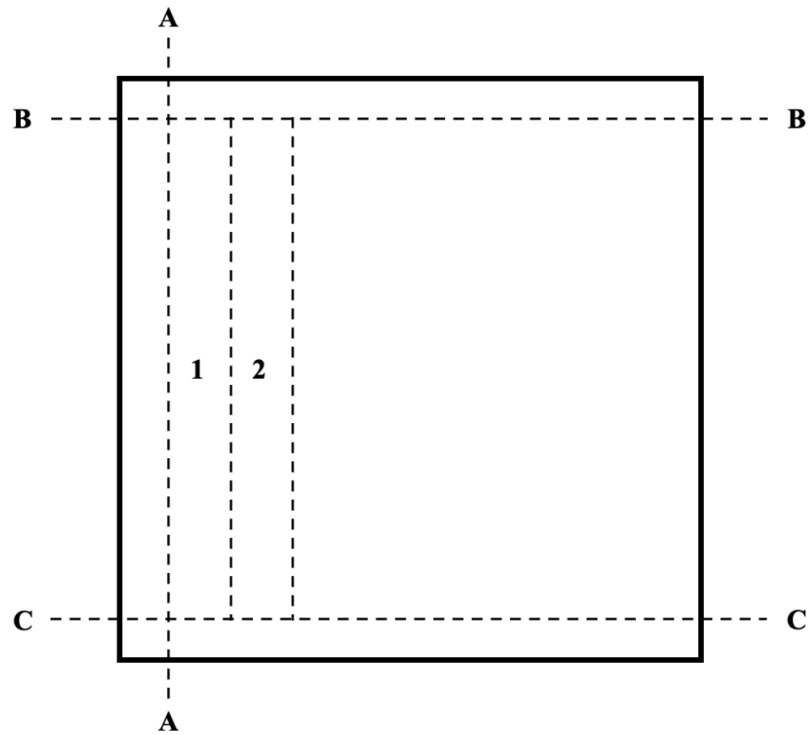


Рисунок 2.9 – Принципова схема розрізки зразків балочок

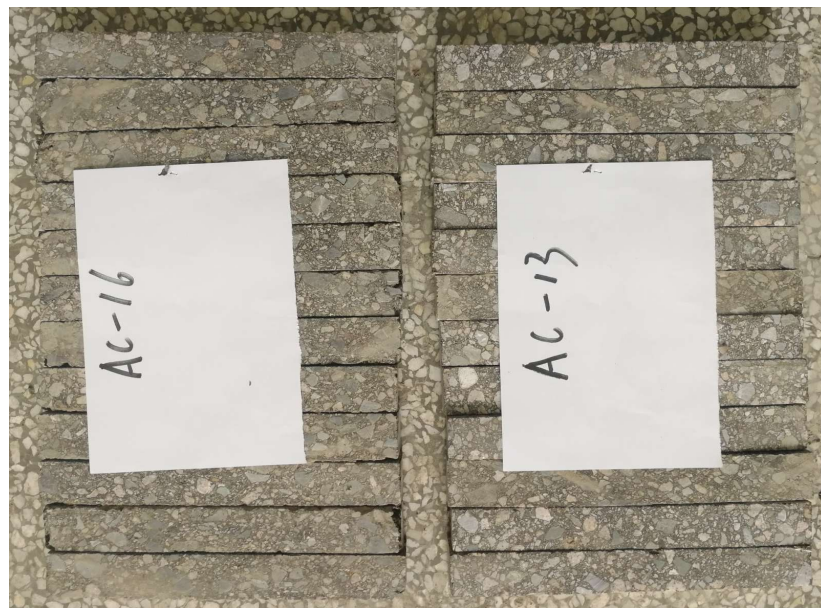


Рисунок 2.10 – Зразки балочок

Результати максимальних деформацій розтягу при згині були визначені

відповідно до протоколу випробувань, використавши формулу 2.9, а результати розрахунків представлені в табл. 2.20.



Рисунок 2.11 – Випробування на тріщиностійкість при низьких температурах

$$\varepsilon_B = \frac{6 \times h \times d}{L^2}, \quad (2.9)$$

де ε_B – максимальні деформацій розтягу при згині (мє);

h – висота зразка (мм);

d – прогин зразка в середині прольоту при руйнуванні (мм);

L – відстань між опорами (мм).

Результати максимальних деформацій розтягу при згині для асфальтобетону АС – 13 та АС – 16, які наведенні в табл. 2.20, відповідають встановленим технічним вимогам та підтверджують їхню високу стійкість до деформацій розтягу при згині в умовах низьких температур.

Таблиця 2.20 – Результати максимальних деформацій розтягу при згині

| Тип асфальтобетону | Деформація розтягу при згині, $\mu\epsilon$ | | | | Технічна вимога |
|--------------------|---|------------|------------|------------------|-----------------|
| | Зразок № 1 | Зразок № 2 | Зразок № 3 | Середнє значення | |
| АС-13 | 3812.5 | 3904.7 | 3859.5 | 3858.9 | ≥ 2300 |
| АС-16 | 3554.7 | 3587.3 | 3561.7 | 3567.9 | ≥ 2300 |

2.3.4 Випробування на визначення залишкової пористості

Залишкова пористість характеризується об'ємним відсотком відкритих пор в ущільненому асфальтобетоні, за винятком пор, які знаходяться в самому заповнювачі або у бітумі.

Дане дослідження проходить наступним чином. Спочатку формують стандартні зразки, відповідно до методу ущільнення за Маршаллом. Вони мають висоту $(63,5 \pm 1,3)$ мм та діаметр $(101,6 \pm 0,2)$ мм. Ущільнення здійснюється по 75 разів у двосторонньому напрямку. Далі зважують масу (m_a) зразка в сухому стані. Потім занурюють зразок у воду до повного насичення, після чого зважують його масу (m_w) у воді в насиченому стані. Потім обережно його виймали, витирали поверхню вологою ганчіркою, щоб видалити залишки води, а після чого зважували та записували кінцеву масу (m_f) [126].

Дійсна щільність асфальтобетону означає його максимальну щільність, коли зразок гіпотетично ущільнюється до повністю щільного, або безпорожнинного стану. Існує два основних методи визначення дійсної щільності: дослідний та розрахунковий. Дослідний в свою чергу поділяється на вакуумний метод та метод за допомогою розчинника.

Ми визначили дійсну щільність за допомогою розрахункового методу, яка становить 2469 кг/м^3 для АС – 13 і 2570 кг/м^3 для АС – 16.

Залишкова пористість визначається за допомогою формул (2.10) і (2.11). Результати розрахунків представлені в табл. 2.21.

$$\gamma_f = \frac{m_a}{m_f - m_w}, \quad (2.10)$$

$$VV = \left(1 - \frac{\gamma_f}{\gamma_t}\right) \times 100, \quad (2.11)$$

де VV – залишкова пористість зразка (%);

γ_f – середня щільність зразка (кг/м³);

γ_t – дійсна щільність асфальтобетону (кг/м³);

m_a – маса сухого зразка (кг);

m_w – маса зразка у воді (кг);

m_f – маса насиченого зразка (кг).

Таблиця 2.21 – Результат визначення залишкової пористості

| Тип асфальтобетону | Залишкова пористість, % | | | | Технічна вимога |
|--------------------|-------------------------|------------|------------|------------------|-----------------|
| | Зразок № 1 | Зразок № 2 | Зразок № 3 | Середнє значення | |
| АС-13 | 4.48 | 4.53 | 4.52 | 4.51 | 3–5 |
| АС-16 | 4.20 | 4.25 | 4.24 | 4.23 | 3–5 |

Значення залишкової пористості асфальтобетонних зразків АС – 13 і АС – 16 в табл. 2.21 знаходяться в межах від 3 % до 5 %, що відповідають встановленим вимогам.

2.4 Методологія аналізу ентропії сірої кореляції для аналізу значущості факторів впливу

У 1982 році професор Денг Джулонг (Deng Ju-Long) представив теорію сірих систем (Grey System Theory) [129], нову теорію інженерних систем, яка пристосована для роботи з системами з обмеженою інформацією. За останні три десятиліття її застосування поширилося в різних галузях науки. Спеціалізованою підгалуззю цієї теорії є аналіз ентропії сірої кореляції, який полегшує системний аналіз даних для дослідження в умовах неповної інформації, тим самим визначаючи основні та другорядні фактори впливу. Основна передумова такого аналізу ґрунтується на схожості напрямків геометричних форм факторних кривих для вимірювання рівня кореляції. Більш тісний напрямок розвитку означає більший ступінь кореляції, і навпаки. Алгоритм аналізу ентропії кореляції Грея охоплює: визначення базової послідовності, ідентифікацію послідовності порівняння, обробку початкових значень послідовності, визначення абсолютної різниці послідовностей, встановлення коефіцієнта кореляції і, нарешті, розрахунок ступеня кореляції. Детальна методологія описана нижче:

1. Параметри індексу оцінки кожної альтернативи складаються в порівняльний рядок:

$$\{X_i(m)\} = \{X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(n)\}, \quad (2.12)$$

Запишемо рівняння (2.12) в розгорнутому вигляді, щоб отримати послідовність порівняння кожної схеми:

$$\begin{bmatrix} X_1(1) & X_1(2) & \dots & X_1(n) \\ X_2(1) & X_2(2) & \dots & X_2(n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_m(1) & X_m(2) & \dots & X_m(n) \end{bmatrix}, \quad (2.13)$$

2. Найкраще значення оціночного індексу кожної альтернативної схеми склали в еталонний ряд:

$$\{X_o(m)\} = \{X_o(1), X_o(2), \dots, X_o(n)\}, \quad (2.14)$$

Визначивши максимальне або мінімальне значення як найкраще за

конкретними показниками, а саме

$$\{X_o(m)\} = \min\{X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(n)\}, \quad (2.15)$$

$$\text{або } \{X_o(m)\} = \max\{X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(n)\}, \quad (2.16)$$

3. Обробка початкових значень, тобто метод ділення перших даних ряду на всі дані ряду для отримання нового ряду. Мета цього методу - зробити всі фактори ряду однорідними, еквівалентними, нормалізованими та безрозмірними.

4. Побудувати кореляційну дискретну функцію $\{\xi_{0i}(k)\}$ для визначення ступеня зв'язку множини послідовностей порівняння $\{X_i(m)\}$ з еталонною послідовністю $\{X_o(m)\}$:

$$\xi_{0i}(k) = \frac{\Delta_{min} + \rho \Delta_{max}}{\Delta_{0i}(k) + \rho \Delta_{max}}, \quad (2.17)$$

де $\Delta_{0i}(k)$ позначає близькість між точками даних послідовності порівняння $\{X_i(m)\}$ та еталонної послідовності $\{X_o(m)\}$. При обчисленні абсолютної різниці для $\Delta_{0i}(k)$ встановлюється наступна залежність:

$$\Delta_{0i}(k) = |X_i(k) - X_o(k)|, \quad (2.18)$$

Δ_{min} — мінімальний діапазон, тобто:

$$\Delta_{min} = \min_i \min_k \{\Delta_{0i}(k)\}, \quad (2.19)$$

Δ_{max} — максимальна діапазон, тобто:

$$\Delta_{max} = \max \max \{\Delta_{0i}(k)\}, \quad (2.20)$$

ρ — коефіцієнт роздільної здатності, з діапазоном $\rho \in [0,1]$, зазвичай $\rho = 0,5$.

5. Визначити коефіцієнт сірої кореляції, який позначається як $\xi_{0i}(k)$. Відносна різниця між послідовністю порівняння та еталонною послідовністю на m -му елементі після обробки початкового значення називається коефіцієнтом кореляції. Він обчислюється на основі рівнянь (2.17) – (2.20):

$$\xi_{0i}(k) = \frac{\Delta_{min} + \rho \Delta_{max}}{\Delta_{0i}(k) + \rho \Delta_{max}} = \frac{\min_i \min_k |X_i(k) - X_o(k)| + \rho \max_i \max_k |X_i(k) - X_o(k)|}{|X_i(k) - X_o(k)| + \rho \max_i \max_k |X_i(k) - X_o(k)|}, \quad (2.21)$$

6. Нехай x – множина сірих кореляційних факторів. У цій множині $x_0 \in$

x слугує стовпчиком первинної поведінки, тоді як $x_j \in x$ з $j = 1, 2, \dots, m$ функціонує як опорний стовпчик. $\varepsilon_j = |r(x_0(k), x_j(k))|$, $k = 1, 2, \dots, n$, відображення можна представити у вигляді: $\varepsilon_j \rightarrow p_j$. Тут значення p_h у відображенні розподілу коефіцієнта кореляції відповідає значенню щільності цього розподілу. Математично це виражається так:

$$p_h = \varepsilon_h / \sum_1^n \varepsilon_h, \quad (2.22)$$

Також виконуються наступні умови: $\sum p_h = 1, p_h \in p_j, h = 1, 2, 3, \dots, n$.

7. Для визначення ступеня сірої кореляції розглянемо вектор $p = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_i)$. Цей вектор задовольняє умовам: $p_i \geq 0$, а сума $\sum p_i = 1$. З огляду на це, функція

$$H(R_j) \triangleq - \sum_{h=1}^n p_h \ln p_h, \quad (2.23)$$

є сірою кореляційною ентропією x_j , а її ступінь кореляції з сірою ентропією дорівнює:

$$E_r(X_j) \triangleq H(R_j) / H_m, \quad (2.24)$$

де $H_m(x) = \ln p$ – максимальна ентропія;

$E_r(X_j)$ – ступінь кореляції сірої ентропії.

Розраховували ступінь кореляції сірої ентропії за формулою (2.24) та проранжували її. Чим більше значення $E_r(X_j)$, тим більш значущим є цей фактор впливу.

2.5 Висновки до розділу 2

1. Встановлені фактичні значення температури при промерзанні асфальтобетонного дорожнього покриття на території Північно-Західного Китаю та експериментально визначенні точки замерзання протиожеледних речовин різної концентрації.

2. Визначені основні технічні показники та властивості для матеріалів, які використовуються при проведенні експериментальних досліджень, зокрема бітуму, технічної солі, карбаміду, технічного спирту, мінерального порошку, крупного та дрібного заповнювача. Властивості зазначених матеріалів відповідають вимогам стандартів.

3. Відповідно до розглянутої методології проєктування асфальтобетонних сумішей на мінеральних заповнювачах, використавши розрахунковий підхід до визначення оптимального вмісту бітуму, розрахований склад асфальтобетону АС – 13 та АС – 16 для виготовлення експериментальних зразків.

4. Проведені випробування асфальтобетонних зразків АС – 13 та АС – 16 на водостійкість, стійкість до утворення колії, тріщиностійкість при низьких температурах, залишкову пористість визначені показники властивостей відповідають вимогам стандарту.

РОЗДІЛ 3

ВПЛИВ ПРОТИОЖЕЛЕДНИХ РЕЧОВИН НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСФАЛЬТОБЕТОНУ В УМОВАХ ЦИКЛІВ ПОПЕРЕМІННОГО НАСИЧЕННЯ ТА ЗНЕВОДНЕННЯ

3.1 Методика підготовки зразків для визначення впливу протиожеледних речовин на експлуатаційні характеристики асфальтобетону

Для циклу поперемінного насичення та висушування, як розчини, були підготовлені такі протиожеледні речовини: 15 % розчин сечовини ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$), 20 % розчин промислової солі (NaCl) і 20 % розчин спирту ($\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$). Враховуючи летючу природу $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$, розчин $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ готували повторно для кожного циклу, а розчини $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ і NaCl - один раз для трьох циклів. Для випробування на визначення глибини колії, зразки за Маршаллом та зразки балочок з асфальтобетону АС – 13 і АС – 16 піддавались поперемінному насиченню та висушуванню. Методика проведення комплексного дослідження впливу протиожеледних речовин на експлуатаційні властивості асфальтобетону в умовах поперемінного насичення-зневоднення полягає в наступному. На першому етапі зразки асфальтобетону АС – 13 і АС – 16 для насичення занурювали в розчини протиожеледних речовин на $(24 \pm 0,5)$ години, як показано на рис. 3.1;

Наступний етап полягав в тому, що після насичення зразки діставали з розчину та витримували при кімнатній температурі $(20 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ на повітрі протягом $(24 \pm 0,5)$ годин, як показано на рис. 3.2.

Вищеописаний процес є повним циклом поперемінного насичення та зневоднення для дослідження впливу протиожеледних речовин на експлуатаційні властивості асфальтобетону. Випробування зразків проводили після проходження кожних 5 циклів насичення-зневоднення відповідно при 5, 10, 15, 20, 25 і 30 циклах [3], [5]. Дослідження включають випробування на

занурення у воду за Маршаллом, стійкість асфальтобетонних покриттів до утворення колії та тріщиностійкість при низьких температурах, які відповідають стандарту "Стандартні методи випробування бітуму та асфальтобетону для дорожнього будівництва" (JTG E20 – 2011) [126].



Рисунок 3.1 – Зразки, занурені в розчини протижеледних речовин



Рисунок 3.2 – Зразки, розміщені на повітрі при кімнатній температурі
($20 \pm 0,5$) °C

3.2 Вплив протижеледних речовин на водостійкість асфальтобетону

Для визначення впливу протижеледних речовин на водостійкість асфальтобетонних покриттів були проведенні дослідження за Маршаллом. Після проведення досліджень та виконаних розрахунків отримали залежності залишкової стабільності та швидкості втрати залишкової стабільності, залежно від кількості циклів насичення-зневоднення.

Рис. 3.3 ілюструє залишкову стабільність і відповідну втрату залишкової стабільності при поперемінному насиченні та зневодненні для асфальтобетону АС – 13.

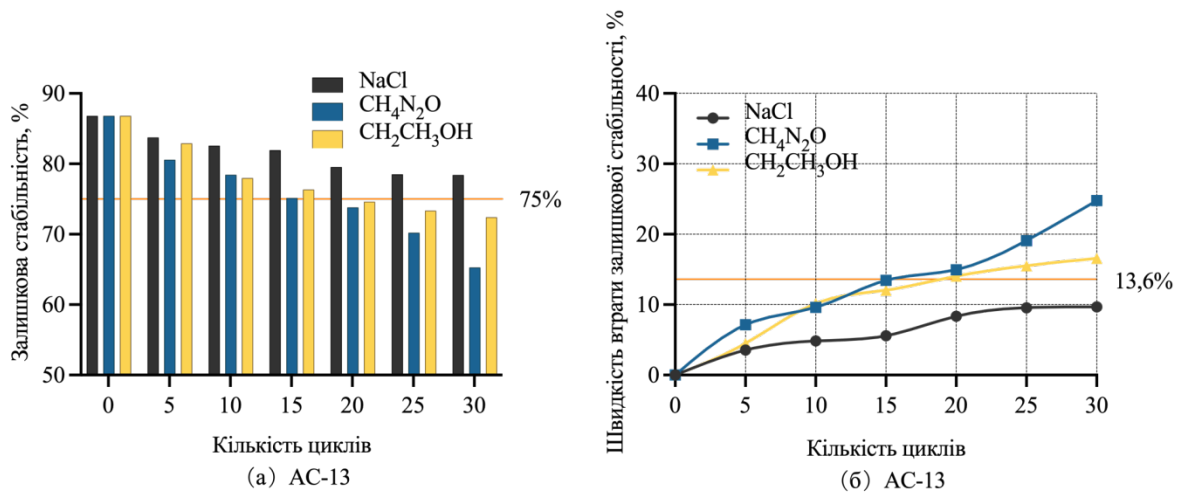


Рисунок 3.3 – Залежності впливу протижеледних речовин на показники водостійкості для АС – 13

З рис. 3.3 (а) видно, що для асфальтобетону АС – 13 залишкова стабільність при впливі всіх трьох протижеледних речовин послідовно зменшується зі збільшенням кількості циклів насичення-зневоднення. Вплив CH₄N₂O і CH₂CH₃OH на залишкову стабільність для перших 15 циклів насичення-зневоднення є допустимим, проте після 20, 25 та 30 циклів залишкова стабільність під впливом CH₄N₂O різко знижується. Після 20 циклу залишкова стабільність під впливом CH₄N₂O і CH₂CH₃OH становить 73,8 % і

74,6 %, що не відповідає мінімально допустимому рівню 75 % [127], передбаченому чинними рекомендаціями. І навпаки, протягом 30 циклів залишкова стабільність при впливі NaCl не знижується менше граничного значення 75%, як того вимагають чинні стандарти. Як показано на рис. 3.3 (б), протягом усіх циклів насичення-зневоднення зразків асфальтобетону у розчині NaCl, швидкість втрати залишкової стабільності буде найменшою та не буде перевищувати 10 %.

Залишкову стабільність і відповідну втрату залишкової стабільності при поперемінному насиченні та зневодненні для асфальтобетону АС – 16 ілюструє рис. 3.4.

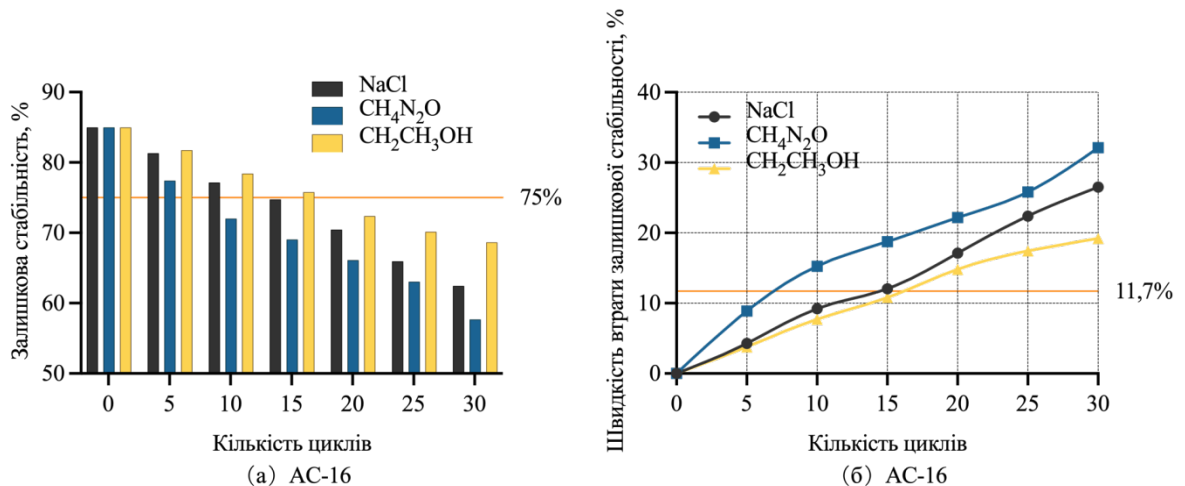


Рисунок 3.4 – Залежності впливу протиожеледних речовин на показники водостійкості для АС – 16

З рис. 3.4 видно, що зі збільшенням кількості циклів насичення-зневоднення для асфальтобетону АС – 16 залишкова стабільність, пов'язана з кожною протиожиледною речовиною, має тенденцію зниження. Як видно з рис. 3.4 (а), CH₂CH₃OH має найменший вплив на залишкову стабільність, за ним слідує NaCl. Найзначніший вплив протягом усього діапазону циклів насичення-зневоднення має CH₄N₂O. При перших 20 циклах NaCl і CH₂CH₃OH демонструють майже однаковий вплив на залишкову

стабільність, однак після 25 і 30 циклів стабільність під впливом $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ стрімко знижується. Згідно вимог, залишкова стабільність має становити не менше 75 %. Під час проведення досліджень встановлено, що залишкова стабільність при дії $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ після 10-ти циклів знижується до 72,0 %, для NaCl після 15 циклів - до 74,7 % і $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ після 20 циклів - до 72,4 %.

Порівнюючи рис. 3.3 (а) з рис. 3.4 (а), встановлено, що втрата залишкової стабільності для зразків з асфальтобетону АС-16 дещо більша, ніж у АС - 13. В порівнянні з іншими речовинами, для обох типів асфальтобетонів найбільшої шкоди завдає $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$. Також встановлено, що NaCl має найменший вплив на АС - 13, а $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ - на АС - 16.

3.3 Вплив протижеледних речовин на стійкість асфальтобетону при високих температурах

Для визначення впливу протижеледних речовин на стійкість асфальтобетонних покриттів при високих температурах були проведені дослідження стійкості асфальтобетонних покриттів до утворення колії. Після проведення досліджень та виконаних розрахунків були отримані залежності динамічної стабільності та швидкості втрати динамічної стабільності, залежно від кількості циклів насичення-зневоднення. Графіки встановлених залежностей для асфальтобетону АС - 13 зображені на рис. 3.5.

На рис. 3.5 показано тенденцію до зниження динамічної стабільності та швидкості втрати динамічної стабільності для асфальтобетону АС - 13 при дії трьох протижеледних речовин, залежно від кількості насичених-зневоднених циклів. З цих протижеледних речовин найменший вплив на динамічну стабільність має NaCl , наступна - $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$. Найбільш виражений вплив на показники стійкості спостерігається від $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$. Швидкість втрати динамічної стабільності після 30 циклів насичення-зневоднення у розчині NaCl становить 4,9 %. Для порівняння, вплив $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ і $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ цей показник становить 16,0 % і 23,1 %, відповідно.

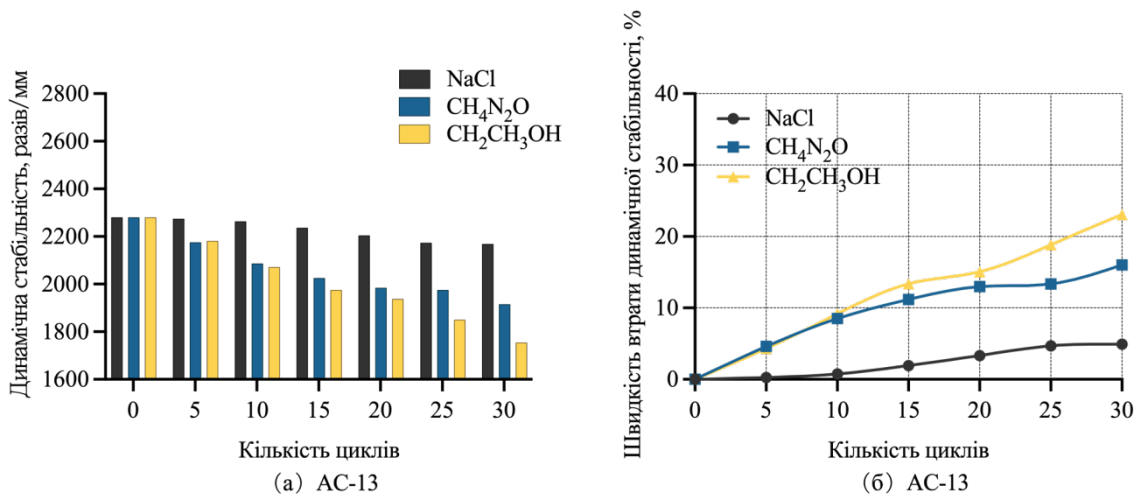


Рисунок 3.5 – Залежності впливу протижеледних речовин на показники стійкості при високих температурах для АС – 13

Відповідно до вимог встановлених у чинних стандартах [127] показник динамічної стабільності має бути більше за 1000 разів/мм. З залежностей на рис. 3.5 значення динамічної стабільності при впливі NaCl, CH₄N₂O і CH₂CH₃OH були зафіксовані на рівні 2168 разів/мм, 1915 разів/мм і 1754 разів/мм, що відповідає вимогам.

Аналогічні дослідження були проведенні для асфальтобетону АС – 16. Графіки встановлених залежностей динамічної стабільності та швидкості втрати динамічної стабільності залежно від кількості циклів насичення-зневоднення для асфальтобетону АС – 16 зображені на рис. 3.6.

Як показано на рис. 3.6, для асфальтобетону АС – 16 спостерігається помітне зниження динамічної стабільності при збільшенні кількості насичених-зневоднених циклів, що пов'язано з впливом трьох різних протижеледних речовин. Найменший вплив на динамічну стійкість має NaCl, трохи більший - CH₄N₂O, тоді як CH₂CH₃OH - найбільш виражений. Швидкість втрати динамічної стабільності після 30 циклів у CH₂CH₃OH становить 37,2 %, що відповідно значно вище, ніж у розчинах NaCl та CH₄N₂O – 19,1 % та 15,0 %. Найнижчі показники динамічної стабільності при впливі

NaCl, $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ і $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ становили відповідно 2117 разів/мм, 2223 рази/мм і 1644 рази/мм. Це перевищує встановлене стандартом мінімальне значення 1000 разів/мм.

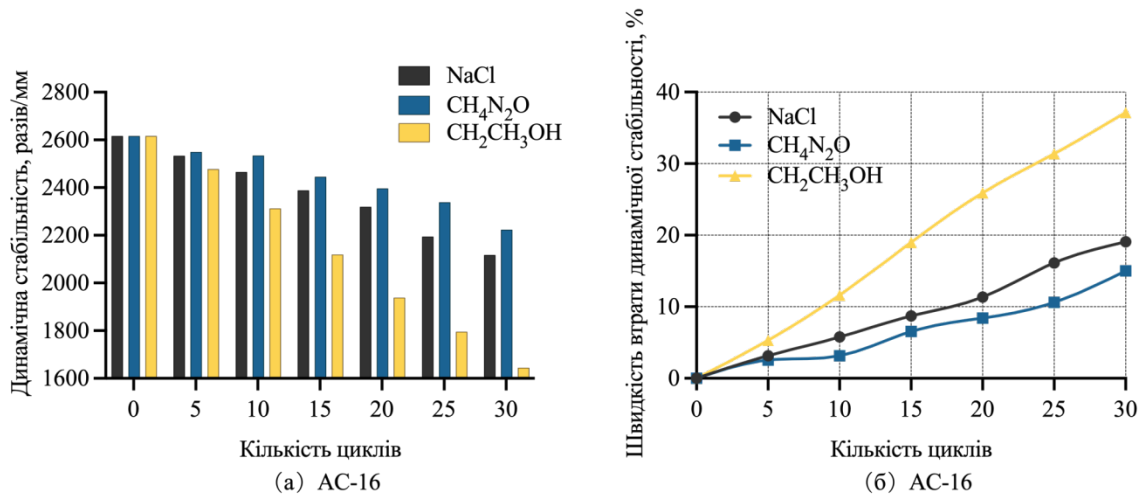


Рисунок 3.6 – Залежності впливу протижеледних речовин на показники стійкості при високих температурах для АС – 16

При сумісному аналізі рис. 3.5 (б) і рис. 3.6 (б) помітна різниця в швидкості зниження динамічної стабільності для АС – 16 порівняно з АС – 13. Це свідчить, що застосовані розчини протижеледних речовин мають більш суттєвий вплив на стійкість при високих температурах асфальтобетону АС – 16 порівняно з АС – 13.

3.4 Вплив протижеледних речовин на тріщиностійкість при низьких температурах

Поведінка асфальтобетону при низьких температурах є особливо важливою характеристикою дорожнього покриття, особливо в районах низькотемпературного та посушливого клімату Північно-Західного Китаю. Такі фактори, як вміст бітуму, фракційність та однорідність асфальтобетону, значно впливають на його здатність витримувати низькотемпературні деформації. Враховуючи те, що експлуатаційні випробування двох складів

асфальтобетонів були проведені в розділі 2, обидва відповідали зазначеним стандартам, відповідно дані дослідження спрямовані на експериментальний аналіз низькотемпературних властивостей асфальтобетону в умовах насичених-зневоднених циклів [4].

Вплив протижеледних речовин на тріщиностійкість при низьких температурах характеризується деформацією розтягу при згині та швидкістю втрати деформації розтягу при згині.

Графіки встановлених залежностей деформації розтягу при згині та швидкості втрати деформації розтягу при згині, залежно від кількості циклів насичення-зневоднення для асфальтобетону АС – 13, зображені на рис. 3.7.

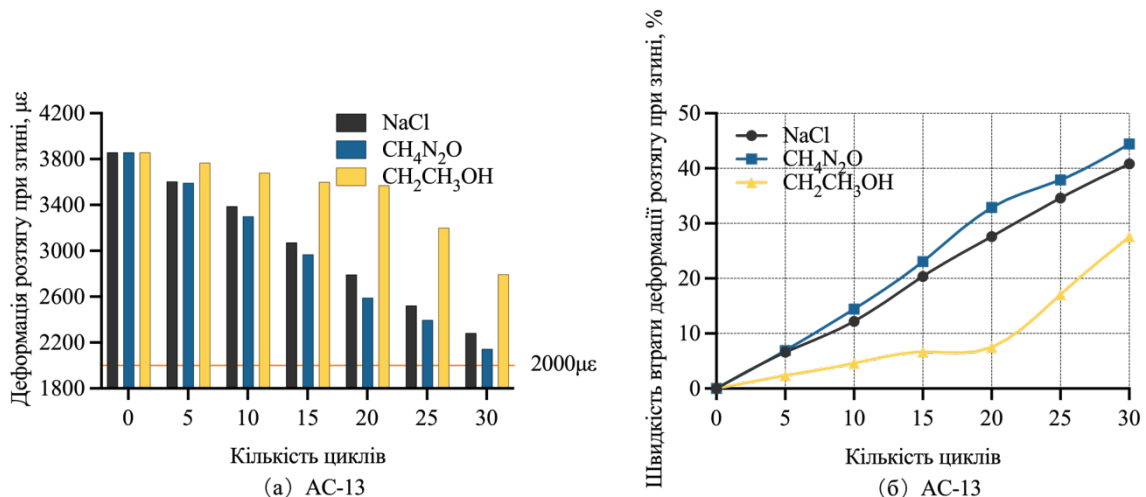


Рисунок 3.7 – Залежності впливу протижеледних речовин на показники тріщиностійкості для АС – 13 при насичених-зневоднених циклах

З рис. 3.7 (а) видно, що для асфальтобетону АС – 13 деформації розтягу при згині зменшуються зі збільшенням кількості насичено-зневоднених циклів за рахунок впливу протижеледних речовин. Серед протижеледних речовин $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ має мінімальний вплив на деформацію розтягу при згині, тоді як $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ і NaCl - більш виражений. Тим не менше, найнижчі значення деформації розтягу при згині для всіх трьох протижеледних розчинів перевищують встановлений мінімальний поріг 2000 μm [127]. Як видно з

рис. 3.7 (б), протягом перших 20 насичено-зневоднених циклів, швидкість втрати деформації розтягу при згині, пов'язаної з впливом $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$, поступово зростає до 10 %. Однак після 25 циклу відбувається значне збільшення швидкості втрати деформації розтягу при згині, досягаючи після 30 циклів 27,6 %. На противагу цьому, рівень втрат для NaCl і $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ є відносно стабільним, після 30 циклу становить відповідно 40,8 % і 44,4 %.

Антологічні залежності були встановлені для асфальтобетону АС – 16. Рис. 3.8 наглядно ілюструє деформацію розтягу при згині і пов'язану з нею швидкість втрати деформації розтягу при згині після 30 насичено-зневоднених циклів. Дані залежності є основними критеріями для оцінки впливу поперемінного насичення і зневоднення в розчинах протиожеледних речовин на тріщиностійкість при низьких температурах.

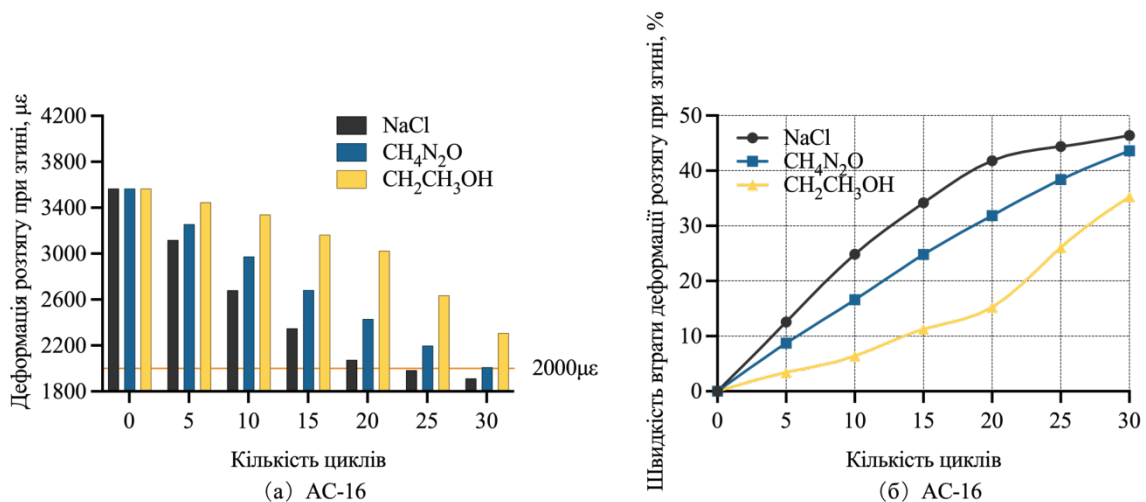


Рисунок 3.8 – Залежності впливу протиожеледних речовин на показники тріщиностійкості для АС – 13 при насичених-зневоднених циклах

З рис. 3.8 (а) видно, що зі збільшенням кількості насичено-зневоднених циклів в розчинах протиожеледних речовин деформація розтягу при згині для асфальтобетону АС – 16 зменшується. Найменший вплив на деформацію розтягу при згині має $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$, тоді як $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ і NaCl - більш суттєвий. Встановлено, що на 25 циклі деформація розтягу при згині для NaCl

фіксується на рівні 1984,2 $\mu\epsilon$, що не задовольняє встановленому мінімальному порогу 2000 $\mu\epsilon$. Проаналізувавши рис. 3.8 (б), спостерігаємо повільне зростання швидкості втрати деформації при впливі $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ до 20 циклів. Далі швидкість втрати деформації після 30 циклів зростає і досягає 35,3 %. І навпаки, при впливі NaCl швидкість втрати деформації починається зі швидкого зростання, потім сповільнюється, а після 30 циклів досягає максимального значення 46,4 %. Тоді, як швидкість втрати деформацій при насиченні та зневодненні у розчині $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ до кінця 30 циклу залишається відносно постійною та становить 43,6 %.

3.5 Аналіз впливу основних факторів на властивості асфальтобетону при насиченні та зневодненні у розчинах протижеледних речовин

Для оцінки впливу основних факторів, а саме типу асфальтобетону, виду протижеледної речовини, кількості насичено-зневоднених циклів на водостійкість асфальтобетону, використовувався кореляційний аналіз сірої ентропії. За допомогою даного аналізу встановили вплив кожного з факторів на водостійкість асфальтобетону. Для більш простого та інтуїтивного представлення ступеня кореляції між кожним фактором впливу на водостійкість асфальтобетону, результати розрахунків зображені у вигляді гістограми, (рис. 3.9). Основною характеристикою для оцінки впливу протижеледних речовин на водостійкість асфальтобетону є залишкова стабільність.

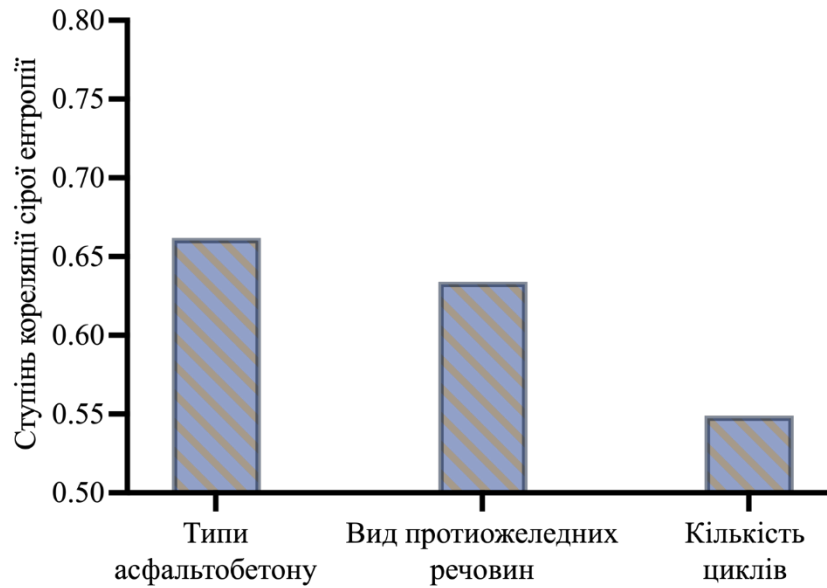


Рисунок 3.9 – Вплив основних факторів на залишкову стабільність

Як видно з рис. 3.9, на залишкову стабільність, а відповідно і водостійкість, найбільше впливає тип асфальтобетону, який залежить від зернового складу заповнювача та вмісту бітуму. Також, але в меншій мірі, впливає вид протиожеледної речовини.

Використовуючи методологію аналізу ентропії сірої кореляції, проводиться детальний аналіз взаємозв'язку між типом асфальтобетону, видом протиожеледної речовини та кількістю циклів насичення-зневоднення на динамічну стабільність асфальтобетону. Це дозволило визначити ступінь кореляції між кожним фактором впливу на показники високотемпературних характеристик. Для більш наочного та інтуїтивного представлення ступеня кореляції між кожним фактором впливу на високотемпературні характеристики асфальтобетону, результати розрахунків відображені у вигляді стовпчикової діаграми (рис. 3.10). Оцінка впливу протиожеледних речовин на високотемпературні характеристики асфальтобетону проводилась за динамічною стабільністю.

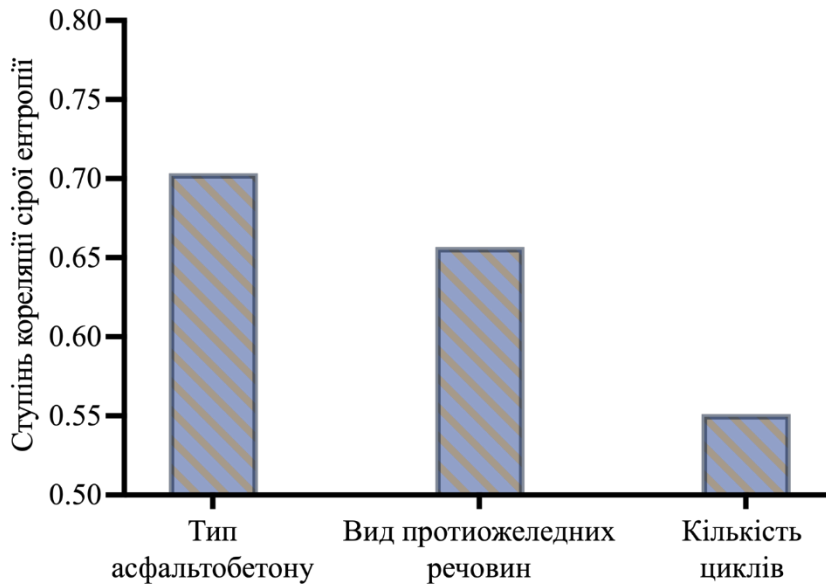


Рисунок 3.10 – Вплив основних факторів на динамічну стабільність

Рис. 3.10 відображає ступінь кореляції між основними факторами та динамічною стабільністю. Фактори розташовані в порядку зменшення впливу протиожеледних речовин на динамічну стабільність в умовах насичено-зневоднених циклів наступним чином: тип асфальтобетону, вид протиожеледної речовини та кількість циклів.

З метою встановлення ступеня кореляції аналогічно був проведений аналіз впливу основних факторів на показники низькотемпературних характеристик асфальтобетону. Для більш простого та інтуїтивного представлення ступеня кореляції між основними факторами впливу на низькотемпературні характеристики асфальтобетону, результати розрахунків були проілюстровані за допомогою гістограм (рис. 3.11). Оцінка впливу протиожеледних речовин на низькотемпературні характеристики асфальтобетону проводилась за деформацією розтягу при згині.

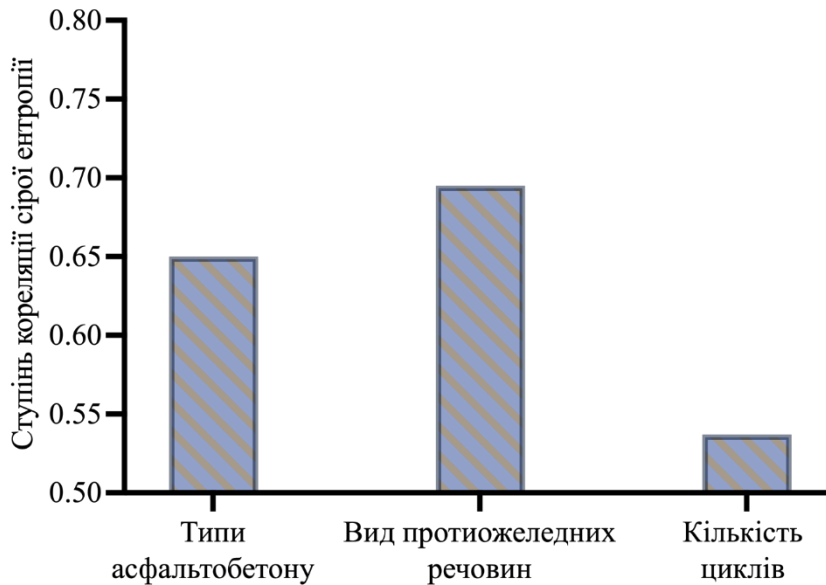


Рисунок 3.11 – Вплив основних факторів на деформацію розтягу при згині

Проаналізувавши рис. 3.11, встановили, що на деформацію розтягу при згині найбільше впливає вид протижеледної речовини. Тип асфальтобетону має менший вплив на низькотемпературні характеристики.

За рахунок проведення однакової кількості дослідів для всіх протижеледних речовин, кількість циклів виявилася найменш впливовим фактором.

3.6 Висновки до розділу 3

Проведено дослідження для вивчення зміни експлуатаційних властивостей асфальтобетонів АС – 13 та АС – 16 при впливі насичено-зневоднених циклів розчинів протижеледних речовин. Завдяки ретельному аналізу даних, отриманих під час випробувань на занурення у воду за Маршаллом, стійкості асфальтобетонних покриттів до утворення колії та тріщиностійкості при низьких температурах, можна сформулювати наступні висновки:

1. Залишкова стабільність, динамічна стабільність і деформація розтягу при згині значно зменшилися зі збільшенням кількості циклів поперемінного насичення-зневоднення. Найбільше зменшилась деформація розтягу при згині

- близько 40 %, тоді як залишкова та динамічна стабільність зменшились приблизно на 20 %, що вказує на те, що комбінований вплив протижеледних речовин і поперемінного зволоження має найбільший вплив на низькотемпературні властивості асфальтобетону.

2. При аналізі отриманих залежностей впливу протижеледних речовин на властивості асфальтобетону встановлено, що сечовина $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ має найбільший вплив на водостійкість (залишкову стабільність), тоді як технічний спирт $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ найбільш впливає на високотемпературну стійкість (динамічну стабільність), але при цьому чинить найменший вплив на низькотемпературну тріщиностійкість (деформації розтягу при згині).

3. За допомогою аналізу ентропії сірої кореляції встановили, що тип асфальтобетону переважно впливає на водо- та високотемпературну стійкість асфальтобетону, в той час як різні види протижеледних речовин в основному впливають на низькотемпературну тріщиностійкість асфальтобетону.

РОЗДІЛ 4

ВПЛИВ ПРОТИОЖЕЛЕДНИХ РЕЧОВИН НА ВОДОСТІЙКІСТЬ

АСФАЛЬТОБЕТОНУ В УМОВАХ ЦИКЛІВ

ЗАМОРОЖУВАННЯ-ВІДТАВАННЯ

4.1 Методика визначення водостійкості асфальтобетону після циклів заморожування-відтавання у розчинах протиожеледних речовин

Визначення водостійкості при проведенні стандартних випробувань передбачає проводити насичення асфальтобетонних зразків у воді. Для визначення впливу протиожеледних речовин на водостійкість була запропонована наступна методика.

Для проведення досліджень циклів заморожування-відтавання були підготовлені наступні протиожеледні речовини: 15 % розчин сечовини ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$), 20 % розчин технічної солі (NaCl) і 20 % розчин спирту ($\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$). Враховуючи летючість $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$, його розчин готували свіжим для кожного циклу, тоді як розчини $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ і NaCl поповнювали кожні три цикли. Для проведення досліджень виготовляли зразки Маршалла з асфальтобетону типу АС – 13 і АС – 16, після чого піддавали поперемінним циклам заморожування-відтавання. Методика проведення описана нижче:

(1) Зразки обох типів асфальтобетону були занурені в розчини протиожеледних речовин на $(12 \pm 0,5)$ години, як показано на рис. 4.1;

(2) Після насичення зразки виймали і ставили у морозильну камеру з контрольованою температурою на період $(12 \pm 0,5)$ години, як показано на рис. 4.2, причому відхилення температури в камері не перевищувало ± 1 °С;



Рисунок 4.1 – Насичення і відтавання зразків асфальтобетону типу АС – 13 і АС – 16 в розчині протижеледних речовин

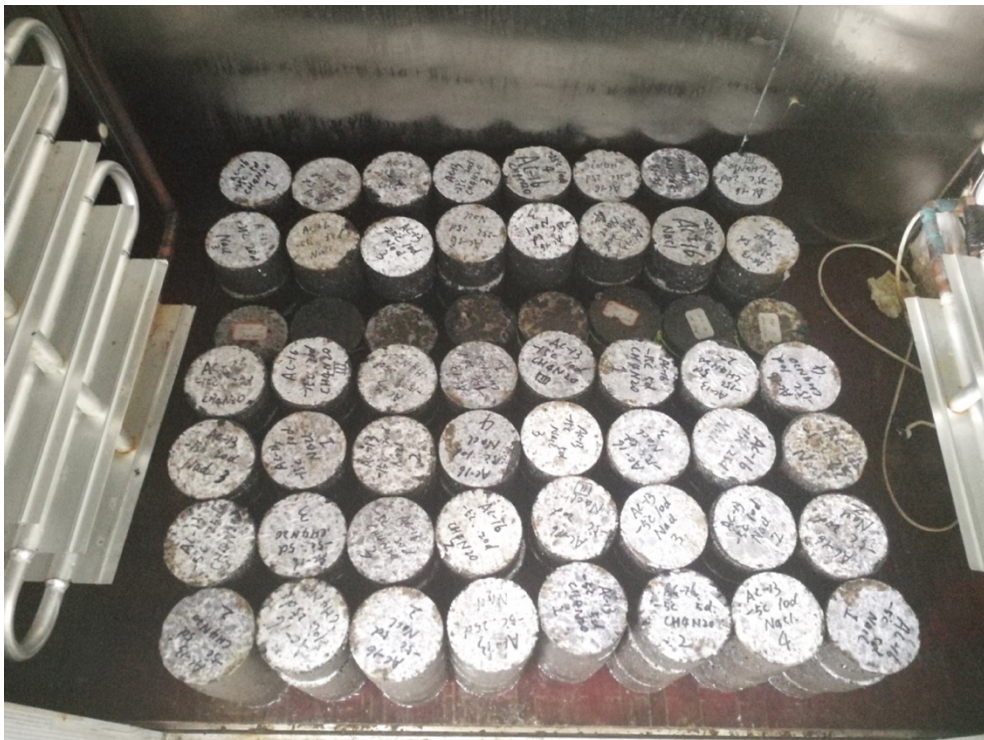


Рисунок 4.2 – Заморожування зразків асфальтобетону типу АС – 13 і АС – 16 в розчині протижеледних речовин

(3) Після заморожування зразки виймали і занурювали їх у розчин протижеледної речовини.

Описана методика являє собою повний цикл заморожування-відтавання. Даний експеримент охоплює загалом 30 циклів заморожування-відтавання, виконаних при температурах: $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Випробування зразків проводили після проходження кожних 5 циклів заморожування-відтавання відповідно при 5, 10, 15, 20, 25 і 30 циклах [1], [6], [7]. Дослідження включають випробування на: занурення у воду за Маршаллом і визначення границі міцності на розтяг при розколюванні, що відповідають методиці проведення випробувань зазначених в стандарті "Стандартні методи випробування бітуму та асфальтобетону для будівництва автомобільних доріг" (JTG E20 – 2011) [126].

4.2 Визначення основних характеристик водостійкості асфальтобетону, в умовах впливу протижеледних речовин, при випробуванні на занурення у воду за Маршаллом

При випробуванні на занурення у воду за Маршаллом в умовах впливу протижеледних речовин основними характеристиками водостійкості асфальтобетону є :залишкова стабільність та швидкість втрати залишкової стабільності.

Встановлені залежності впливу розчину протижеледної речовини $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$, на асфальтобетон АС – 13 та АС – 16, залежно від кількості циклів на залишкову стабільність та швидкість втрати залишкової стабільності, які наведені на рис. 4.3 та 4.4.

На рис. 4.3 (а) показано залежності залишкової стабільності від кількості циклів заморожування і відтавання в розчині $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$, для асфальтобетону АС–13. Значення залишкової стабільності більше 75 % відповідає вимогам стандарту. Після 30 циклів заморожування і відтавання

при температурі -5°C значення залишкової стабільності відповідає вимогам, тоді як значення залишкової стабільності при -15°C на 25 циклі і залишкової стабільності при -25°C на 20 циклі не відповідає вимогам стандарту. Після 30 циклів залишкова стабільність при -5°C , -15°C і -25°C становила 76,7 %, 72,0 % і 70,5 % відповідно. Графіки на рис. 4.3 (б) відображають швидкість втрати залишкової стабільності за 30 циклів при температурах -5°C , -15°C і -25°C , що становить відповідно 11,7 %, 17,1 % і 18,8 %.

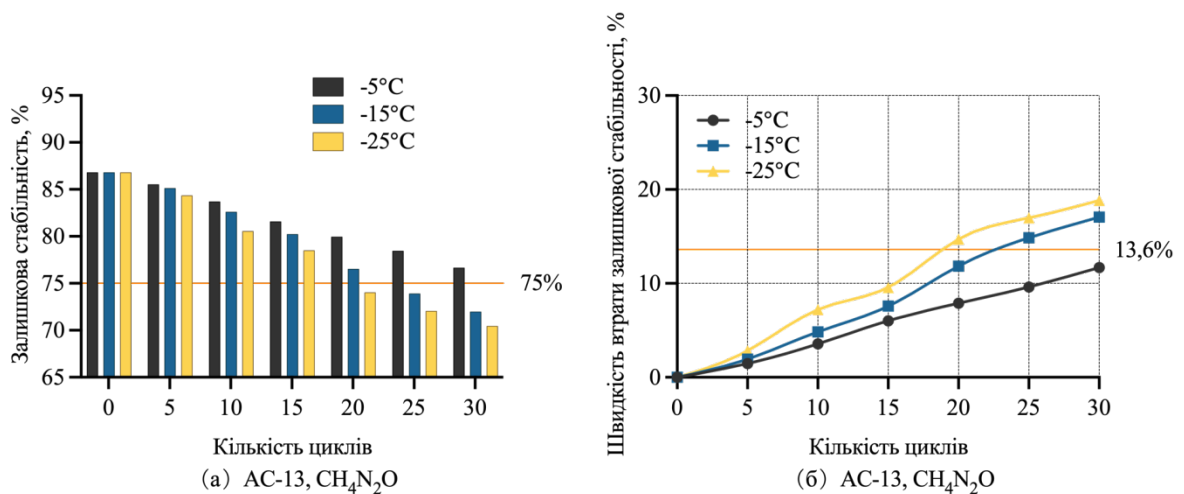


Рисунок 4.3 – Залежності впливу $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$, на основні характеристики водостійкості для асфальтобетону AC – 13

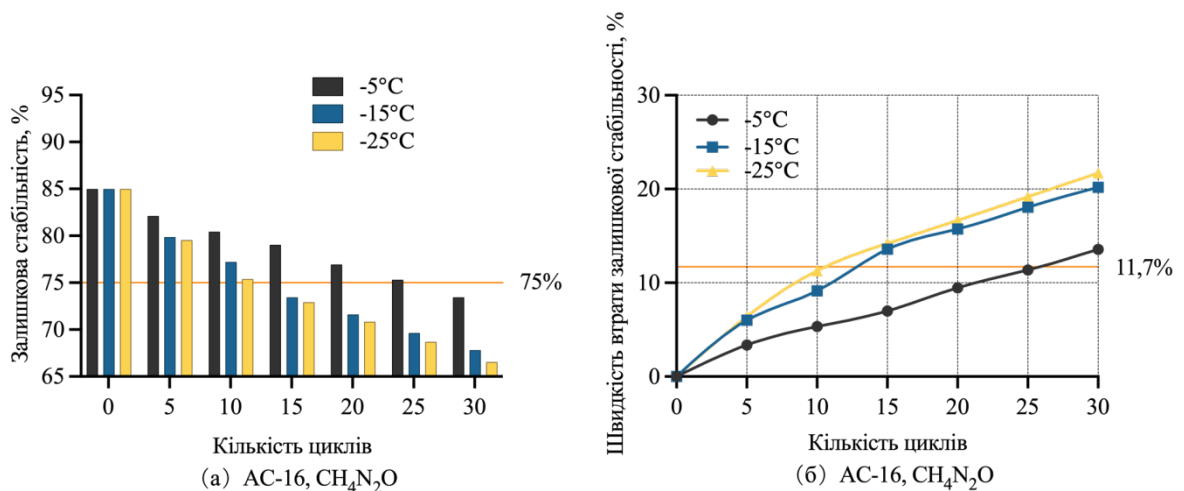


Рисунок 4.4 – Залежності впливу $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$, на основні характеристики водостійкості для асфальтобетону AC – 16

На рис. 4.4 (а) показано залежності залишкової стабільності при зануренні асфальтобетону АС – 16 в розчин $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ протягом 30 циклів заморожування-відтавання. При цьому залишкова стабільність повинна бути більше 75%, відповідно до вимог стандарту. Залишкова стабільність при температурі -5°C після 30 циклів, при -15°C після 15 циклів та при -25°C після 15 циклів не відповідає вимогам стандарту. Після 30 циклів залишкова стабільність при температурах -5°C , -15°C і -25°C становить відповідно 73,4 %, 67,8 % і 66,5 %. Графік на рис. 4.4 (б) характеризує швидкість втрати залишкової стабільності за 30 циклів при -5°C , -15°C і -25°C , що становить 13,6 %, 20,2 % і 21,7 % відповідно.

Встановлені залежності впливу розчину протижеледної речовини NaCl , на асфальтобетон АС – 13 та АС – 16, залежно від кількості циклів на залишкову стабільність та швидкість втрати залишкової стабільності, які наведені на рис. 4.5 та 4.6.

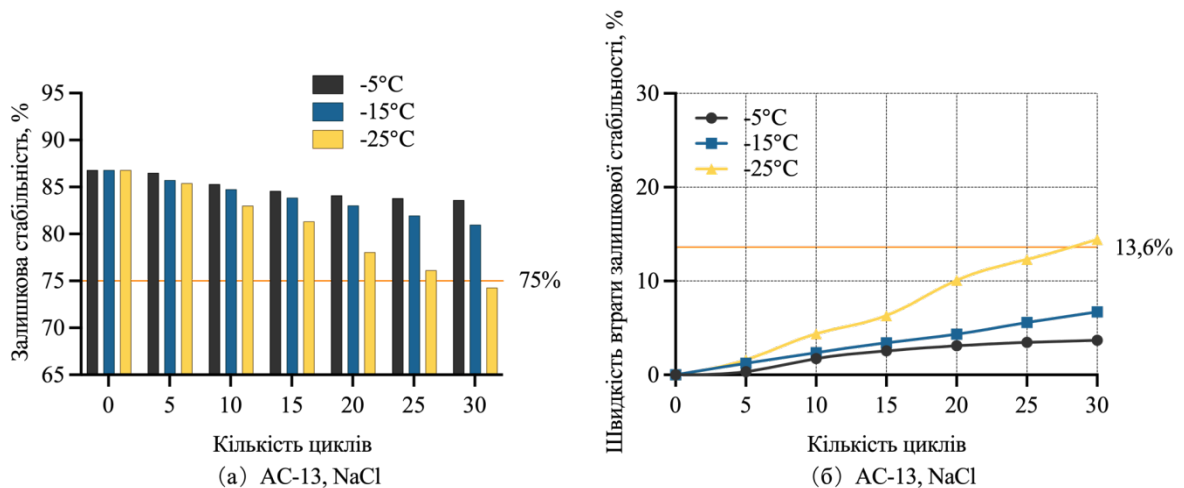


Рисунок 4.5 – Залежності впливу NaCl на основні характеристики водостійкості для асфальтобетону АС – 13

Проаналізувавши графічні залежності на рис. 4.5 (а) встановили, що залишкова стабільність асфальтобетону АС – 13, при температурі -25°C після 30 циклів заморожування і відтавання в розчині NaCl становить менше

75 %. Всі значення залишкової стабільності при інших температурах відповідали вимогам стандарту. Після 30 циклів залишкова стабільність при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ становила 83,6 %, 81,0 % і 74,3 % відповідно. Графіки на рис. 4.5 (б) характеризують швидкість втрати залишкової стабільності за 30 циклів при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, що становить 3,7 %, 6,7 % і 14,4 % відповідно.

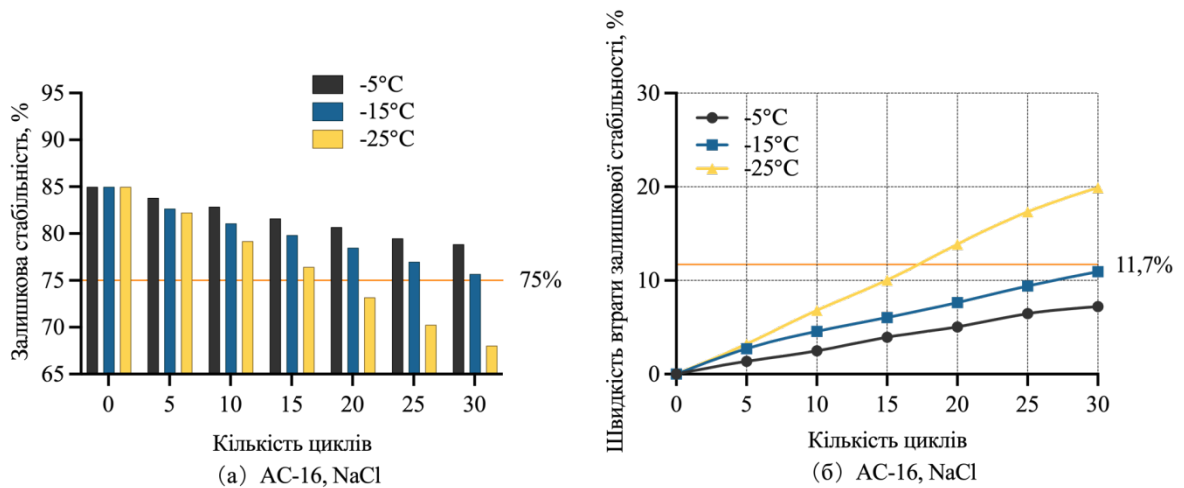


Рисунок 4.6 – Залежності впливу NaCl на основні характеристики водостійкості для асфальтобетону АС – 16

Проаналізувавши графічні залежності на рис. 4.6 (а) встановили, що залишкова стабільність асфальтобетону АС – 16, зануреного в розчин NaCl, відповідає вимогам стандарту, перевищуючи 75 % після 30 циклів заморожування і відтавання при температурах $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, тоді як залишкова стабільність при $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ після 20 циклу не відповідає вимогам стандарту. Після 30 циклів залишкова стабільність при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ становила 78,9 %, 75,7 % і 68,0 % відповідно. Графіки на рис. 4.6 (б) характеризують швидкість втрати залишкової стабільності за 30 циклів при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, що становить 7,2 %, 10,9 % і 19,9 % відповідно.

Встановлені залежності впливу розчину протижеледної речовини $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$, на асфальтобетон АС – 13 та АС – 16, залежно від кількості циклів

на залишкову стабільність та швидкість втрати залишкової стабільності, які наведені на рис. 4.7 та 4.8.

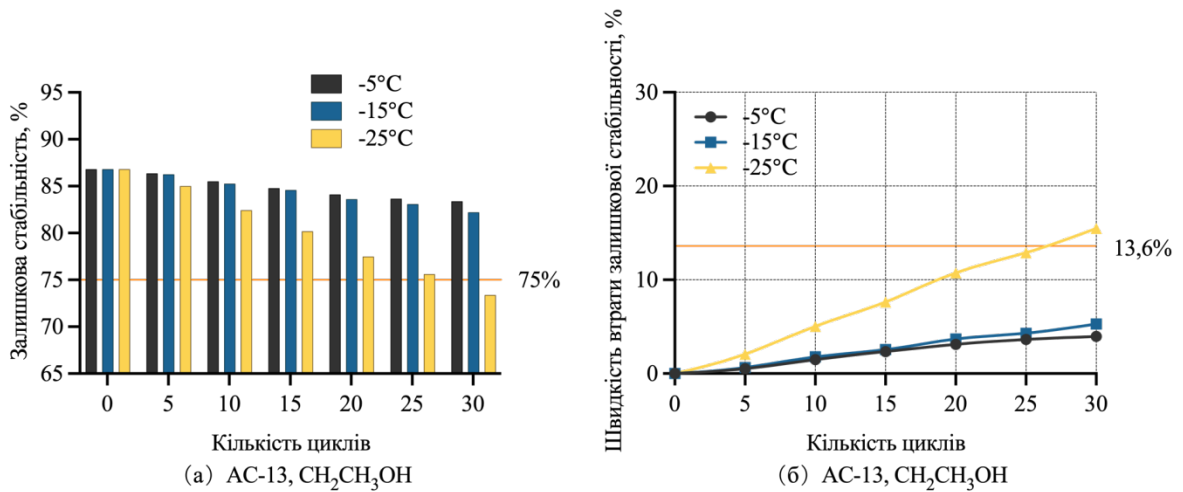


Рисунок 4.7 – Залежності впливу $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ на основні характеристики водостійкості для асфальтобетону АС – 13

Проаналізувавши графічні залежності на рис. 4.7 (а) встановили, що залишкова стабільність асфальтобетону АС – 13, при температурі -25°C після 30 циклів заморожування і відтавання в розчині $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ становить менше 75 %. Всі значення залишкової стабільності при інших температурах відповідали вимогам стандарту. Після 30 циклів залишкова стабільність при температурах -5°C , -15°C і -25°C становила 83,4 %, 82,2 % і 73,4 % відповідно. Графіки на рис. 4.7 (б) характеризують швидкість втрати залишкової стабільності за 30 циклів при -5°C , -15°C і -25°C , що становить 4,0 %, 5,3 % і 15,5 % відповідно.

З рис. 4.8 (а) видно, що залишкова стабільність асфальтобетону АС – 16 насиченого у розчині $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ після 30 циклів заморожування та відтавання при температурі -5°C та -15°C перевищує 75 %, що відповідає вимогам стандарту. При цьому залишкова стабільність при температурі -25°C після 20 циклі не відповідає вимогам стандарту. При 30 циклах залишкова стабільність при -5°C , -15°C та -25°C , становила 79,3 %, 76,5 % і 67,6 % відповідно.

Графіки на рис. 4.8 (б) характеризують швидкість втрати залишкової стабільності за 30 циклів при -5°C , -15°C і -25°C , що становить 6,7 %, 10 % і 20,5 % відповідно.

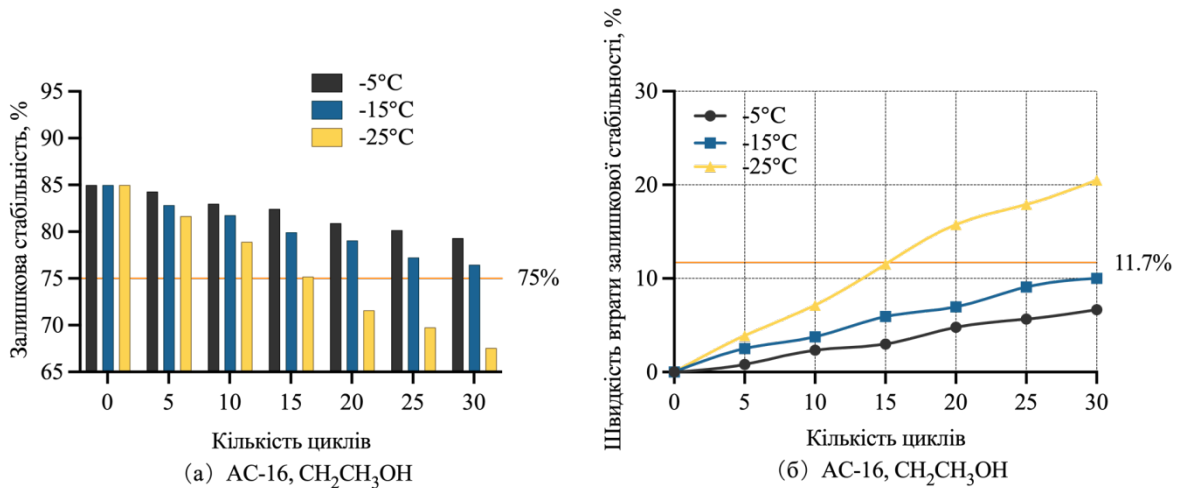


Рисунок 4.8 – Залежності впливу $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ на основні характеристики водостійкості для асфальтобетону АС – 16

4.3 Дослідження основних характеристик водостійкості асфальтобетону, в умовах впливу протижеледних речовин, під час визначення границі міцності на розтяг при розколюванні

Основними характеристик водостійкості асфальтобетону в умовах впливу протижеледних речовин під час визначенні границі міцності на розтяг при розколюванні - коефіцієнт міцності на розтяг при розколюванні (МРР) та швидкість втрати коефіцієнта МРР.

Відповідно до методики описаної в розділі 4.1, зразки асфальтобетону АС – 13 та АС – 16 після циклів заморожування-відтавання у розчинах $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$, NaCl , $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$, були випробувані на розтяг при розколюванні. Після випробування та проведених розрахунків були встановленні залежності зміни коефіцієнта МРР та швидкості втрати коефіцієнта МРР від кількості циклів. Графічна інтерпретація встановлених залежностей відображена на

рис. 4.9 – 4.14.

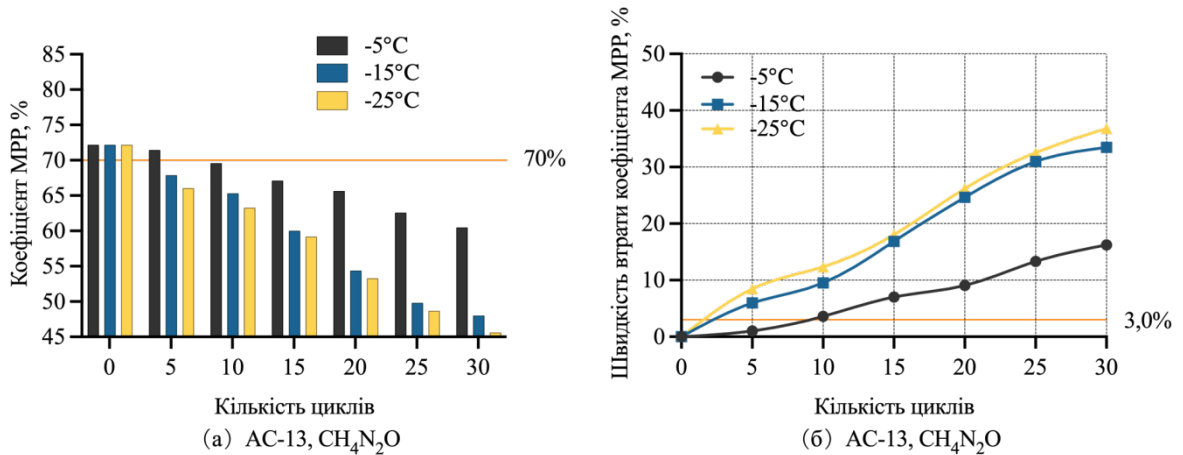


Рисунок 4.9 – Залежності впливу $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ на водостійкість АС – 13 при попередньому заморожуванні-відтаванні

На рис. 4.9 (а) показано графічні залежності впливу 30 циклів заморожування-відтавання в розчині $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ на коефіцієнт міцності на розтяг при розколюванні та швидкість втрати коефіцієнта МРР для асфальтобетону АС–13. Згідно до вимог стандарту коефіцієнт МРР повинен бути більше 70% [127]. Коефіцієнт МРР при температурі -5°C після 10-ти циклів та при -15°C і -25°C після 5 циклі не відповідав вимогам стандарту. Після 30 циклів коефіцієнт МРР при -5°C , -15°C і -25°C відповідно становив 60,5 %, 48,0 % і 45,6 %. На рис. 4.9(б) показано графіки швидкості втрати коефіцієнта МРР за 30 циклів при -5°C , -15°C і -25°C , що відповідно становить 16,2 %, 33,5 % і 36,8 %.

Проаналізувавши залежності на рис. 4.10 відносно впливу $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ на водостійкість АС–16 при попередньому заморожуванні-відтаванні встановлено значне зниження коефіцієнта МРР, а також підвищення швидкості втрати коефіцієнта МРР.

Коефіцієнт МРР при -5°C на 25 циклі, при -15°C , -25°C на 15 циклі не відповідав вимогам стандарту. Після 30 циклів коефіцієнт МРР при -5°C , -15°C і -25°C відповідно становив 63,4 %, 49,6 % і 48,4 %. На рис. 4.10 (б)

показано графіки швидкості втрати коефіцієнта МРР за 30 циклів при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, що становить відповідно 20,5 %, 37,8 % і 39,4 %.

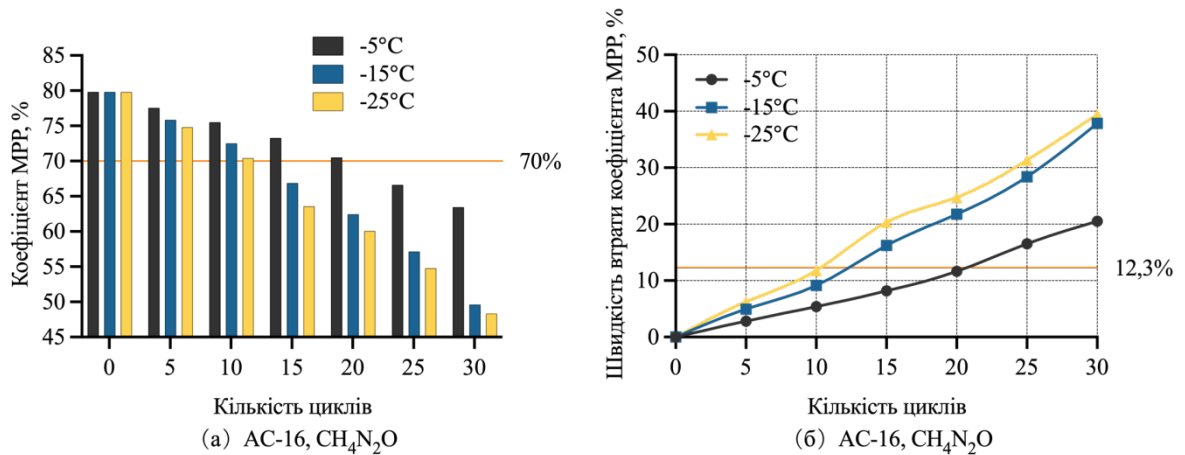


Рисунок 4.10 – Залежності впливу $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ на водостійкість АС–16 при попередньому заморожуванні-відтаванні

Далі аналогічно визначаємо вплив розчину NaCl на показники водостійкості асфальтобетону.

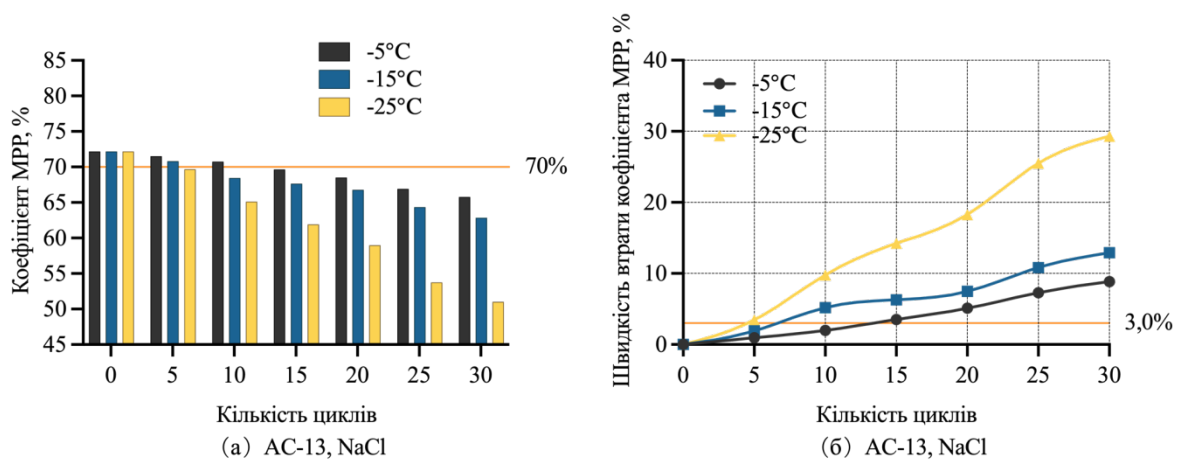


Рисунок 4.11 – Залежності впливу NaCl на водостійкість АС – 13 при попередньому заморожуванні-відтаванні

На рис. 4.11 відносно впливу NaCl на водостійкість АС – 16 при попередньому заморожуванні-відтаванні підтверджують значне зниження

коефіцієнта MPP, а також підвищення швидкості втрати коефіцієнта MPP.

Коефіцієнт MPP при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ після 15 циклів, при $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ після 10 та при $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ після 5 циклів не відповідають вимогам стандарту. Після 30 циклів коефіцієнт міцності на розтяг при розколюванні при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ відповідно становив 65,8 %, 62,9 % і 51,0 %. На рис. 4.11 (б) показано графіки швидкості втрати коефіцієнта MPP за 30 циклів при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, що становить відповідно 8,9 %, 12,9 % і 29,3 %.

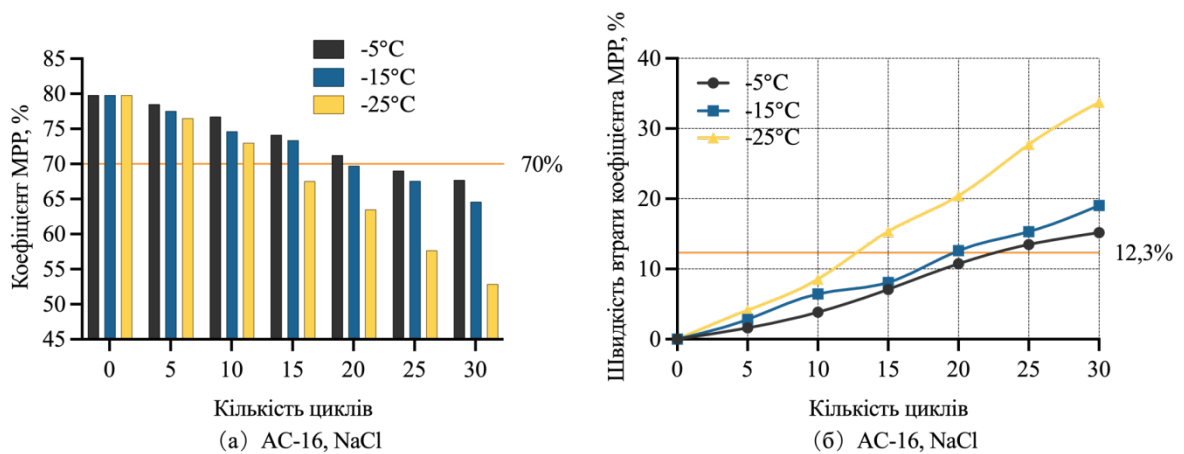


Рисунок 4.12 – Залежності впливу NaCl на водостійкість АС – 16 при попередньому заморожуванні-відтаванні

На графіках зображених на рис. 4.12 (а) також підтверджений негативний вплив на водостійкість асфальтобетону АС – 16 при 30 циклах заморожування-відтавання в розчині NaCl. Коефіцієнт MPP при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ після 25 циклів, при $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ після 20 та при $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ після 15 циклів не відповідав вимогам стандарту. Після 30 циклів коефіцієнт MPP при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ відповідно становив 67,7 %, 64,6 % і 52,9 %. На рис. 4.12 (б) показано графіки швидкості втрати коефіцієнта MPP за 30 циклів при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, що становить відповідно 15,2 %, 19,1 % і 33,8 %.

Далі аналогічно визначаємо вплив розчину - $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ на показники водостійкості асфальтобетону АС – 16 та АС – 13.

На рис. 4.13 (а) встановлено зниження коефіцієнта MPP для

асфальтобетону АС – 13 після 30 циклів заморожування-відтавання в розчин $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$. Коефіцієнт МРР при -5°C після проходження 20 циклів, при -15°C після 10-ти та при -25°C після 5 циклів не відповідає вимогам стандарту. Після 30 циклів коефіцієнт МРР при -5°C , -15°C і -25°C становив відповідно 66,5 %, 63,6 % і 49,8 %. На рис. 4.13 (б) показано швидкість втрати коефіцієнта МРР за 30 циклів при -5°C , -15°C і -25°C , що становить відповідно 7,9 %, 11,8 % і 31,1 %.

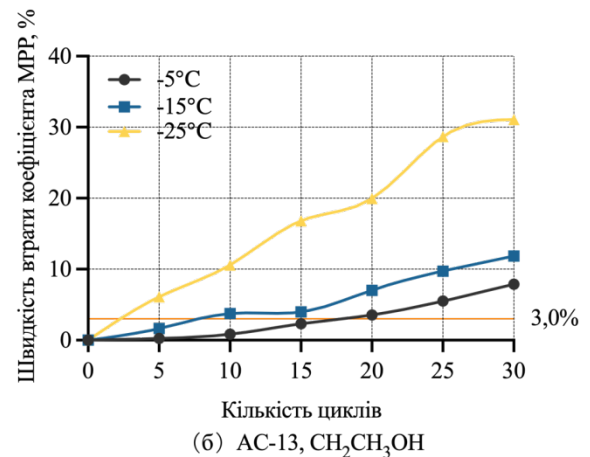
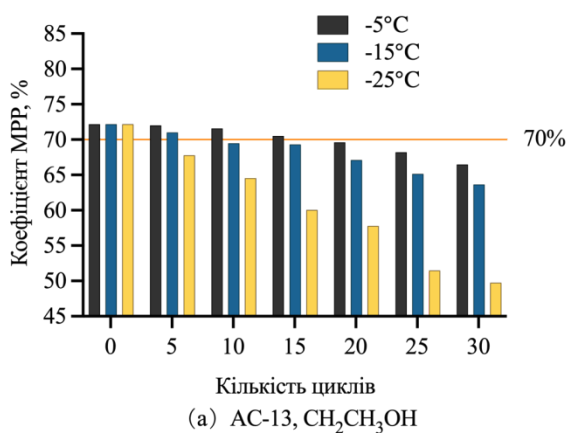


Рисунок 4.13 – Залежності впливу $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ на водостійкість АС – 13 при попередньому заморожуванні-відтаванні

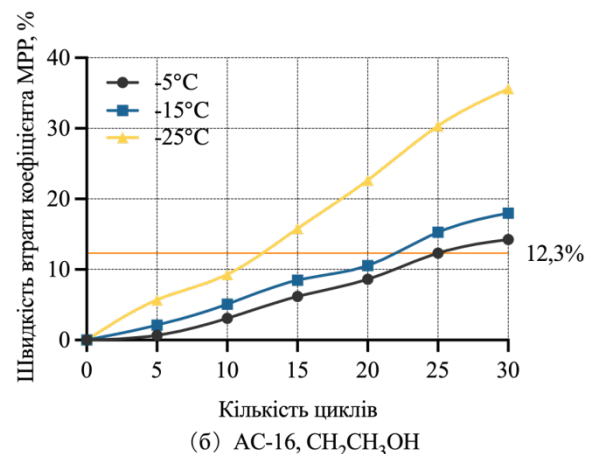
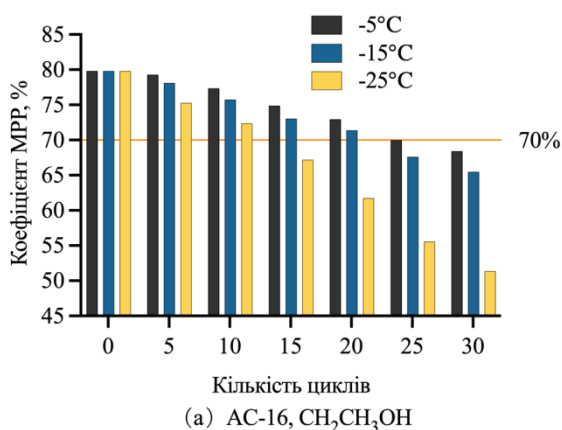


Рисунок 4.14 – Залежності впливу $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ на водостійкість АС – 16 при попередньому заморожуванні-відтаванні

На рис. 4.14 (а) розглянуто зміну коефіцієнта МРР асфальтобетону АС – 16 30 циклів заморожування-відтавання в розчині $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$. Коефіцієнт МРР при $-5\text{ }^\circ\text{C}$ і $-15\text{ }^\circ\text{C}$ на 25 циклі та при $-25\text{ }^\circ\text{C}$ на 15 циклі не відповідав вимогам стандарту. Після 30 циклів коефіцієнт МРР за температур $-5\text{ }^\circ\text{C}$, $-15\text{ }^\circ\text{C}$ і $-25\text{ }^\circ\text{C}$ відповідно становив 68,4 %, 65,5 % і 51,4 %. На рис. 4.14 (б) показано швидкість втрати коефіцієнта МРР за 30 циклів при $-5\text{ }^\circ\text{C}$, $-15\text{ }^\circ\text{C}$ і $-25\text{ }^\circ\text{C}$, що відповідно становить 14,3 %, 18,0 % і 35,6 %.

4.4 Комплексний аналіз впливу протижеледних речовин на водостійкість асфальтобетону в умовах циклів заморожування-відтавання

З графіків на рис. 4.3, 4.4, 4.9 і 4.10, можна зробити висновок, що розчин $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ при температурі $-5\text{ }^\circ\text{C}$ і концентрації 15 % не спричиняє суттєвих руйнувань а відповідно знаходиться в не замороженому стані. За такої умови, розчин спричиняє незначні пошкодження асфальтобетону, що призводить до погіршення залишкової стабільності приблизно на 12 %. Також, спостерігається приблизно 18% швидкість втрати міцності на розтяг при розколюванні, що може бути пов'язано з розчиненням окремих компонентів бітуму розчином карбаміду, який сприяє мікроскопічній корозії та знижує характеристики асфальтобетону.

При значно нижчих температурах $-15\text{ }^\circ\text{C}$ і $-25\text{ }^\circ\text{C}$, які перевищують температуру замерзання розчину $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$, зафіксовано значне зростання як швидкості втрати залишкової стабільності (близько 19 %), так і коефіцієнта МРР (близько 37 %). Це явище можна пояснити інфільтрацією розчину і подальшим замерзанням у пустотах асфальтобетону, що призводить до розкриття та утворення тріщин, а відповідно збільшення частки пустот. По мірі того, як цикл замерзання і відтавання повторюється, збільшується об'єм проникаючого всередину асфальтобетону рідкого розчину, що посилює руйнування зразків і призводить до значного зниження водостійкості.

Детальний аналіз, графічних матеріалів представлених на рис. 4.5, 4.6, 4.11 і 4.12, вказує, що при температурах $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ і 20 % концентрації розчин NaCl не викликає значних пошкоджень за умови даних низьких температур. Це підтверджує перебування розчин NaCl в рідкому стані, що також збігається з попередньо проведеннями дослідженнями по визначенню точки замерзання протиожеледних речовин. Тим не менш, розчин NaCl, проникаючи в асфальтобетон, спричиняє незначні пошкодження, при цьому спостерігається допустима швидкість втрати залишкової стабільності приблизно на 7% та зниження, приблизно на 14 %, швидкості втрати коефіцієнта МРР. Це може бути пов'язано з утворенням нестійкої, водорозчинної аморфної плівки хлористих солей на поверхні асфальтобетону, яка псує пористу структуру і тим самим порушує цілісність асфальтобетону, що призводить до зниження його водостійкості [130].

При зниженні температури до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, що перевищує температуру замерзання розчину NaCl, спостерігається виражене зниження як залишкової стабільності (приблизно на 17 %), так і коефіцієнта МРР (приблизно на 31 %). Такі зміни пояснюються замерзанням розчину NaCl, який проникає у порожнини та тріщини асфальтобетону, що призводить до розкриття тріщин та збільшення пористості. Це, в свою чергу, призводить до збільшення об'єму розчину під час наступних циклів заморожування-відтавання, тим самим збільшуючи внутрішні напруження та викликають руйнування зразка.

Дані, представлені на рис. 4.7, 4.8, 4.13 і 4.14, показують, що при температурах $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 20% розчин $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ залишається вище точки замерзання, а відповідно не спричиняє значні руйнування при даних температурах. Але, насичення спиртовим розчином асфальтобетону спричиняє певний рівень корозії, що призводить до зниження залишкової стабільності приблизно на 6,5 % та зменшення коефіцієнту МРР на 13 %. Як відомо з літературних джерел, між спиртом і органічним в'язучим відбувається хімічна взаємодія і процес дифузії, що прискорює структурну корозію асфальтобетону, яка, ймовірно, сприяє зниженню водостійкості [131].

При зниженні температури до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, що нижче точки замерзання 20 % розчину $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$, спостерігається значне руйнування зразків, при цьому залишкова стабільність і коефіцієнт МРР знижуються приблизно на 18% і 33 % відповідно. Це явище пояснюється замерзанням спиртового розчину після проникнення у порожнини асфальтобетону, що призводить до творення тріщин та збільшення відкритої пористості. Під час наступних циклів заморожування-відтавання поглинається все більша кількість розчину, що посилює пошкодження зразка і призводить до зменшення водостійкості.

На основі даних, отриманих під час випробування на занурення у воду за Маршаллом та на визначення границі міцності на розтяг при розколюванні можна зробити такі висновки. Збільшення кількості циклів заморожування-відтавання призводить до більш вираженого зниження основних показників водостійкості для АС – 16, ніж для АС – 13 (швидкість втрати залишкової стабільності для АС – 13 становить 10,79%, для АС – 16 - 14,52 %; швидкість втрати коефіцієнта МРР для АС – 13 - 20,93 %, для АС – 16 - 25,95 %), у разі різних умов експлуатації. Враховуючи, що відсоток дрібного заповнювача в АС – 13 перевищує його вміст в АС – 16, збільшення відсотка дрібного заповнювача підвищує стійкість асфальтобетону до руйнування протиожиледною речовиною і стійкість до руйнування в умовах поперемінного заморожування та відтавання.

4.5 Логістична модель визначення основних критеріїв водостійкості

Логістична регресійна модель слугує інструментом нелінійної ймовірнісної регресії, насамперед полегшуючи визначення та виведення взаємозв'язків між бінарною або мультиномінальною залежною змінною та набором незалежних змінних. На відміну від множинної лінійної регресії, цей метод має кілька особливих переваг, включаючи відсутність вимог щодо нормальності змінних та однорідності дисперсій, а також відсутність обмежень на конкретні типи незалежних змінних. Крім того, статистичні

коефіцієнти цієї моделі мають високу інтерпретованість, що робить модель логістичної регресії найпоширенішим вибором в наукових дослідженнях.

У сфері дорожніх матеріалів логістична регресійна модель знаходить широке застосування. Лі Нін (Li Ning) та його колеги використали цю модель для аналізу характеристик зниження міцності асфальтобетону в умовах замерзання-відтавання, використовуючи дані випробувань циклів замерзання-відтавання і прийнявши для оцінки модель втрати міцності. Цей підхід влучно відображає погіршення експлуатаційних характеристик асфальтобетону після численних циклів заморожування-відтавання [132]. Одночасно Чжан Пенг застосував логістичну модель для проведення аналізу визначення коефіцієнтів втрат, при пошкодженні від поперемінної зміни комбінованих впливів опадів, високої температури і сонячного випромінювання, причому коефіцієнт втрат кожного циклу слугував залежною змінною. Цей метод продемонстрував значну точність, що свідчить про високий рівень ефективності моделювання [133]. Крім того, функція кривої зростання, представлена логістичною моделлю, точно імітує динаміку експлуатаційних характеристик асфальтобетону, демонструючи її можливість як надійного інструменту для визначення поведінки матеріалу під впливом змінних факторів навколишнього середовища.

Для визначення основних критеріїв водостійкості були побудовані логістичні моделі з використанням двох незалежних змінних: x , що відповідає температурі, та y , що представляє кількість циклів замерзання-відтавання. Залежними змінними при моделюванні є основні критерії водостійкості асфальтобетону, які слугують критичними параметрами при визначенні виду протижеледних речовин та типу асфальтобетону.

$$R_T = \frac{a}{\left[1 + \exp\left(\frac{b-x}{m}\right)\right] \left[1 + \exp\left(\frac{c-y}{n}\right)\right]} + d, \quad (4.1)$$

де a , b , c , d , m та n – параметри підбору. Де R_T працює як функція, залежна від x та y .

Логістичні моделі для визначення основних критеріїв водостійкості були

побудовані для різних умов на основі дослідних даних. Моделі впливу циклів заморожування-відтавання на зміну залишкової стабільності, наведені в табл. 4.1, а моделі, що відповідають зміні коефіцієнта MPP - в табл. 4.2.

Таблиця 4.1 – Логістичні моделі визначення залишкової стабільності після циклів заморожування-відтавання

| Тип П/Р | Тип А/Б | Логістична модель | Коефіцієнт кореляції R ² |
|------------------------------------|---------|---|-------------------------------------|
| NaCl | АС – 13 | $R_T = \frac{484.7}{\left[1 + \exp\left(\frac{7.87 - x}{1.42}\right)\right] \left[1 + \exp\left(\frac{16.48 - y}{5.779}\right)\right]} + 0.06606$ | 0.9843 |
| | АС – 16 | $R_T = \frac{467.6}{\left[1 + \exp\left(\frac{8.94 - x}{1.975}\right)\right] \left[1 + \exp\left(\frac{15.24 - y}{6.788}\right)\right]} - 0.5938$ | 0.9865 |
| CH ₄ N ₂ O | АС – 13 | $R_T = \frac{26.45}{\left[1 + \exp\left(\frac{0.6538 - x}{0.9698}\right)\right] \left[1 + \exp\left(\frac{14.75 - y}{7.425}\right)\right]} - 2.267$ | 0.9931 |
| | АС – 16 | $R_T = \frac{31.77}{\left[1 + \exp\left(\frac{0.5237 - x}{0.5141}\right)\right] \left[1 + \exp\left(\frac{6.837 - y}{8.985}\right)\right]} - 8.265$ | 0.9847 |
| CH ₂ CH ₃ OH | АС – 13 | $R_T = \frac{683}{\left[1 + \exp\left(\frac{7.105 - x}{1.094}\right)\right] \left[1 + \exp\left(\frac{16.06 - y}{5.581}\right)\right]} + 0.2856$ | 0.9656 |
| | АС – 16 | $R_T = \frac{640.5}{\left[1 + \exp\left(\frac{8.491 - x}{1.64}\right)\right] \left[1 + \exp\left(\frac{13.83 - y}{6.033}\right)\right]} - 0.5459$ | 0.9871 |

Таблиця 4.2 – Логістичні моделі визначення коефіцієнта MPP після циклів заморожування-відтавання

| Тип П/Р | Тип А/Б | Логістична модель | Коефіцієнт кореляції R ² |
|------------------------------------|---------|---|-------------------------------------|
| NaCl | АС – 13 | $R_T = \frac{1114}{\left[1 + \exp\left(\frac{7.979 - x}{1.445}\right)\right] \left[1 + \exp\left(\frac{17.68 - y}{7.072}\right)\right]} - 0.5809$ | 0.9787 |
| | АС – 16 | $R_T = \frac{1170}{\left[1 + \exp\left(\frac{11.42 - x}{2.515}\right)\right] \left[1 + \exp\left(\frac{18.24 - y}{7.227}\right)\right]} - 1.2$ | 0.9791 |
| CH ₄ N ₂ O | АС – 13 | $R_T = \frac{47.92}{\left[1 + \exp\left(\frac{1.044 - x}{0.3826}\right)\right] \left[1 + \exp\left(\frac{15.72 - y}{7.927}\right)\right]} - 3.878$ | 0.9927 |
| | АС – 16 | $R_T = \frac{64.54}{\left[1 + \exp\left(\frac{0.8453 - x}{0.5054}\right)\right] \left[1 + \exp\left(\frac{20.91 - y}{10.46}\right)\right]} - 5.397$ | 0.9904 |
| CH ₂ CH ₃ OH | АС – 13 | $R_T = \frac{1195}{\left[1 + \exp\left(\frac{6.863 - x}{1.127}\right)\right] \left[1 + \exp\left(\frac{17.13 - y}{7.282}\right)\right]} - 0.8078$ | 0.9778 |
| | АС – 16 | $R_T = \frac{1443}{\left[1 + \exp\left(\frac{9.843 - x}{1.963}\right)\right] \left[1 + \exp\left(\frac{18.43 - y}{7.146}\right)\right]} - 1.126$ | 0.9793 |

Як видно з табл. 4.1 і табл. 4.2, під впливом циклів заморожування-відтавання втрати оціночних параметрів асфальтобетону демонструють стійку кореляцію з логістичною моделлю, коефіцієнти

кореляції якої постійно перевищують 0,96.

4.6 Висновки до розділу 4

У четвертому розділі проведенні випробування двох типів асфальтобетону АС – 13 АС16 на занурення у воду за Маршаллом та визначення границі міцності на розтяг при розколюванні після заморожування-відтавання у трьох видах протижеледних речовин та у трьох різних низькотемпературних середовищах, ми дійшли наступних висновків:

1. Виявлено, що при насиченні зразків асфальтобетону розчинами протижеледних речовин, не спостерігається процесу його руйнування при заморожуванні, за умови, що їхня температура залишається вище температури замерзання. Експериментальні дані свідчать про зниження залишкової стабільності приблизно на 8 % і зниження коефіцієнту міцності розтягу при розколюванні приблизно на 14 %, що свідчить про мінімальну втрату водостійкості. При цьому, дані розчини спричиняють корозію асфальтобетону, що потенційно може скоротити термін служби дорожнього покриття при тривалому використанні.

2. Доведено, що коли температура зразків асфальтобетону насичених розчинами протижеледної речовини знижується нижче точки її замерзання, відбувається пошкодження асфальтобетону внаслідок збільшення їх об'єму, що призводить до значної втрати водостійкості. Експериментальні дані вказують на зниження залишкової стабільності приблизно на 19% і зниження коефіцієнту МРР приблизно на 35 %, що негативно впливає на довговічності дорожнього покриття.

3. Досліджено шкідливий вплив протижеледних речовин $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ який призводить до втрат швидкості (залишкової стабільності 17,2 %; коефіцієнта МРР 30,72 %) на водостійкість асфальтобетону. Вплив $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ значно більш виражений порівняно з NaCl (швидкість втрати залишкової стабільності 10,47 %; швидкість втрати коефіцієнта МРР 19,85 %) та

$\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ (швидкість втрати залишкової стабільності 10,32 %; швидкість втрати коефіцієнта МРР 19,77 %).

4. Встановлено, що для АС – 16 збільшення кількості циклів заморожування-відтавання призводить до більшого зниження залишкової стабільності та коефіцієнта міцності на розтяг при розколюванні ніж для АС – 13. Швидкість втрати залишкової стабільності для АС – 13 становить 10,79 %, для АС – 16 становить 14,52 %; Швидкість втрати коефіцієнта МРР для АС – 13 становить 20,93 %, для АС – 16 становить 25,95 %. Збільшення вмісту дрібного заповнювача в АС – 13 на 4 % підвищує стійкість до руйнування протижеледними речовинами та водостійкість асфальтобетону.

5. Логістична модель демонструє відповідну кореляцію з коливаннями технічних показників асфальтобетону, реєструючи коефіцієнти кореляції, що перевищують 0,96.

РОЗДІЛ 5

ВПЛИВ ПРОТИОЖЕЛЕДНИХ РЕЧОВИН НА ВЛАСТИВОСТІ АСФАЛЬТОБЕТОНУ В УМОВАХ ГІДРОДИНАМІЧНОГО РОЗМИВУ

5.1 Аналіз впливу протиожеледних речовин на властивості асфальтобетону в умовах гідродинамічного розмиву

При аналізі механіки силової взаємодії транспортного засобу з дорожнім покриттям рухоме питоме навантаження від його шини рівномірно розподілене. Усереднена площа контакту шини з дорожнім покриттям умовно знаходиться між еліпсом і прямокутником, а тому наближено будемо вважати, що це прямокутна форма площі контакту, яка може використовуватися для сприйняття навантаження від шини. Згідно з відповідними дослідженнями [134], під час руху шини по певній ділянці дороги виникає контактне питоме навантаження на дорожнє покриття, позначене як P , що змінюється за синусоїдальною залежністю, що можна виразити як:

$$\begin{cases} P = P_{max} \sin^2\left(\frac{\pi}{T}t\right) & 0 \leq t \leq T \\ P = 0 & t > T \end{cases}, \quad (5.1)$$

де, P_{max} – пікове значення рухомого питомого навантаження, відповідно до поточного співвідношення перерахунку навантаження на вісь, яке прийнято згідно [135], після перерахунку в стандартне питоме навантаження на вісь, $P_{max} = 0,7$ МПа; T - загальна тривалість одноразової дії навантаження, яка обернено пропорційна швидкості руху транспортного засобу.

Розглянемо три видатки особливості динамічної взаємодії водяної плівки із дорожнім покриттям.

I. Водяна плівка на поверхні дорожнього покриття

В умовах недостатнього водовідведення або інтенсивних опадів та танення снігу, на проїжджій частині дороги може відбуватися накопичення води, створюючи шар водяної плівки, вирівняний з поздовжніми та

поперечними градієнтами дороги. Під час руху транспортних засобів по цій ділянці, проміжна водяна плівка між шиною та дорожнім покриттям стискається, набуваючи при цьому певної початкової швидкості. Це призводить до того, що частина води витісняється боковою частиною шини в сторони, а частина витісняється через зазори протектора [136]. Таким чином, раніше відносно статична водяна плівка генерує динамічні та перехідні додаткові силові розподілені по площі контакту навантаження, ініціюючи динамічний процес водної ерозії верхнього шару асфальтобетонного покриття при проникненні води у відкриті пори.

З точки зору механіки рідини, шина автомобіля, що рухається по дорожньому покриттю з водяною плівкою, надасть початкову швидкість вільним частинкам води, які контактують з нею, і відповідно їх значна кількість сформує поле швидкісного напору. Коли спрямований потік води, який рухається під напором в напрямку відкритих пор при наїзді шини, що стикається з дорожнім покриттям, його швидкість миттєво стає рівною 0, а кінетична енергія напірного потоку води у відкритих порах перетворюється на потенціальну енергію, що призводить до раптового збільшення тиску. Одночасно вода, що знаходиться під тиском у замкнених порах покриття чинить силове навантаження на внутрішню оболонку пори, яке призводить до можливої руйнації асфальтобетону поміж порами, тобто об'єднання їх між собою і утворення-розкриття тріщин.

Якщо взяти за точку відліку вісь нерухомої шини, то транспортний засіб є відносно нерухомим, а плівка води і дорожнє покриття рухаються назустріч транспортному засобу зі швидкістю. У разі, коли плівка води затиснута між шиною і дорожнім покриттям, тоді вона приймає клиноподібну форму здійснюючи вплив на шину транспортного засобу. Припустимо, що кут контакту шин дорівнює нулю, а малюнок протектора шини ігнорується, тобто протектор шини рівний, відповідно водяна плівка вдаряється об шину, як результат - вода потрапляє під площу протектора шини. Згідно з законом Бернуллі, максимальний динамічний тиск, під яким буде нагнітатися вода до

відкритих пор у асфальтобетоні, створюватиметься під поверхнею площі контакту шини з плівкою води і дорівнюватиме [137]:

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2, \quad (5.2)$$

де, P – піковий динамічний тиск вимивання води, що чиниться протектором шини на водну плівку під дією розподіленого навантаження, МПа; ρ – густина води, наближено рівна 1000 кг/м³; v – швидкість руху транспортного засобу, км/год.

Згідно з результатами досліджень Університету Тонджі [138] щодо контактної тиску в шині, зазвичай тиск на площу контакту шини з дорожнім покриттям є найбільшим, причому максимальний тиск становить P_{max} , що приблизно в 1,2 рази перевищує внутрішній тиск в шинах транспортних засобів (виражений через P_n), а саме:

$$P_{max} = 1.2P_n, \quad (5.3)$$

У процесі руху автомобіля на високій швидкості, якщо силова протидія від створеного тиску води в замкнутому об'ємі пор асфальтобетону на контактну площу шини стає більшою або дорівнює тиску шини на поверхню покриття, то шина відірветься від поверхні і буде ковзати по водяній плівці. Оскільки максимальний тиск шини [138] на поверхню становить $1,2P_n$, з цього випливає, що

$$\frac{1}{2} \rho v^2 = 1.2P_n, \quad (5.4)$$

$$P = 416.7v^2, \quad (5.5)$$

де, v – мінімальна швидкість відриву шини від дорожнього покриття; P_n – тиск в шинах.

З наведеного вище аналізу видно, що в ідеальних умовах гідродинамічна дія водяної плівки на поверхню бетонного покриття, під впливом навантаження від шини колеса транспортного засобу, прямо пропорційна квадрату швидкості руху шини, а максимальне значення тиску, що призводить до розмиву пори, менше або дорівнює максимальному значенню тиску в контактуючій шині. Відповідно до закону Ньютона, напірний потік води при

наїзді шини створює гідродинамічний тиск розмиву. Одночасно шина створює реактивну силову дію на напірний потік води, що сприяє ерозії асфальтобетонного покриття під дією напірного потоку води. На підставі рівняння (5.5) був розрахований відповідний гідродинамічний тиск при швидкостях автомобіля 20 км/год, 40 км/год, 60 км/год та 80 км/год, які наведені в табл. 5.1:

Таблиця 5.1 – Залежність між швидкістю транспортного засобу та гідродинамічним тиском розмиву водою в структурі асфальтобетону

| Швидкість транспортного засобу, км/год | 20 | 40 | 60 | 80 |
|--|------|------|-------|-------|
| Гідродинамічний тиск розмиву, кПа | 13.1 | 51.3 | 114.8 | 205.4 |

Таблиця 5.1 ілюструє, що при швидкості руху автомобіля 20 км/год, гідродинамічний тиск розмиву становить 13,1 кПа, тоді як при швидкості 80 км/год - значно зростає до 205,4 кПа. Можна зробити висновок, що швидкість руху транспортних засобів є головним визначальним фактором гідродинамічного тиску розмиву водою. Різке збільшення швидкості посилює ступінь руйнування асфальтобетонних покриттів, спричинених водою, особливо при незадовільному водовідведенні. Крім того, товщина водяної плівки є важливим фактором, що впливає на гідродинамічний тиск води у внутрішній структурі дорожнього покриття. Відповідні дослідження [139] визначають наступні взаємозв'язки між товщиною водяної плівки та швидкістю руху:

$$P = \frac{\rho v^2 R}{3} \sqrt{1 - \frac{(R-H)^2}{R^2}}, \quad (5.6)$$

Де, P – гідродинамічний тиск, МПа; ρ – густина води, наближено рівна 1000 кг/м³; H - товщина водяної плівки, м; R – радіус автомобільних шин, м.

З попереднього аналізу видно, що швидкість транспортного засобу, та товщина водяної плівки суттєво впливають на гідродинамічний тиск розмиву, який діє на дорожнє покриття. Крім того, характеристики матеріалів

дорожнього покриття, текстура і структурна глибина дорожнього покриття, а також малюнок протектора шини, відіграють вирішальну роль у визначенні величини гідродинамічного тиску розмиву.

II. Оцінювання впливу тиску води у зв'язаних порах

Структура асфальтобетонного покриття формується шляхом злиття і пошарового укладання таких компонентів, як заповнювач, асфальт і наповнювач, які згодом ущільнюються, утворюючи цілісну конструкцію. Ця структура складається з трьох різних фаз: твердої, рідкої та газової, що дозволяє класифікувати асфальтобетонне покриття як пористу шарувату конструкцію. У випадках, коли покриття насичене водою, надлишок рідини проникає в товщу поверхні, просочуючись у структурні шари через взаємопов'язані пори. Коли транспортні засоби рухаються по поверхні, закупорена вода спричинятиме розмивання, перекачування та стискання структури дорожнього одягу, що потенційно також може порушити його цілісність.

III. Вільна вода в закритих порах всередині структури дорожнього покриття.

Під час влаштування асфальтобетонного покриття певні пори в структурі залишаються незаповненими бітумом, створюючи мережу закритих пор, які матеріалізуються під час процесу ущільнення. За умов, коли дорожнє покриття затоплене водою, вільна вода проникає в наявні пори, залишаючи закриті пори ізольованими від зовнішнього зв'язку. Під час руху транспортних засобів по такому покриттю, матеріали, які входять до його складу, стискаються, що призводить до зменшення об'єму пор. Як наслідок, вільна вода, що знаходиться в розташованих поряд відкритих чи зв'язаних порах, створює також статичну силу стискання бокових стінок пор, що потенційно може вплинути на структурну стійкість дорожнього покриття.

5.2 Теоретичне обґрунтування розрахунку гідродинамічного тиску води в порах

Для обґрунтування розрахунку гідродинамічного тиску води в порах розглянемо спрощену модель асфальтобетону на рис. 5.1 та 5.2.

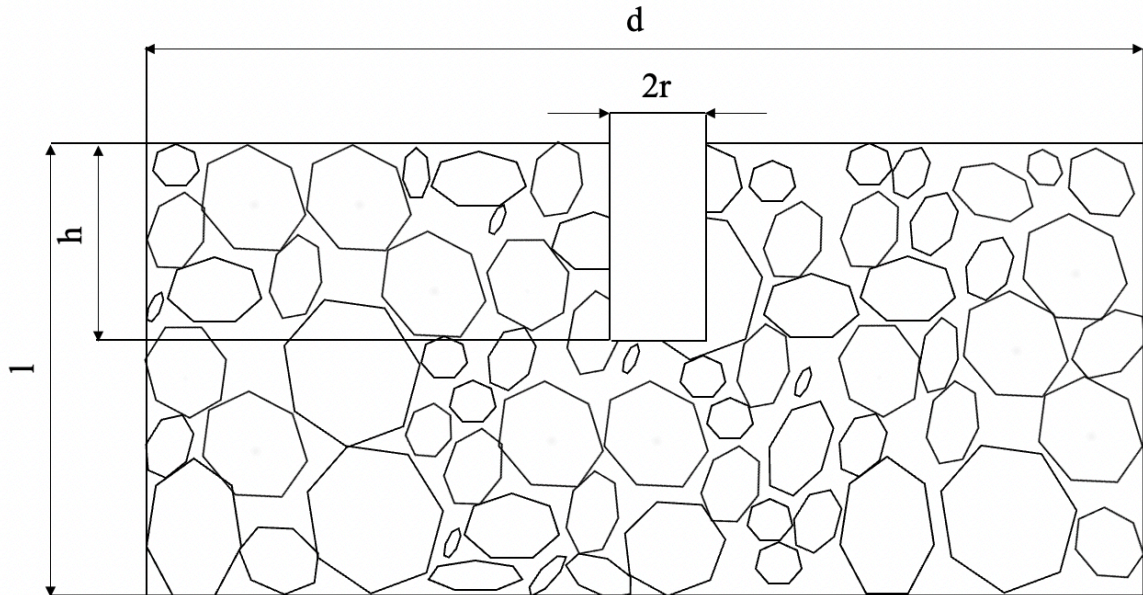


Рисунок 5.1 – Спрощена модель асфальтобетону

На рис. 5.1 показано, що висота центральної циліндричної пори становить h , діаметр - $2r$, поря заповнена водою, а $r \ll d$, $h \leq \frac{1}{2}l$. Для спрощення обчислювального процесу припускається, що вода, яка міститься в порі, не проникає вздовж бокової стінки і не має сполучних пор. За статичних умов тиск води на верхній поверхні пори дорівнює нулю, тоді як в основі пори - визначається як $P = \rho gh$, де ρ символізує густину води, g - гравітаційне прискорення, а h позначає глибину пори. Оскільки транспортний засіб рухається зі швидкістю v , то величина розподіленого навантаження шини на поверхню пори, що заповнена водою, позначається як Δt . Протягом цього проміжку часу, згідно з законом імпульсу сил, шина передає цей імпульс воді. Ця взаємодія сприяє швидкому бічному потоку води навколо шини, створюючи динамічне поле швидкостей. Враховуючи жорстку структуру пор, потік води спрямовується в середину пори. Ця різка зміна швидкості рідини

незмінно викликає значні коливання гідродинамічного тиску в порах, тобто, його швидке зростання або різке падіння. Прискорений процес зміни швидкості посилює миттєве зростання і падіння тиску, таким чином породжуючи хвилю стиснення, також відому як хвиля гідроудару в місці, де відбуваються зміни тиску. Це явище відоме в гідромеханіці як явище гідроудару.

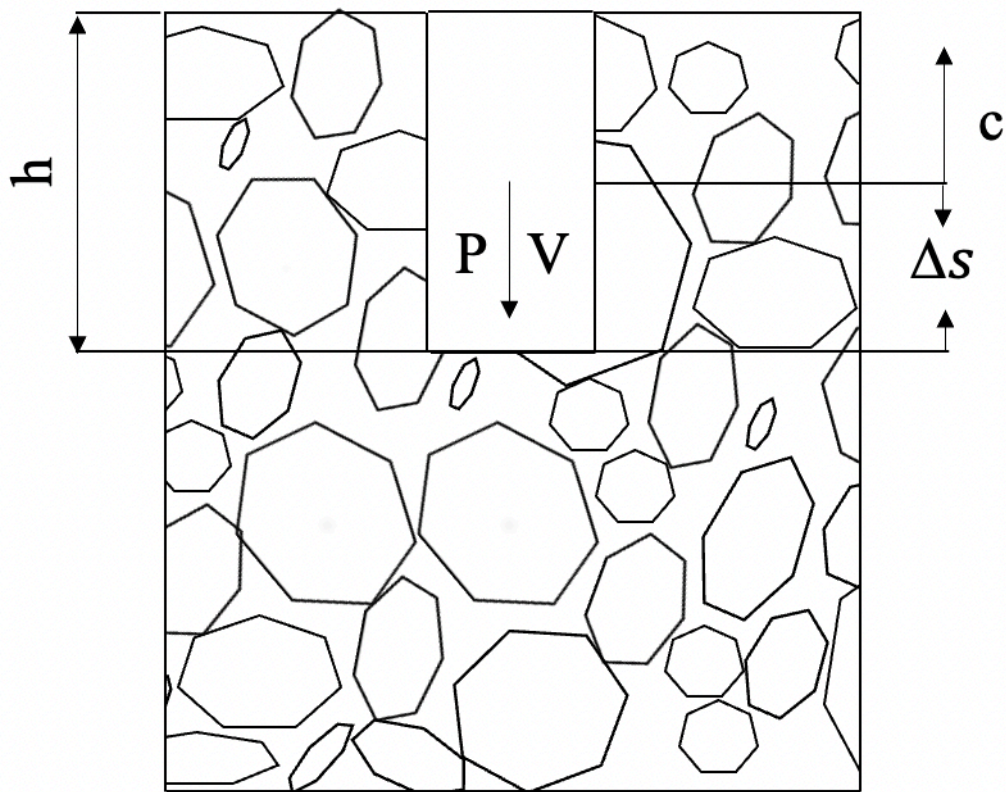


Рисунок 5.2 – Схема, що ілюструє передачу тиску води в порах

Як показано на рис. 5.2, струмінь води з початковою швидкістю досягає дна пори і вдаряється об нього. За такої умови швидкість миттєво стає нульовою, тиск зростає від P до $P + \Delta P$, а на межі між P і $P + \Delta P$ утворюється хвиля стиснення (хвиля гідроудару). Припускається, що хвиля гідроудару поширюється від дна до Δs за час Δt .

Після того, як хвиля досягає дна пори, рівняння силового імпульсу, що керує потоком води, виражається наступним чином:

$$\rho \Delta s A(0 - v) = [P - (P + \Delta P)]\Delta t, \quad (5.7)$$

$$\Delta P = \rho v \frac{\Delta s}{\Delta t} = \rho v c, \quad (5.8)$$

де, c – швидкість, з якою поширюється гідрударна хвиля; v – початкова швидкість напірного потоку води під дією силового навантаження від шини колеса транспортного засобу; ρ – густина води; A – площа поперечного перерізу пори.

Для визначення тиску гідрудару ΔP необхідно спочатку визначити швидкість розповсюдження гідрударної хвилі c враховуючи, що ΔP прямо пропорційна c .

Коли тиск рідини збільшується на ΔP від P , густина рідини і площа поперечного перерізу пор певною мірою змінюються при вищих тисках; густина рідини збільшується на $\Delta \rho$ від ρ , а площа поперечного перерізу пор збільшується на ΔA від A .

Потік води в перерізі Δs під дією ΔP змінюється внаслідок розширення перерізу та стиснення рідини, внаслідок чого її маса збільшується порівняно з попереднім значенням. Збільшення води відбувається за рахунок вільної води, що поповнюється з верхньої частини під впливом напірного потоку, а її маса дорівнює $\rho v A \Delta t$, згідно із законом збереження маси:

$$\rho v A \Delta t = (\rho + \Delta \rho)(A + \Delta A)(c \Delta t) - \rho A(c \Delta t), \quad (5.9)$$

Спростивши рівняння і знехтувавши значеннями нескінченно малого порядку, отримаємо:

$$\rho v A = c(\rho \Delta A + A \Delta \rho), \quad (5.10)$$

$$v = c \left(\frac{\rho \Delta A + A \Delta \rho}{\rho A} \right) = c \left(\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right), \quad (5.11)$$

Позначимо $\left(\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right)$ через ΔP .

Враховуючи, що об'ємний модуль пружності рідини, позначений як K , що являє собою відношення напруження до деформації, можна встановити наступну залежність:

$$K = \frac{\Delta P}{\frac{\Delta v}{v}} = \frac{\Delta P}{\frac{\Delta \rho}{\rho}}, \quad (5.12)$$

Тому:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta P}{K}, \quad (5.13)$$

Для $\frac{\Delta A}{A}$, $A = \pi r^2$ отримано з діаметра циліндричної пори, що дорівнює $2r$.

$$\Delta A = \pi[(r + \Delta r)^2 - r^2] = 2\pi r \Delta r + \pi \Delta r^2, \quad (5.14)$$

Відкидаючи нескінченність вищого порядку, $\Delta A = 2\pi r \Delta r$, тому

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{2\Delta r}{r}, \quad (5.15)$$

Враховуючи, що E , модуль пружності твердого матеріалу, являє собою відношення між прикладеним напруженням і результуючою деформацією,

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\frac{\Delta r}{r}}, \quad (5.16)$$

Тому:

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta \sigma}{E}, \quad (5.17)$$

Відповідно до принципів механіки рідини прийнято, що коли рідина, яка перебуває в рівновазі, діє з силою на стінку трубопроводу, результуюче напруження $\Delta \sigma$ описується співвідношенням $\Delta \sigma = \frac{\Delta P r}{\xi}$. Отже:

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta P r}{E \xi}, \quad (5.18)$$

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta P r}{E \xi}, \quad (5.19)$$

Інтегруючи рівняння (5.19) та (5.13) у формулу, представлену рівнянням (5.11), отримуємо наступне співвідношення:

$$v = c \left(\frac{\Delta P 2r}{E \xi} + \frac{\Delta P}{K} \right) = c \frac{\Delta P}{K} \left(1 + \frac{2Kr}{E \xi} \right), \quad (5.20)$$

Таким чином, розрахунок тиску води в порі під впливом автомобільного навантаження може бути виражений наступним чином:

$$\Delta P = \frac{Kv}{c \left(1 + \frac{2Kr}{E \xi} \right)}, \quad (5.21)$$

У поєднанні зі статичним тиском води, присутнім на дні пори, тиск води

на дно пори можна сформулювати як:

$$P = \frac{Kv}{c(1 + \frac{2Kr}{E\xi})} + \rho gh, \quad (5.22)$$

Згідно з відповідними дослідженнями, швидкість поширення хвилі гідродару становить:

$$c = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{2Kr}{E\xi}}} \quad (5.23)$$

У рівняннях (5.22) і (5.23) K – об'ємний модуль пружності вільної води; E – модуль пружності асфальтобетону; ρ – густина рідини; r – радіус циліндричної пори. ξ відноситься до діапазону зміни тиску води на бокові стінки в результаті підвищеного тиску води в порі. Пору і зону впливу бокових стінок можна розглядати, як тиск води в асфальтобетонній порі циліндричної форми з товщиною стінки ξ .

Виходячи з попередніх розрахунків та аналізу, очевидно, що тиск води в порі нерозривно пов'язаний з декількома факторами, а саме: швидкістю потоку води, характеристиками матеріалів дорожнього одягу, особливостями динаміки потоку води, також діаметром і глибиною пори.

5.3 Експериментальна установка для моделювання гідродинамічного циклу розмиву

В останні роки в галузі досліджень водостійкості асфальтобетону спостерігається значний прогрес, особливо в методології випробувань. Цей прогрес насамперед характеризується все більшим використанням інноваційних приладів для вимірювання стійкості асфальтобетону до гідродинамічної водної ерозії розмиву та водостійкості, що є більш науковим і раціональним підходом порівняно з традиційними експериментами, зосередженими на дослідженні водостійкості асфальтобетону в статичному водному середовищі. Цей новий підхід дозволяє в більшій мірі зрозуміти реальний механізм пошкодження асфальтобетонних покриттів водою.

Спираючись на існуючі результати досліджень, розробили і виготовили випробувальну установку для імітації гідродинамічного розмиву. Розроблена установка відтворює гідродинамічні процеси руйнування, спричинені транспортними навантаженнями в режимі реального часу під час експлуатації асфальтобетонного покриття, змінюючи стан повітряного тиску в межах камери установки. Зокрема, установка забезпечує швидке нагнітання тиску та цикли створення вакууму. Змінюючи атмосферний тиск на поверхні зразка, він динамічно змінює внутрішній тиск води у порах, таким чином ефективно імітуючи вплив руйнуючої дії гідродару в структурі асфальтобетону. Як показано на рис. 5.3, лабораторна установка складається з герметичної ємкості, випробувальних зразків, системи для створення імпульсного тиску або вакууму та комп'ютеризованого механізму управління. На рис. 5.4 показано експериментальну установку для моделювання динамічного розмиву водою (гідродинамічного розмиву).

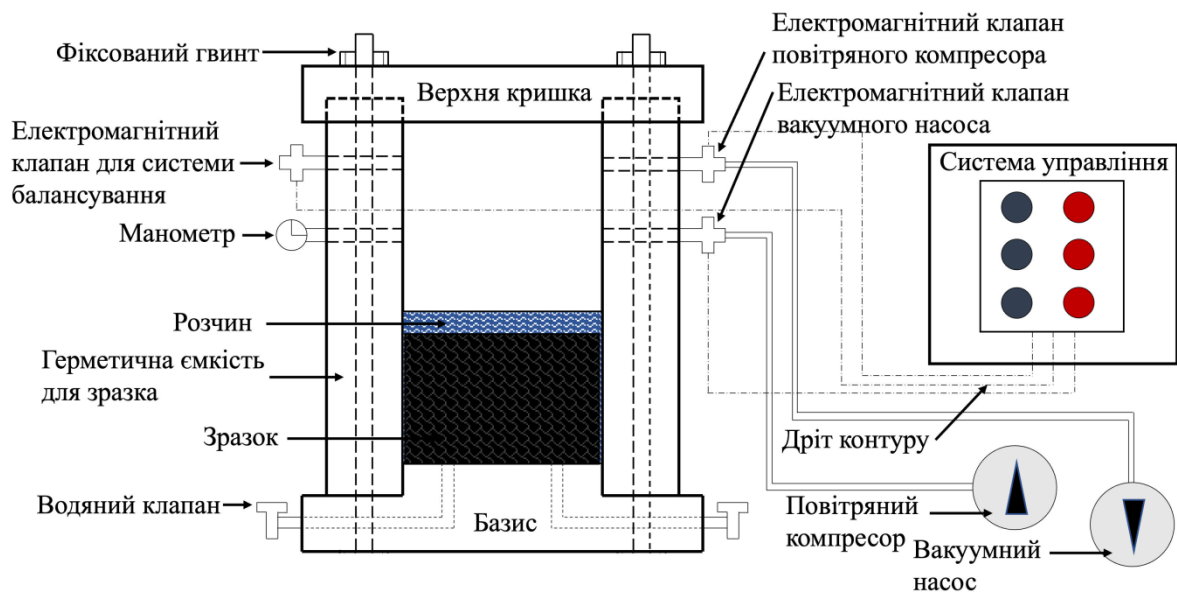


Рисунок 5.3 – Схема експериментальної установки для моделювання гідродинамічного розмиву

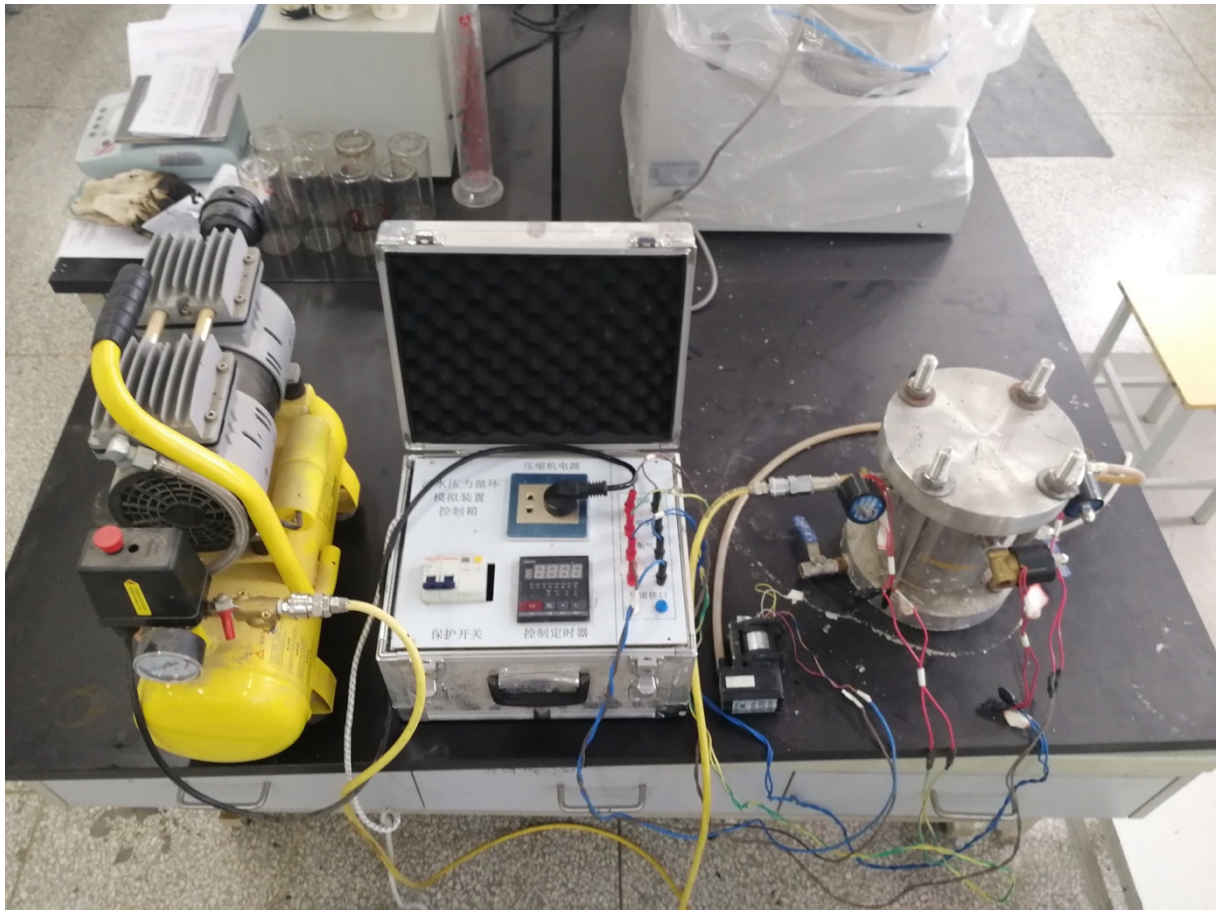


Рисунок 5.4 – Фото експериментальної установки для моделювання гідродинамічного розмиву

Як показано на рис. 5.3, герметична ємкість для гідродинамічного розмиву під час моделювання навантаження від транспортного засобу в основному складається з основи, циліндра і верхньої кришки. Основа посудини під тиском, циліндр і верхня кришка з'єднані між собою чотирма стяжними шпильками, які зафіксовані гайками на верхній кришці. Для того, щоб підвищити ефективність герметизації посудини під тиском, на поверхні контакту кожного компонента установки встановлені ущільнювальні кільця. Внутрішній діаметр герметичної посудини 102 мм, висота 100 мм, а внутрішній об'єм 314,43 см³. Герметична посудина через електроклапани з'єднана жорсткими трубопроводами з компресором, вакуумним насосом, балансувальними механізмами та приладами для вимірювання тиску. Це полегшує регулювання та зміну внутрішнього тиску, що відображає коливання позитивного та негативного динамічного тиску води, імітуючи навантаження

від автомобільних шин. Вся ємність виготовлена з нержавіючої сталі SUS316, яка має високу стійкість до корозії, тиску і температури. В діапазоні температур 0 - 100°C коефіцієнт її теплового розширення $17,3 \times 10^{-6} \text{ мм}^3$ на 1°C. Отже, при температурі 60°C лінійне подовження суцільного сталевого елемента довжиною 100 мм становить приблизно 0,0828 мм. Таким чином, деформація посудини є незначною за жорстких температурних умов випробувань дорожніх матеріалів, що задовольняє вимоги високотемпературних випробувань дорожніх матеріалів. Маючи параметр корозійної стійкості 25, посудина відповідає вимогам корозійної стійкості до стандартних сульфатних хімічних розчинів, що робить її придатною для проведення випробувань на водостійкість зразків з асфальтобетону під впливом розчинів солі.

Система тиску випробувального пристрою для гідродинамічної імітації розмиву складається з повітряного компресора, вакуумного насоса, манометра, системи балансування та електромагнітних клапанів відповідного каналу. Максимальний регульований тиск повітряного компресора становить 0,75 МПа, продуктивність 0,4 м³/хв, а потужність двигуна 4 кВт. Максимальна швидкість відкачування вакуумного насоса становить 6 л/с, граничний вакуумний тиск 0,08 МПа, а максимальна частота запуску та вимкнення - понад 1,8 мільйона разів. Він підходить для умов високої потужності, частого запуску та вимкнення, або тривалої безперервної роботи. Манометр з нержавіючої сталі, діапазон вимірювання: - 0,1 ~ + 1,2 МПа. Управління відкриттям і закриттям повітряного компресора, вакуумного насоса і зрівноважувального трубопроводу здійснюється за допомогою електромагнітних клапанів кожного проходу.

Система керування обладнанням для гідродинамічного розмиву водою, в основному, складається з трьох невід'ємних компонентів: системи електроживлення, захисного пристрою та контрольного датчика. Система електроживлення переважно контролює електроживлення напірного обладнання та відповідних електромагнітних клапанів трубопроводу, тим

самим опосередковано контролюючи запуск і зупинку кожного обладнання. Запобіжник захищає від перевантаження всієї схеми випробувальної установки. Коли система ланцюга перевантажена або має несправність, система електропостачання відповідного агрегату може бути вчасно відключена, щоб зупинити процес циркуляції. Система управління розроблена і запрограмована з використанням програмованого логічного контролера, який розподіляє і регулює електроживлення різного обладнання під тиском, і відповідних електромагнітних клапанів, за допомогою вбудованих програм. Контролер забезпечує налаштування тривалості позитивного і негативного тиску, часу переривання і буферного часу системи імітації тиску. Максимальна тривалість одноразової дії системи становить 99999 с, а максимальна кількість циклів – 9999.

5.4 Методика проведення дослідження впливу гідродинамічного розмиву розчинами протижеледних речовин на властивості асфальтобетону

Для гідродинамічного циклу розмиву розчинами протижеледних речовин були підготовлені 15% розчин сечовини ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$), 20% технічної солі (NaCl), 20% спирту ($\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$) та асфальтобетоні зразки АС–13 і АС–16. Весь процес циклу гідродинамічного розмиву полягає в наступному:

1) Помістити дослідний зразок асфальтобетону в посудину для імітації гідродинамічного тиску, залити підготовленим розчином протижеледної речовини, щоб висота розчину перевищувала висоту зразка на 2–3 мм, надіньте верхню кришку і затягніть її гайками.

2) Після встановлення кількості циклів імітації увімкніть перемикач і запустіть процес циклу промивання. Після встановлення часу моделювання увімкніть перемикач і запустіть процес циклу промивання.

3) Після завершення, заздалегідь заданої кількості циклів, пристрій автоматично зупиниться, після чого зразок виймати, розчин протижеледної

речовини вилити, а ємність очистити від залишків руйнування асфальтобетону.

Описаний вище процес є імітацією одного повного гідродинамічного циклу розмиву. Максимальна кількість циклів вимивання в цьому випробуванні становить 9000, а відповідні показники фіксуються при проходженні 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000 і 9000 циклів відповідно. Зразки асфальтобетону через кожних 1000 циклів проходили комплекс досліджень властивостей асфальтобетону. Комплекс проведених досліджень включає випробування на занурення у воду за Маршаллом, випробування на визначення границі міцності на розтяг при розколюванні та випробування на залишкову пористість. Дослідження проводити відповідно до стандарту "Стандартні методи випробувань асфальту та асфальтобетону для будівництва автомобільних доріг" (JTG E20–2011) [126]. Параметри тиску, змодельовані в цьому дослідженні, розподілені наступним чином: за фазою нагнітання тиску тривалістю 3 с наступає фаза вакууму тривалістю 3 с з інтервалом в 1 с, а потім цикли повторюються з інтервалом в 1 с між фазами [2].

5.5 Випробування зразків асфальтобетону на водостійкість після гідродинамічного впливу протижеледних речовин

Після гідродинамічного розмиву протижеледними розчинами зразків асфальтобетону обох типів, провівши випробування на занурення у воду за Маршаллом та на визначення границі міцності на розтяг при розколюванні, дослідили їх водостійкість.

При дослідженні зразків асфальтобетону АС–13 АС–16, на рис. 5.5 та 5.6, показано тенденції зміни водостійкості, яка характеризується залишковою стабільністю та швидкістю її втрати, що спостерігаються під час послідовних циклів гідродинамічного розмиву.

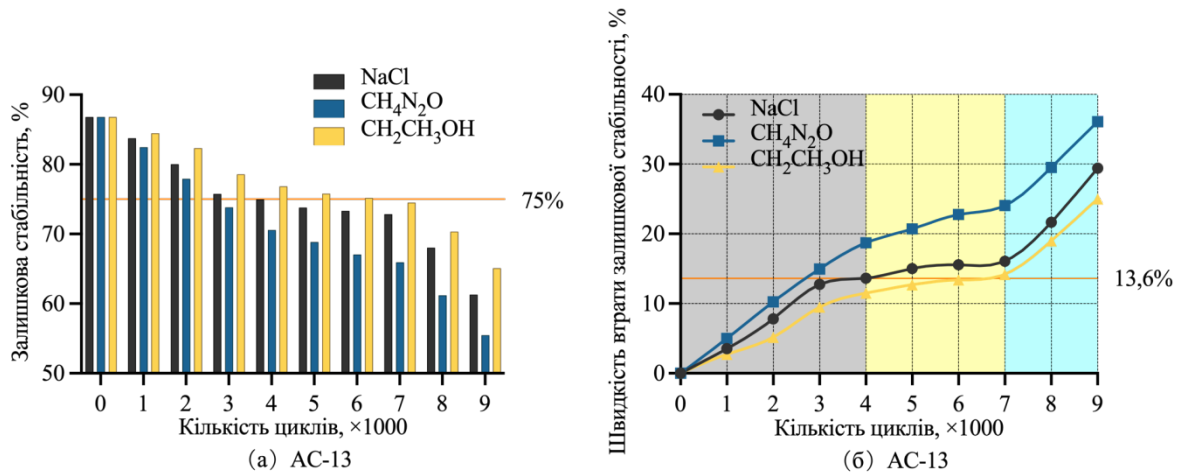


Рисунок 5.5 – Зміна залишкової стабільності та швидкість її втрати для зразків асфальтобетону АС – 13 при багаторазових циклах гідродинамічного розмиву

З рис. 5.5(a) видно, що для асфальтобетону АС–13 залишкова стабільність після впливу протижелезних речовин зменшується зі збільшенням кількості циклів гідродинамічного розмиву. CH₄N₂O має найбільший вплив на залишкову стабільність, трохи менший вплив має NaCl, а CH₂CH₃OH має мінімальний вплив на залишкову стабільність. Водночас залишкова стабільність під впливом CH₄N₂O після 3000 циклів становить 73,8 %, під впливом NaCl після 4000 циклів 74,9% і під впливом CH₂CH₃OH після 7000 циклів становить 74,5%. Так, як наведені значення залишкової стабільності менші 75 %, то вони не відповідають вимогам. З рисунка 5.5(б) можна зробити висновок, що після 9000 циклів швидкість втрати залишкової стабільності, пов'язана з впливом, CH₄N₂O NaCl і CH₂CH₃OH, становлять 36,1 % 29,4 %, і 25,0 % відповідно.

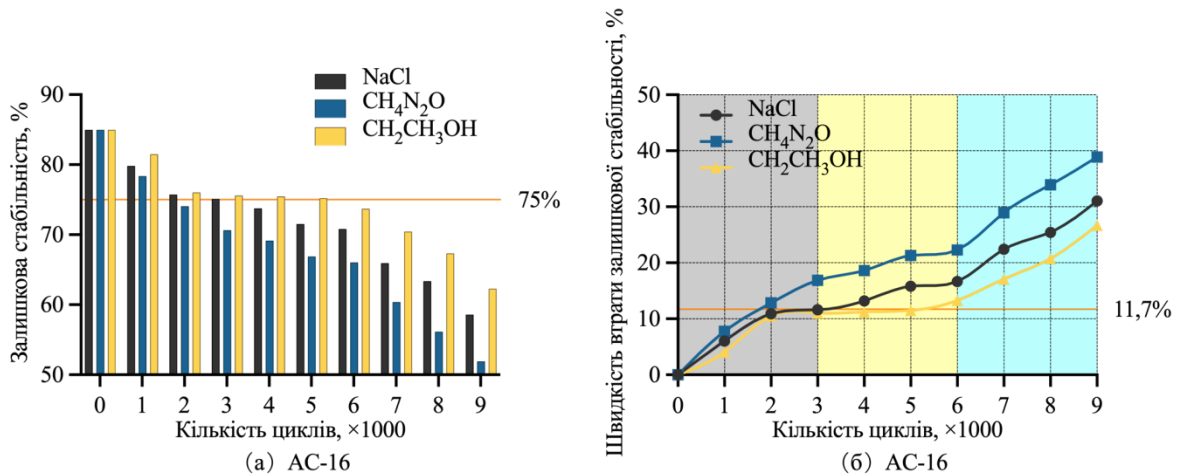


Рисунок 5.6 – Зміна залишкової стабільності та швидкість її втрати для зразків асфальтобетону АС–16 при багаторазових циклах гідродинамічного розмиву

З рис. 5.6(а) видно, що для асфальтобетону АС–16 залишкова стабільність, після впливу вибраних протижелезних речовин, зменшується зі збільшенням кількості циклів гідродинамічного розмиву. Найбільший вплив на залишкову стабільність має $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$, трохи менший вплив має NaCl , а мінімальний вплив на залишкову стабільність має $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$. Залишкова стабільність під впливом $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ становить 74,1% після 2000 циклі, 73,8% під впливом NaCl після 4000 циклів і 73,7% під впливом $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ після 6000 циклі, що не задовольняє вимогам. З рисунку 5.6(б) можна зробити висновок, що після 9000 циклів швидкість втрати залишкової стабільності, пов'язана з NaCl , $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ і $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$, становить 31,0%, 38,9% і 26,7% відповідно.

Основними характеристиками водостійкості асфальтобетону в умовах впливу протижелезних речовин, під час визначення границі міцності на розтяг при розколюванні, є коефіцієнт МРР та швидкість втрати коефіцієнта МРР.

Графічні залежності зміни коефіцієнта МРР та швидкості втрати коефіцієнта МРР для асфальтобетонів АС–13, АС–16 в результаті впливу послідовних циклів гідродинамічного розмиву наведені на рис. 5.7 та 5.8.

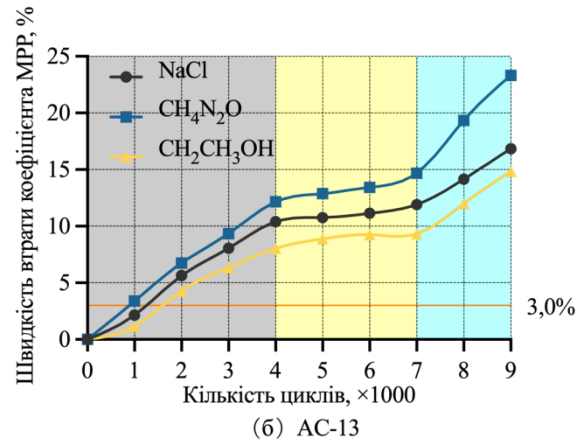
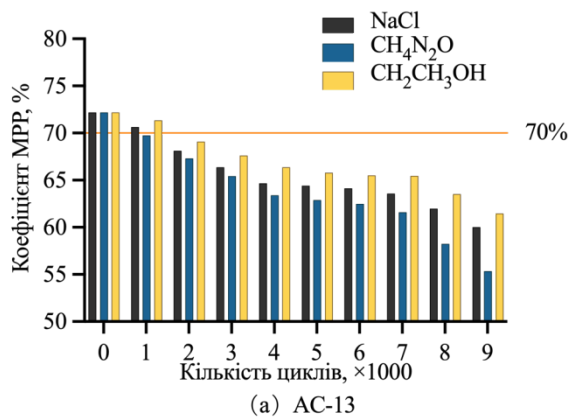


Рисунок 5.7 – Графічні залежності зміни коефіцієнта MRR та швидкості втрати коефіцієнта MRR для АС–13 в умовах гідродинамічних циклів розмиву

З рис. 5.7(а) видно, що для асфальтобетону АС–13 коефіцієнт MRR, після впливу протиожеледних речовин, має тенденцію до зменшення при збільшенні кількості циклів гідродинамічного розмиву. Найбільший вплив на коефіцієнт MRR має CH₄N₂O, помірний - NaCl, а найменший вплив має CH₂CH₃OH. Отже, після 1000 циклів коефіцієнт MRR під впливом CH₄N₂O становив 69,7%, після 2000 циклі під впливом NaCl та CH₂CH₃OH становив 68,1% та 69,1%, що не відповідає вимогам стандарту. З графічних залежностей рис. 5.7(б) можна зробити висновок, що після 9000 циклів швидкість втрати, пов'язана з NaCl, CH₄N₂O і CH₂CH₃OH, становить 16,8%, 23,3% і 14,8% відповідно.

З рис. 5.8(а) видно, що коефіцієнт MRR для асфальтобетону АС–16, після впливу розглянутих протиожеледних речовин, має тенденцію до зменшення при збільшенні кількості циклів гідродинамічного розмиву. Найбільший вплив на коефіцієнт міцності на розтяг при розколюванні має CH₄N₂O, помірний - NaCl, а найменший вплив - має CH₂CH₃OH. В той же час, коефіцієнт MRR під впливом CH₄N₂O після 2000 циклів становить 69,7%, під впливом NaCl після 4000 циклів відповідно 69,0%, а під впливом CH₂CH₃OH після 6000 циклів значення коефіцієнту становить 69,1%, що не відповідає вимогам.. З графіків рис 5.8 (б) можна зробити висновок, що після проведення 9000 циклів швидкість втрати коефіцієнта MRR, пов'язана з впливом NaCl, CH₄N₂O і

$\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$, становить 24,3%, 30,3% і 19,9% відповідно.

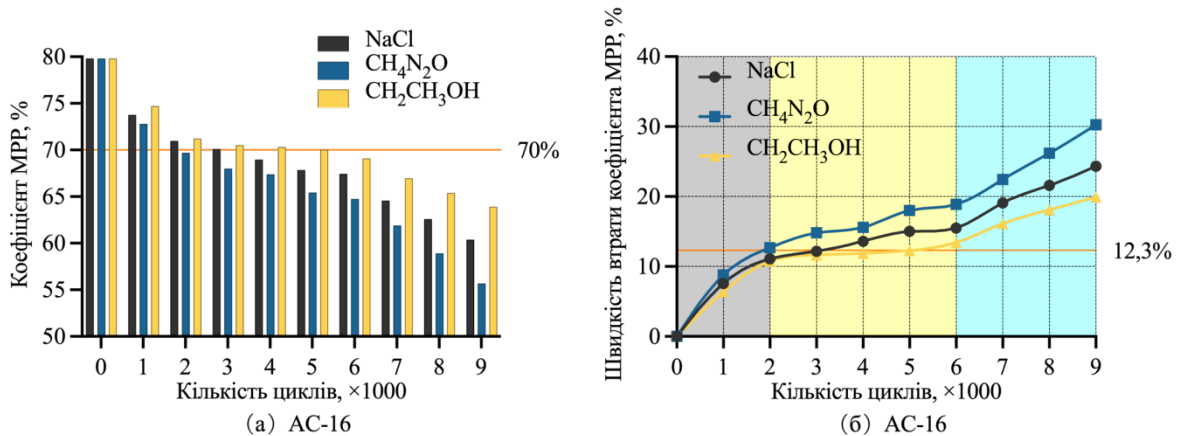


Рисунок 5.8 – Графічні залежності зміни коефіцієнта MPP та швидкості втрати коефіцієнта MPP для АС–13 в умовах гідродинамічних циклів розмиву

На рис. 5.5 (б), 5.6 (б), 5.7 (б) і 5.8 (б) для двох типів асфальтобетону і трьох видів протижеледних речовин показано відповідні графіки які демонструють динаміку початкового швидкого зростання, перехід до проміжного повільного зростання і, зрештою, подальше збільшення швидкості втрати коефіцієнта MPP. З огляду на ці спостереження, процес руйнування асфальтобетону можна розділити на три окремі етапи: фізичного гідродинамічного руйнування, хімічного руйнування та сумісного хіміко-гідродинамічного руйнування. На початковому етапі відбувається прискорене руйнування зразків асфальтобетону, що пояснюється, здебільшого, динамічним процесом розмивання. Згідно з дослідженнями, фізичне руйнування асфальтобетону пояснюється швидким потоком протижеледних речовин в порах асфальтобетону під час етапу дифузії [140]. Під час цього етапу бітумна плівка схильна до незначних відшарування від зовнішньої частини заповнювача. Водночас мікротріщини починають розкриватися та з'єднуватися між собою під гідродинамічним впливом тиску протижеледних розчинів, тим самим прогресивно розвиваючись і спричиняючи різке збільшення пошкоджень. На наступному етапі, а саме хімічного руйнування,

поширення пошкоджень зразка зумовлені, переважно, ерозійною дією протижеледних речовин. Ерозія, спричинена розчинами протижеледних речовин, що проникають у пори та тріщини асфальтобетону, широко визнана як фактор, що сприяє руйнування асфальтобетону [141]. Під гідродинамічним тиском мікротріщини продовжують повільно розвиватися, а проникнення в них протижеледних речовин призводить до пошкоджень, тим самим поступово послаблюючи зв'язок між шаром бітуму і заповнювачем, що призводить до більш повільного зростання пошкоджень. На кінцевому етапі, через ерозійну дію протижеледних речовин, міцність зчеплення між бітумом і заповнювачем зменшується, відбувається значне утворення мікротріщин, а гідродинамічний тиск продовжує впливати на бітум і заповнювач, що в свою чергу призводить до розшарування між ними та пришвидшення руйнування асфальтобетону.

5.6 Дослідження залишкової пористості асфальтобетону при дії гідродинамічного впливу в середовищі протижеледних речовин

Залишкова пористість асфальтобетону є ключовим параметром у визначенні його експлуатаційних характеристик. Після численних ітерацій циклів гідродинамічного тиску, в табл. 5.2 наведено експериментальні дані щодо залишкової пористості двох складів асфальтобетону, які зазнали синергетичного впливу протижеледних речовин у поєднанні з гідродинамічним тиском. Водночас на рис. 5.9 показано динаміку збільшення залишкової пористості зразків асфальтобетону, що відображає кумулятивний вплив в процесі гідродинамічного тиску з використанням протижеледних речовин на пори асфальтобетону.

Таблиця 5.2 – Залишкова пористість асфальтобетону після впливу гідродинамічного тиску

| Кількість циклів гідродинамічного промивання | Залишкова пористість, % | | | | | |
|--|-------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-------|----------------------------------|------------------------------------|
| | АС-13 | | | АС-16 | | |
| | NaCl | CH ₄ N ₂ O | CH ₂ CH ₃ OH | NaCl | CH ₄ N ₂ O | CH ₂ CH ₃ OH |
| 0 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.2 | 4.2 | 4.2 |
| 1000 | 4.7 | 4.8 | 4.7 | 4.5 | 4.6 | 4.5 |
| 2000 | 5.1 | 5.2 | 5 | 4.8 | 5 | 4.8 |
| 3000 | 5.2 | 5.3 | 5.2 | 5.1 | 5.3 | 5 |
| 4000 | 5.3 | 5.5 | 5.3 | 5.2 | 5.5 | 5.1 |
| 5000 | 5.5 | 5.7 | 5.4 | 5.3 | 5.7 | 5.2 |
| 6000 | 5.9 | 6.2 | 5.8 | 5.7 | 6.3 | 5.6 |
| 7000 | 6.2 | 6.7 | 6.1 | 6.2 | 7 | 6 |
| 8000 | 6.4 | 6.9 | 6.2 | 6.4 | 7.3 | 6.2 |
| 9000 | 6.5 | 7.1 | 6.3 | 6.6 | 7.5 | 6.3 |

Як видно з табл. 5.2, обидва види асфальтобетону продемонстрували тенденцію до зростання відносної залишкової пористості після багаторазового впливу гідродинамічного розмиву. Незважаючи на початкову мінімальну залишкову пористість, як для АС-13, так і для АС-16, її зміна після розмиву становить приблизно 47% для АС-13 і 62% для АС-16, що підкреслює значний вплив процесу гідродинамічного розмиву. З трьох досліджуваних протижеледних речовин, найбільш виражений вплив на відносну залишкову пористість має CH₄N₂O, потім NaCl, а найменший вплив демонструє CH₂CH₃OH. Збільшення відносної залишкової пористості в АС – 16 помітно вище порівняно з АС-13. Кулей та ін. [142] стверджують, що залишкова пористість в діапазоні 8% - 12% в асфальтобетонах спричиняє значне збільшення проникності, тим самим посилюючи вплив гідродинамічного розмиву. Стандартна залишкова пористість в реальних умовах будівництва доріг часто перевищує залишкову пористість зразків ущільнених в лабораторних умовах, незважаючи на те, що максимальна відносна залишкова пористість після 9000 циклів гідродинамічного розмиву не перевищує 7,5%. Дане дослідження доводить, що сукупний вплив протижеледних речовин і гідродинамічного тиску від транспортних засобів призводить до подальшого

погіршення експлуатаційних характеристик асфальтобетону.

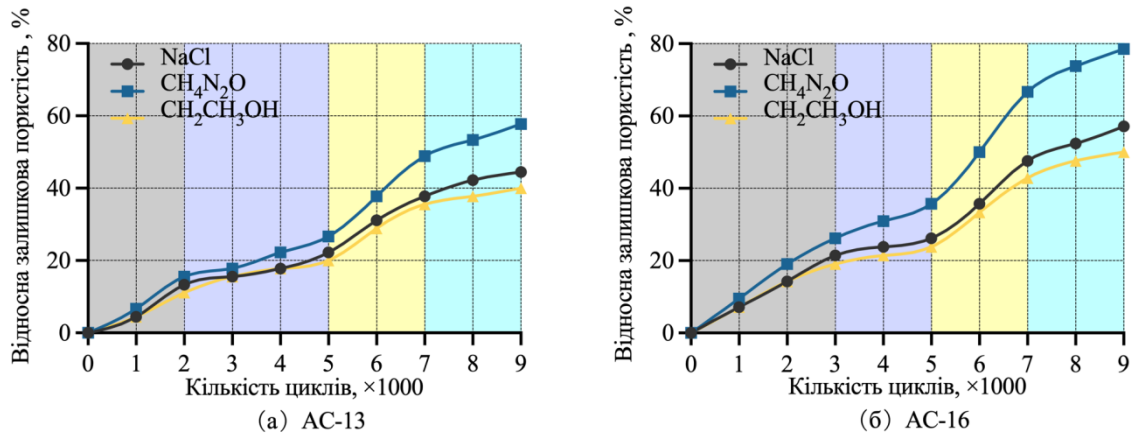


Рисунок 5.9 – Залежність відносної залишкової пористості від кількості циклів динамічного промивання

Порівнюючи зростання відносної залишкової пористості АС–16 та АС – 13 (рис. 5.9), встановлено, що більше зростання відносної залишкової пористості демонструє АС–16. На кривих на рисунку 5.9(а), так і на рисунку 5.9(б) спостерігаються два яскраво виражені "піки", що свідчить про нерівномірне зростання відносної залишкової пористості. На початковому етапі (0–2000 циклів для АС–13; 0–3000 циклів для АС–16), який називають етапом розкриття мікротріщин, існуючі дослідження показують, що під час процесу гідродинамічного впливу закриті пори мають тенденцію до поступового відкриття [143]. Отже, на цьому етапі гідродинамічний вплив спричиняє утворення великої кількості мікротріщин у тонкій бітумній плівці, яка обволікає поверхню заповнювачів. Це призводить до утворення нових відкритих пор і викликає прискорене збільшення залишкової пористості. На наступному етапі (2000–5000 циклів для АС–13; 3000–5000 циклів для АС–16), який називається етапом з'єднання пор, постійне динамічне розмивання сприяє проникненню протижелезних речовин в мікротріщини асфальтобетону. Дані вказують на те, що проникнення протижелезних речовин призводить до руйнування пор в асфальтобетоні [144]. Під час цього

етапу ерозія, спричинена протижеледними речовинами, призводить до пошкодження бітумної плівки без значного утворення нових відкритих пор, що призводить до повільнішого прогресування коефіцієнту пустотності. Третій етап (5000–7000 циклів) - етап розвитку мікротріщин, коли подвійний вплив ерозії протижеледними речовинами та гідродинамічного розмиву призводить до значного збільшення кількості нових відкритих пор. Збільшення залишкової пористості під час цього етапу перевищує її значення в попередньому етапі. Заключний етап (7000–9000 циклів) - перехід до етапу з'єднання пор між собою. На цьому етапі тонка бітумна плівка переважно пошкоджена, проте деякі, плівки більшої товщини, все ще поступово руйнуються під комбінованим впливом протижеледної речовини та динамічної ерозії. Це призводить до утворення нових відкритих пор та їх об'єднання.

На основі кількісного аналізу залишкової пористості, залишкової стабільності та коефіцієнта MPP виявлено, що серед трьох розчинів протижеледних речовин, $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ має найбільш значний вплив на водостійкість. Це, ймовірно, пов'язано хімічними властивостями $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$, які посилюють ерозію асфальтобетону [145]. Щодо NaCl , то він має помірний вплив на водостійкість. Згідно з дослідженнями Цен [130], хлористі солі сприяють утворенню нестійкої, водорозчинної аморфної плівки на поверхні бітуму, руйнуючи пористу структуру, тим самим знижуючи водостійкість асфальтобетону. Натомість, $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ має порівняно менший вплив. Літературні дані свідчать, що хімічна взаємодія та дифузія між спиртом і бітумним в'язучим, сприяють структурному руйнуванню асфальтобетону [131], що пояснює незначне зниження водостійкості. Крім того, швидкість зниження водостійкості АС–16 помітно вища, ніж АС–13. Ця різниця потенційно пов'язана з композиційним складом двох асфальтобетонів. АС–13 має вищий відсоток дрібного заповнювача порівняно з АС–16. Отже, отримані дані вказують на те, що дрібний заповнювач має переважно більший вплив на розшарування асфальтобетону в порівнянні з крупним [146], [147].

5.7 Дисперсійний аналіз оцінки значущості факторів на характеристики асфальтобетону в умовах гідродинамічного розмиву

Дисперсійний аналіз (ANOVA) - це метод статистичного аналізу, основна ідея якого полягає в аналізі вибірових даних під впливом різних факторів, обчисленні дисперсії кожної вибірки та порівнянні її з дисперсією випадкової похибки. Порівняння та аналіз впливу кожного з факторів на розподіл вибірових даних дозволяє визначити їх значущість. Значення двох видів спостережуваних даних відрізняються через вплив різних факторів і випадковість вибірки. Вплив обох факторів можна виміряти двома різними дисперсіями. Дисперсія відмінностей, що виникає під впливом різних факторів, називається дисперсією між рівнями, а дисперсія відмінностей, що виникають внаслідок випадковості вибірки - дисперсією в межах рівнів. Причому дисперсія між рівнями включає відмінності, що виникають як під впливом факторів, так і випадковості вибірки, тоді як дисперсія в межах рівнів - лише відмінності, що виникають внаслідок випадковості вибірки. Отже, можна побачити, що дисперсія між рівнями включає в себе дисперсію в межах рівнів. Таким чином, обчислюючи співвідношення дисперсії між цими двома показниками, можна порівняти та проаналізувати, наскільки вплив кожного з факторів є більш значущим. Якщо співвідношення міжрівневої дисперсії до внутрішньорівневої близьке до 1 - означає, що фактори не впливають на дані вибірки, а відмінності в даних пояснюються лише випадковістю вибірки. Коли співвідношення між цими двома показниками набагато більше за 1 - означає, що вплив факторів на експериментальні дані є значним. Зазвичай на основі встановленого критичного значення, коли це співвідношення досягає певного критичного значення, можна судити про те, що існує значна різниця між двома дисперсіями.

Результати дисперсійного аналізу для кожного з факторів, що впливають на залишкову стабільність, представлені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Дисперсійний аналіз факторів, що впливають на залишкову стабільність

| Джерело дисперсії | Тип III Сума квадратів | DF(ступені свободи) | Середнє квадратичне | F-значення | P-значення |
|--|------------------------|---------------------|---------------------|------------|------------|
| Кількість циклів гідродинамічного промивання | 3369.286 | 9 | 374.365 | 115.961 | 0 |
| Типи асфальтобетону | 134.588 | 1 | 134.588 | 41.689 | 0 |
| Вид розчин протижелезної речовини | 395.909 | 2 | 197.954 | 61.317 | 0 |

Як видно з табл. 5.3, P-значення, пов'язані з різними факторами впливу на залишкову стабільність асфальтобетону, є нижчими за 0,001, що свідчить про те, що кількість циклів гідродинамічного розмиву, тип асфальтобетону та вид розчину протижелезної речовини суттєво впливають на залишкову стабільність асфальтобетону. Крім того, статистичне F-значення вказує на те, що найбільший вплив на залишкову стабільність має кількість циклів гідродинамічного розмиву, менш значущим фактором - вид розчину протижелезної речовини, а найменше вплив має тип асфальтобетону.

Результати дисперсійного аналізу, проведеного для визначення впливу основних факторів на міцність розтягу при розколюванні, наведені в табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – Дисперсійний аналіз оцінки основних факторів впливу на міцність розтягу при розколюванні

| Джерело дисперсії | Тип III Сума квадратів | DF(ступені свободи) | Середнє квадратичне | F-значення | P-значення |
|--|------------------------|---------------------|---------------------|------------|------------|
| Кількість циклів гідродинамічного промивання | 1262.597 | 9 | 140.289 | 66.896 | 0 |
| Типи асфальтобетону | 133.804 | 1 | 133.804 | 63.803 | 0 |
| Вид розчин протижелезної речовини | 114.24 | 2 | 57.12 | 27.237 | 0 |

Як показано в табл. 5.4, P-значення для різних факторів впливу на коефіцієнт MPP асфальтобетону є нижчими 0,001, що свідчить про те, що

кількість циклів гідродинамічного розмиву, тип асфальтобетону та розчин протижеледної речовини помітно впливають на коефіцієнт MPP асфальтобетону. Статистичне F-значення також вказує на те, що кількість циклів гідродинамічного розмиву має найбільший вплив на коефіцієнт MPP, тип асфальтобетону чинить менший вплив, а вид розчину протижеледної речовини має найменший вплив.

Результати дисперсійного аналізу, проведеного для різних факторів впливу на залишкову пористість, занесенні в табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Дисперсійний аналіз впливу окремих факторів на залишкову пористість

| Джерело дисперсії | Тип III Сума квадратів | DF(ступені свободи) | Середнє квадратичне | F-значення | P-значення |
|--|------------------------------|------------------------|------------------------|------------|------------|
| Кількість циклів гідродинамічного промивання | 35.96 | 9 | 3.996 | 106.882 | 0 |
| Типи асфальтобетону | 0.096 | 1 | 0.096 | 2.568 | 0 |
| Вид розчин протижеледної речовини | 2.197 | 2 | 1.098 | 29.385 | 0 |

Як показано в табл. 5.5, P-значення для різних факторів впливу на залишкову пористість асфальтобетону є нижчими 0,001, що свідчить про те, що кількість циклів гідродинамічного впливу, тип асфальтобетону та вид розчину протижеледної речовини мають значний вплив на залишкову пористість асфальтобетону. Відповідно до статистичного значення F, основним фактором, що впливає на залишкову пористість, є кількість циклів гідродинамічного розмиву, менший вплив має вид розчину протижеледної речовини, а тип асфальтобетону - мінімальний вплив.

5.8 Висновки до розділу 5

У даному розділі представлено детальний аналіз впливу

гідродинамічного тиску на дорожнє покриття за спрощених умов, зосереджуючи особливу увагу на варіаціях та основних механізмах, на які впливає присутність вільної рідини на поверхні дорожнього одягу. Створено спрощену модель, яка описує тиск рідини в порах під дією транспортного навантаження, що полегшує розрахунок тиску рідини в порах та аналіз впливу основних факторів. Було проведено серію гідродинамічних циклів розмиву з використанням трьох розчинів протижеледних речовин на зразки асфальтобетонів АС–13 і АС–16 для вивчення зміни водостійкості та залишкової пористості. Вичерпні результати були отримані після аналізу експериментальних даних, отриманих під час випробування на занурення у воду за Маршаллом, визначення границі міцності на розтяг при розколюванні та залишкову пористість, що дозволило зробити наступні висновки:

1. На основі проведеного теоретичного аналізу визначення гідродинамічного тиску у сполучених порах, розроблена методика та виготовлена лабораторна установка для дослідження зміни характеристик асфальтобетонних зразків при гідродинамічному впливі. Виявлено, що сумісна дія протижеледних речовин та гідродинамічного розмиву суттєво впливає на короткострокові зміни експлуатаційних характеристик асфальтобетону.

2. Сумісна дія протижеледних речовин та гідродинамічного розмиву суттєво впливає на короткострокові зміни експлуатаційних характеристик асфальтобетону. Отримані показники оцінки водостійкості при застосуванні різних протижеледних речовин знаходяться нижче мінімального значення, визначеного нормативними документами, після ранніх або середніх стадій гідродинамічного розмиву.

3. Аналіз даних показує, що на першому етапі пошкодження асфальтобетону, гідродинамічний розмив діє переважно шляхом фізичного розмиву зв'язків між бітумом і заповнювачем, створюючи та розширюючи мікротріщини та спричиняючи відшарування заповнювача. На другому етапі, основним фактором погіршення властивостей асфальтобетону є дія

протиожеледних речовин за рахунок хімічної корозії бітумного в'язучого. На третьому етапі, зниження адгезійної міцності між бітумом і заповнювачем обумовлено сумісним хіміко-гідродинамічним руйнуванням асфальтобетону.

4. Аналіз впливу трьох протиожеледних речовин показує, що $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ має найбільший вплив на короткочасне пошкодження асфальтобетону, потім NaCl , тоді як $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ має найменший вплив. Аналізуючи експериментальні дані двох типів асфальтобетонів, очевидно, що АС-13 менше пошкоджується при комбінованій дії протиожеледних речовин і гідродинамічного впливу порівняні з АС-16. Том що, збільшення частки дрібного заповнювача в асфальтобетоні підвищує його стійкість до руйнування рідиною.

5. Результати дисперсійного аналізу вказують на те, що кількість циклів гідродинамічного розмиву є основним фактором, що впливає на швидке руйнування асфальтобетону.

РОЗДІЛ 6

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІНИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ ДОРІГ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ПРОТИОЖЕЛЕДНИХ РЕЧОВИН НА ОСНОВІ GREY THEORY

Запропонована китайським академіком, професором Денг Джулонг (Deng Ju-Long) [129] у 1982 році теорія сірих систем (Grey System Theory) представляє інноваційну методологію для вирішення проблем невизначеності, пов'язаних з обмеженими даними та недостатньою інформацією. Ця теорія передусім фокусується на невизначених системах, що характеризуються "малими розмірами вибірки" і "неповною інформацією", де "часткова інформація відома" і "часткова інформація невідома", з метою отримання вагомих висновків з фрагментарних відомих даних. Це може бути використано як математичний метод для вивчення питань невизначеності, що виникають через обмеженість даних та недостатність інформації.

6.1 Основні принципи моделі прогнозування GM (1,N)

Дискретну функцію відгуку, як ядро прогнозування моделі Grey Method, яка є приблизно експоненціально регулярною, можна використати для побудови моделі GM(1,N), задавши $X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$ як вихідну невід'ємну послідовність, а $X^{(1)}(k)$ – як кумулятивну послідовність, тобто

$$X^{(1)}(k) = \sum_{m=1}^k X^{(0)}(m), k = 1, 2, \dots, n, \quad (6.1)$$

Диференціальне рівняння, виведене для моделі GM(1, N), має вигляд:

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = u, \quad (6.2)$$

У рівнянні (6.2) a – коефіцієнт розвитку; u – коефіцієнт сірих варіантів.

$$X^{(0)}(k) + aZ^{(1)}(k) = u, \quad (6.3)$$

Диференціальне рівняння згідно теорії сірих систем для моделі GM(1,N),

а $Z^{(1)}(k)$ – базове значення для моделі GM(1,N).

$$Z^{(1)}(k) = \frac{X^{(1)}(k) + X^{(1)}(k-1)}{2}, k = 2, 3, \dots, n, \quad (6.4)$$

Задавши параметр, для розпізнавання $\hat{a} = \begin{pmatrix} a \\ u \end{pmatrix}$, застосування методу найменших квадратів дає

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T y, \quad (6.5)$$

У формулі:

$$B = \begin{bmatrix} -Z^{(1)}(2) & 1 \\ -Z^{(1)}(3) & 1 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ -Z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[X^{(1)}(1) + X^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[X^{(1)}(2) + X^{(1)}(3)] & 1 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ -\frac{1}{2}[X^{(1)}(n-1) + X^{(1)}(n)] & 1 \end{bmatrix},$$

$$y = \begin{bmatrix} X^{(0)}(2) \\ X^{(0)}(3) \\ \dots \\ X^{(0)}(n) \end{bmatrix},$$

Після отримання оцінок параметрів, розв'язання диференціального рівняння (6.2) дає

$$\hat{X}^{(1)} = ce^{-at} + \frac{u}{a}, \quad (6.6)$$

де c – константа, яку потрібно визначити.

Тобто

$$\hat{X}^{(1)}(k+1) = ce^{-ak} + \frac{u}{a}, k = 0, 1, 2, \dots, n-1, \quad (6.7)$$

Виберемо початкове значення $\hat{X}^{(1)}(1) = X^{(0)}(1)$, тоді $\hat{X}^{(1)}(1) = c + \frac{u}{a} = X^{(0)}(1)$, отримаємо $c = X^{(0)}(1) - \frac{u}{a}$.

Введення c в рівняння 6.6 дає результат:

$$\hat{X}^{(1)}(k+1) = \left(X^{(0)}(1) - \frac{u}{a}\right) e^{-ak} + \frac{u}{a}, k = 0, 1, 2, \dots, n-1, \quad (6.8)$$

$\hat{X}^{(1)}(k+1)$ – прогнозоване сумарне значення, яке зводиться до:

$$\hat{X}^{(0)}(k+1) = \hat{X}^{(1)}(k+1) - \hat{X}^{(1)}(k), k = 1, 2, \dots, n, \quad (6.9)$$

6.2 Удосконалення моделі прогнозування GM(1,N)

З рівняння (6.8) видно, що точність прогнозування моделі GM(1,N) залежить від значень параметрів a і u та початкового значення $X^{(0)}(1)$, а значення параметрів a і u залежать від вихідної послідовності даних та базового значення $Z^{(1)}(k)$. Тому, раціональність формули побудови базового значення безпосередньо впливає на точність прогнозування моделі. Традиційний розрахунок базового значення у дійсності використовує формулу трапеції в чисельному інтегруванні: $Z^{(1)}(k) = 0.5(X^{(1)}(k) + X^{(1)}(k - 1))$. Однак, як показано на рис. 6.1, фактичне значення має дорівнювати площі, яка обмежена кривою $X^{(1)}(t)$ на відрізку $[j, j + 1]$ та віссю t . Заштрихована частина на рисунку - це похибка між традиційним і реальним базовим значенням, яка є основною причиною похибки в традиційній моделі.

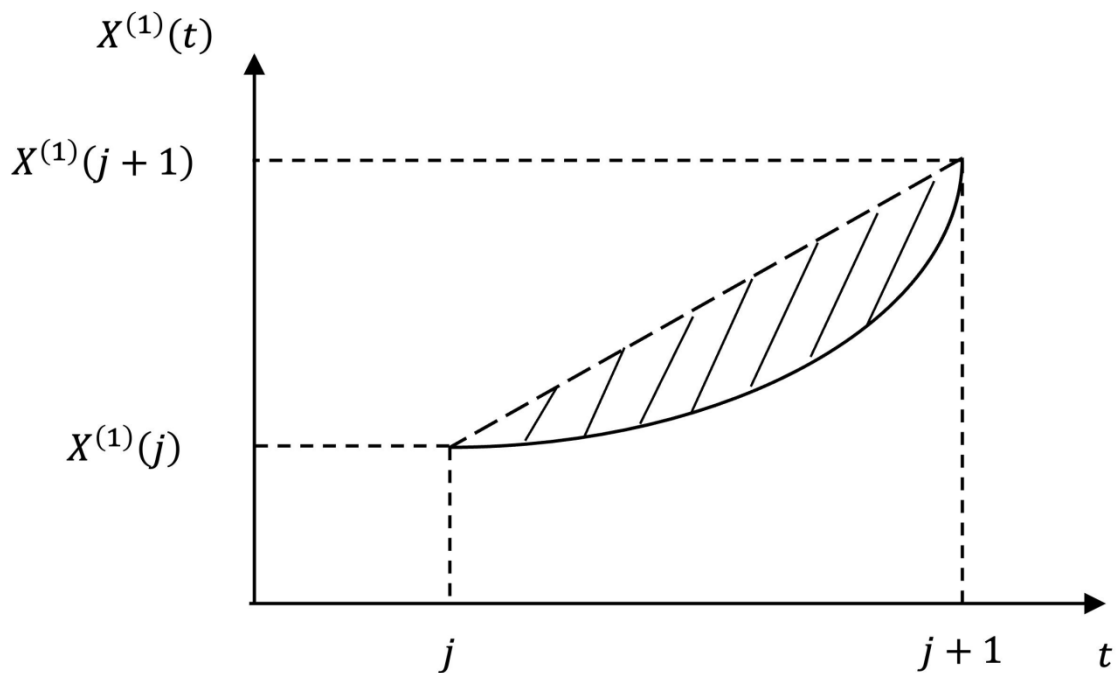


Рисунок 6.1 – Порівняння реальних базових значень з традиційними

Сумарна послідовність $X^{(1)}(k)$, для GM(1, N), диференціальне рівняння має наступний вигляд

$$\frac{dX(t)^{(0)}}{dt} + aX(t)^{(1)} = u, \quad t \in [0, \infty), \quad (6.10)$$

Проінтегрувавши наведене вище рівняння на проміжку $[j, j+1]$, отримаємо:

$$X^{(1)}(j+1) - X^{(1)}(j) + a \int_j^{j+1} X^{(1)}(t) dt = u, \quad (6.11)$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, m-1,$$

У даній точці $Z^{(1)}(t)$ є базовим значенням $X^{(1)}(t)$, апроксимованим за допомогою формули Сімпсона і діленням $[j, j+1]$ на 2 рівні частини, щоб знайти значення $Z^{(1)}(j+1)$:

$$Z^{(1)}(j+1) = \frac{1}{12} [X^{(1)}(j) + X^{(1)}(j+1) + 2X^{(1)}(j + \frac{1}{2}) + 4X^{(1)}(j + \frac{1}{4}) + 4X^{(1)}(j + \frac{3}{4})], \quad (6.12)$$

Тоді рівняння набуде наступного вигляду:

$$\int_j^{j+1} X^{(1)}(t) dt = Z^{(1)}(j+1) = \frac{1}{12} [X^{(1)}(j) + X^{(1)}(j+1) + 2X^{(1)}(j + \frac{1}{2}) + 4X^{(1)}(j + \frac{1}{4}) + 4X^{(1)}(j + \frac{3}{4})], \quad (6.13)$$

Підставивши його у рівняння (6.11), отримаємо

$$X^{(0)}(j+1) = -aZ^{(1)}(j+1) + u, \quad j = 1, 2, 3, \dots, m-1, \quad (6.14)$$

$X^{(1)}(j)$ розглядається як неперервна функція, для $X^{(1)}(j + \frac{1}{2}), X^{(1)}(j + \frac{1}{4}), X^{(1)}(j + \frac{3}{4})$ потім обчислюємо значення $Z^{(1)}(j+1)$. За допомогою методу найменших квадратів можна знайти $X^{(1)}(j)$ як значення будь-якої точки неперервної функції. Таким чином отримаємо значення $Z^{(1)}(j+1)$.

Рівняння (6.14) представимо у вигляді матриці:

$$\begin{bmatrix} X^{(0)}(2) \\ X^{(0)}(3) \\ X^{(0)}(4) \\ \vdots \\ X^{(0)}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Z^{(0)}(2) & 1 \\ -Z^{(0)}(3) & 1 \\ -Z^{(0)}(4) & 1 \\ \vdots & \\ -Z^{(0)}(n) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix}, \quad (6.15)$$

Нехай

$$Y^n = [X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \dots, X^{(0)}(n)]^T,$$

$$B = \begin{bmatrix} -Z^{(1)}(2) & 1 \\ -Z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \\ -Z^{(0)}(n) & 1 \end{bmatrix}, \quad (6.16)$$

Вектор параметрів, що оцінюється, $\hat{a} = \begin{pmatrix} a \\ u \end{pmatrix}$, входить до рівняння (6.5) і може бути знайдений методом найменших квадратів для знаходження

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y^n, \quad (6.17)$$

Підставивши рівняння (6.13) у рівняння (6.10), отримаємо $X^{(1)}(t)|_{t=1} = X^{(1)}(1)$ тоді:

$$\hat{X}^{(1)}(t) = [X^{(0)}(1) - \frac{u}{a}]e^{-a(t-1)} + \frac{u}{a}, \quad (6.18)$$

На цьому етапі сумарне рівняння $\hat{X}^{(1)}(j)$ можна обчислити наступним чином:

$$\hat{X}^{(1)}(j+1) = (X^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{-aj} + \frac{u}{a}, \quad (6.19)$$

Після скорочення можна обчислити прогнозовані початкові значення $\hat{X}^{(0)}(j)$:

$$\begin{aligned} \hat{X}^{(0)}(1) &= X^{(0)}(1), \\ \hat{X}^{(0)}(j+1) &= \hat{X}^{(1)}(j+1) - \hat{X}^{(1)}(j), \\ &= (1 - e^a)[X^{(0)}(1) - \frac{u}{a}]e^{-aj}, \end{aligned} \quad (6.20)$$

Назвемо удосконалену модель - моделлю прогнозування NPGM(1,N).

6.3 Перевірка точності та адекватності моделі прогнозування NPGM(1,N)

6.3.1 Порівняння точності моделі NPGM(1,N) з моделлю GM(1,N)

На основі значень залишкової стабільності і залишкової пористості, наведених у розділі 5, було розроблено дві моделі прогнозування. Відповідно результати прогнозування та значення похибок, розраховані за допомогою програми Python, наведено в табл. 6.1 і 6.2.

Таблиця 6.1 – Порівняння розглянутих математичних моделей прогнозування залишкової стабільності за її відносними похибками

| Експериментальні значення залишкової стабільності | Прогнозовані значення залишкової стабільності моделі GM(1,N) | Відносна похибка залишкової стабільності моделі GM(1,N) | Прогнозовані значення залишкової стабільності моделі NPGM(1,N) | Відносна похибка залишкової стабільності моделі NPGM(1,N) |
|---|--|---|--|---|
| 86.81 | 86.81 | 0 | 86.81 | 0 |
| 84.45 | 84.312433 | 0.16289767 | 84.09129 | 0.42476021 |
| 82.32 | 81.77546 | 0.66149196 | 81.86554 | 0.55206511 |
| 78.57 | 79.897838 | 1.69000634 | 79.6987 | 1.43655339 |
| 76.84 | 77.777993 | 1.22070887 | 77.58921 | 0.97502603 |
| 75.79 | 76.614391 | 1.08773061 | 75.53556 | 0.33571711 |
| 75.19 | 73.705541 | 1.97427751 | 73.53627 | 2.19940152 |
| 74.5 | 71.749989 | 3.69128972 | 71.58989 | 3.90618792 |
| 70.33 | 69.246322 | 1.54084718 | 69.69503 | 0.90284374 |
| 65.1 | 67.993163 | 4.44418307 | 67.35032 | 3.45671275 |

З табл. 6.1 видно, що середнє значення відносної похибки даних залишкової стабільності, спрогнозованих моделлю GM(1,N), становить 1,64%, а максимальнє значення похибки 4,44%. Тоді як середнє значення відносної похибки даних, спрогнозованих моделлю NPGM(1,N), становить 1,37%, а максимальнє значення похибки 3,50%, причому дані, спрогнозовані моделлю NPGM(1,N) точніші на 16% ніж за допомогою моделі GM(1,N).

Як видно з табл. 6.2, середнє значення відносної похибки даних залишкової пористості, спрогнозованих моделлю GM(1,N), становить 1,49%, максимальнє значення похибки 2,45%. Середнє значення відносної похибки даних, спрогнозованих моделлю NPGM(1,N), становить 1,29%, водночас максимальнє значення похибки 2,0 %. Тоді як дані, спрогнозовані моделлю NPGM(1,N) мають більшу точність на 13% ніж за допомогою моделі GM(1,N).

Отже, це підтверджує більш вищу точність удосконаленої моделі NPGM(1,N), в порівнянні з моделлю GM(1,N).

Таблиця 6.2 – Порівняння розглянутих математичних моделей прогнозування залишкової пористості за її відносними похибками

| Експериментальні значення залишкової пористості | Прогнозовані значення залишкової пористості моделі GM(1,N) | Відносна похибка залишкової пористості моделі GM(1,N) | Прогнозовані значення залишкової пористості моделі NPGM(1,N) | Відносна похибка залишкової пористості моделі NPGM(1,N) |
|---|--|---|--|---|
| 4.5 | 4.5 | 0 | 4.5 | 0 |
| 4.7 | 4.773009618 | 1.55339613 | 4.755104 | 1.172426 |
| 5 | 4.951957147 | 0.96085706 | 4.932732 | 1.34536 |
| 5.2 | 5.137613697 | 1.1997366 | 5.116996 | 1.596231 |
| 5.3 | 5.430230798 | 2.45718487 | 5.408142 | 2.040415 |
| 5.4 | 5.530069413 | 2.40869283 | 5.506429 | 1.970907 |
| 5.8 | 5.737400287 | 1.07930539 | 5.712123 | 1.515121 |
| 6.1 | 5.952504318 | 2.41796201 | 6.025501 | 1.221295 |
| 6.2 | 6.125672932 | 1.19882369 | 6.146849 | 0.857274 |
| 6.3 | 6.407208483 | 1.70172195 | 6.376466 | 1.213746 |

6.3.2 Перевірка адекватності моделі NPGM(1,N)

На основі вибраних значень залишкової стабільності та залишкової пористості, в розділі 5, була розроблена математична модель NPGM(1,N) (див. розд. 6.2) на основі даних випробувань 0–6000 гідродинамічних циклів рідини для прогнозування змін параметрів від 7000 до 9000 циклів. Потім точність спрогнозованих значень була порівняна з експериментальними даними випробувань в межах 7000–9000 циклів. Результати перевірки на адекватність моделі NPGM(1,N) для прогнозування залишкової стабільності та залишкової пористості наведені в табл. 6.3 та 6.4.

З табл. 6.3 видно, що похибки даних, спрогнозованих моделлю NPGM(1,N), в порівнянні з експериментальними даними становлять 3,01%, 0,23% та 4,11% відповідно, що є допустимою похибкою.

Таблиця 6.3 – Перевірка на адекватність моделі NPGM(1,N) для прогнозування залишкової стабільності

| Кількість гідродинамічних циклів | Експериментальні значення випробувань на залишкову стабільність | Прогнозовані значення залишкової стабільності моделлю NPGM(1,N) | Відносна похибка залишкової стабільності |
|----------------------------------|---|---|--|
| 0 | 86.81 | 86.81 | 0 |
| 1000 | 84.45 | 83.80538288 | 0.76331216 |
| 2000 | 82.32 | 81.7599998 | 0.68027236 |
| 3000 | 78.57 | 79.76453703 | 1.52034751 |
| 4000 | 76.84 | 77.81777623 | 1.27248338 |
| 5000 | 75.79 | 75.91852873 | 0.16958535 |
| 6000 | 75.19 | 74.06563493 | 1.49536517 |
| 7000 | 74.5 | 72.25796349 | 3.00944498 |
| 8000 | 70.33 | 70.49441071 | 0.23377038 |
| 9000 | 65.1 | 67.7738998 | 4.10737297 |

Таблиця 6.4 – Перевірка на адекватність моделі NPGM(1,N) для прогнозування залишкової пористості

| Кількість гідродинамічних циклів | Експериментальні значення випробувань на залишкову пористість | Прогнозовані значення залишкової пористості моделлю NPGM(1,N) | Відносна похибка залишкової пористості |
|----------------------------------|---|---|--|
| 0 | 4.5 | 4.5 | 0 |
| 1000 | 4.7 | 4.759232 | 1.260262 |
| 2000 | 5 | 4.939268 | 1.214648 |
| 3000 | 5.2 | 5.126113 | 1.420897 |
| 4000 | 5.3 | 5.320027 | 0.377873 |
| 5000 | 5.4 | 5.521277 | 2.245864 |
| 6000 | 5.8 | 5.730139 | 1.204499 |
| 7000 | 6.1 | 5.946902 | 2.509796 |
| 8000 | 6.2 | 6.171866 | 0.45378 |
| 9000 | 6.3 | 6.405339 | 1.672046 |

З табл. 6.4 видно, що похибки даних, спрогнозованих моделлю NPGM(1,N), в порівнянні з експериментальними даними становлять 2,51%,

0,45% та 1,67% відповідно, що є допустимою похибкою.

З результатів перевірки на адекватність встановлено, що прогнозування експлуатаційних характеристик асфальтобетонної суміші за допомогою моделі NPGM(1,N) є можливим.

6.4 Прогнозування змін експлуатаційних характеристик асфальтобетону за допомогою моделі NPGM(1,N)

6.4.1 Прогнозування властивостей асфальтобетону при насичено-зневоднених циклах в розчинах протижеледних речовин

На основі результатів випробувань залишкової стабільності, динамічної стабільності та деформації розтягу при згині при 30 насичено-зневоднених циклів, наведених у розділі 3, за допомогою моделі прогнозування NPGM(1,N), було спрогнозовано залишкову стабільність, динамічну стабільність та деформації розтягу при згині асфальтобетонних сумішей до 45 циклів насичення-зневоднення. Отримані графічні залежності показані на рис. 6.2–6.4.

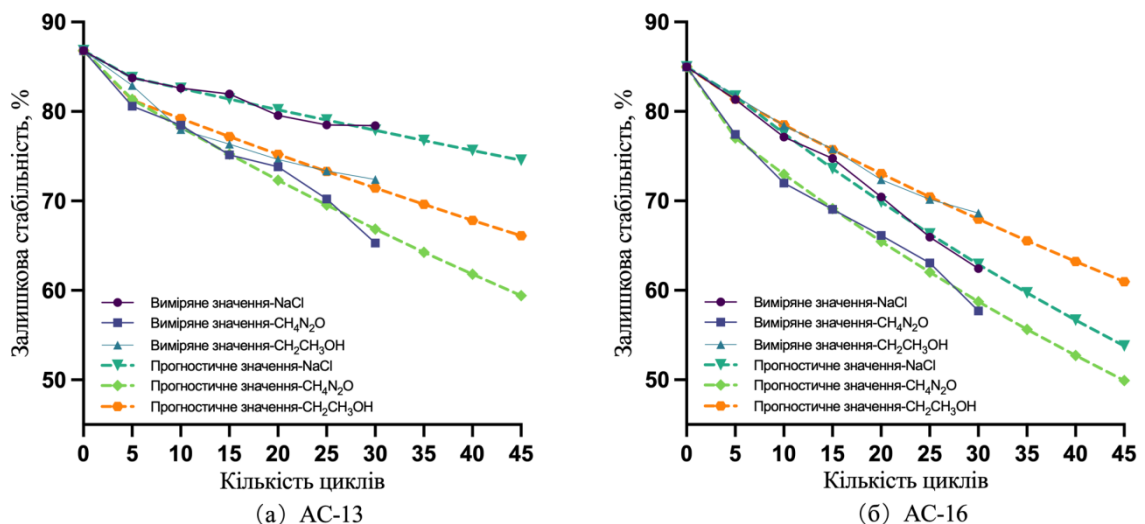


Рисунок 6.2 – Експериментальні та прогнозовані значення залишкової стабільності

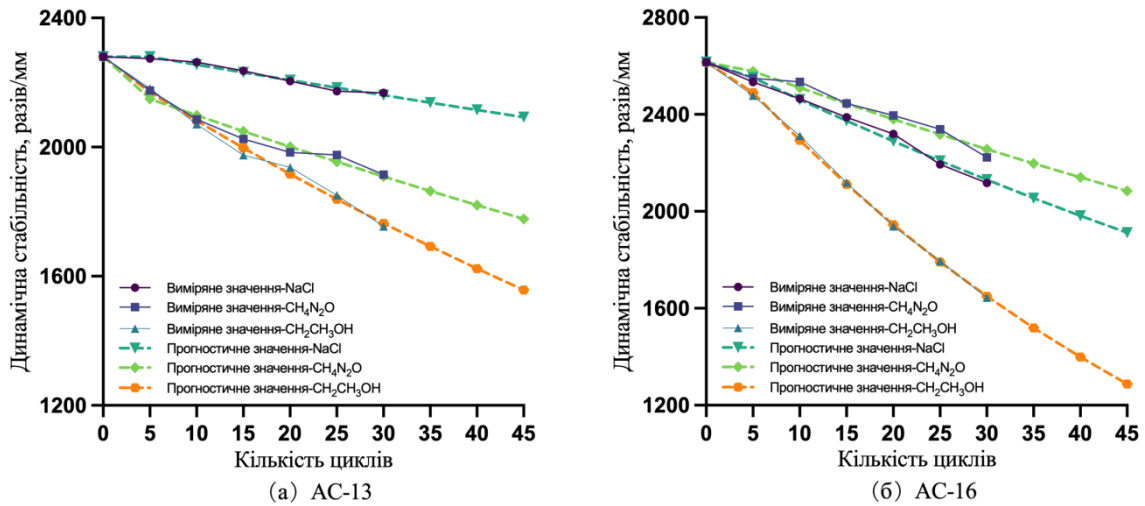


Рисунок 6.3 – Експериментальні та прогнозовані значення динамічної стабільності

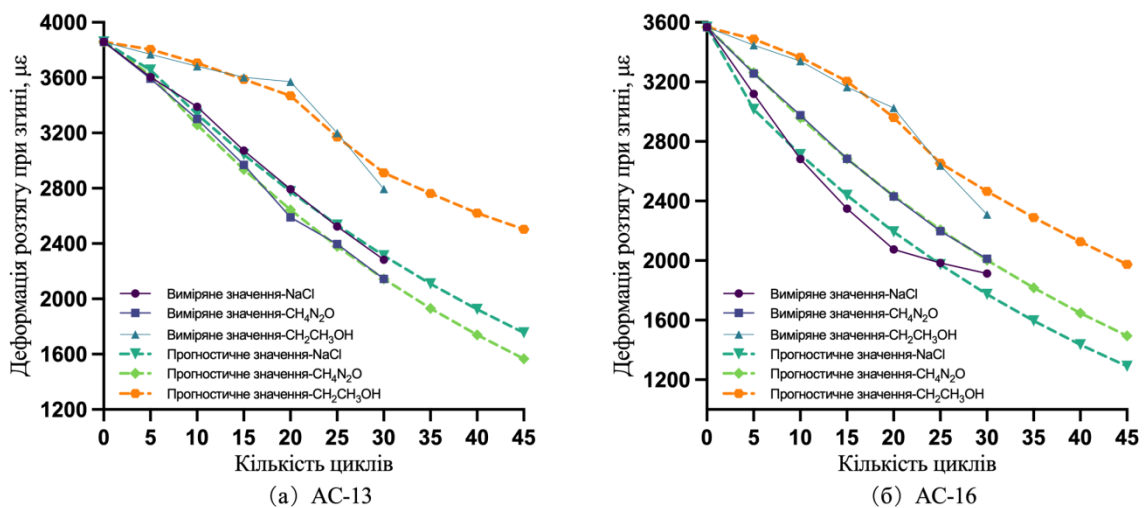


Рисунок 6.4 – Експериментальні та прогнозовані значення деформації розтягу при згині

Відносні похибки між результатами прогнозування залишкової стабільності, динамічної стабільності та деформації розтягу при згині за допомогою удосконаленої моделі та результатами експериментальних випробувань знаходяться в межах 5%.

6.4.2 Прогнозування характеристик водостійкості асфальтобетону при циклах заморожування-відтавання в розчинах протижеледних речовин

За результатами досліджень, наведених у розділі 4, основних характеристик водостійкості: залишкової стабільності та коефіцієнта міцності на розтяг при розколюванні, за умови 30 циклів заморожування-відтавання в розчинах протижеледних речовин NaCl, CH₄N₂O та CH₂CH₃OH, було використано модель прогнозування NPGM (1,N). За її допомогою здійснено прогноз залишкової стабільності та коефіцієнт MPP асфальтобетону при проходженні 45 циклів заморожування-відтавання. Порівняння прогнозованих графічних залежностей з експериментальними значеннями випробувань показано на рис. 6.5–6.10.

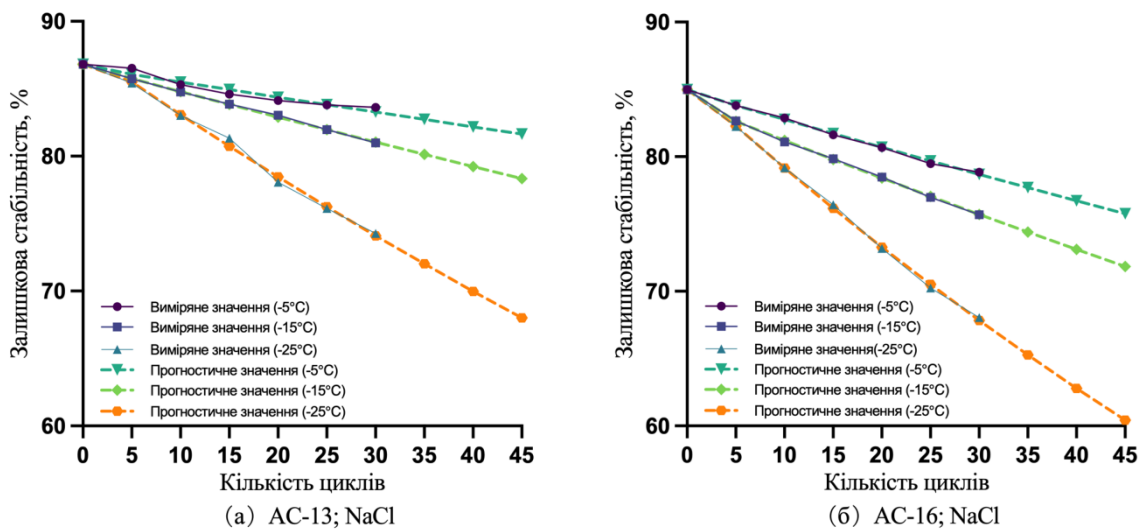


Рисунок 6.5 – Експериментальні та прогнозовані значення залишкової стабільності

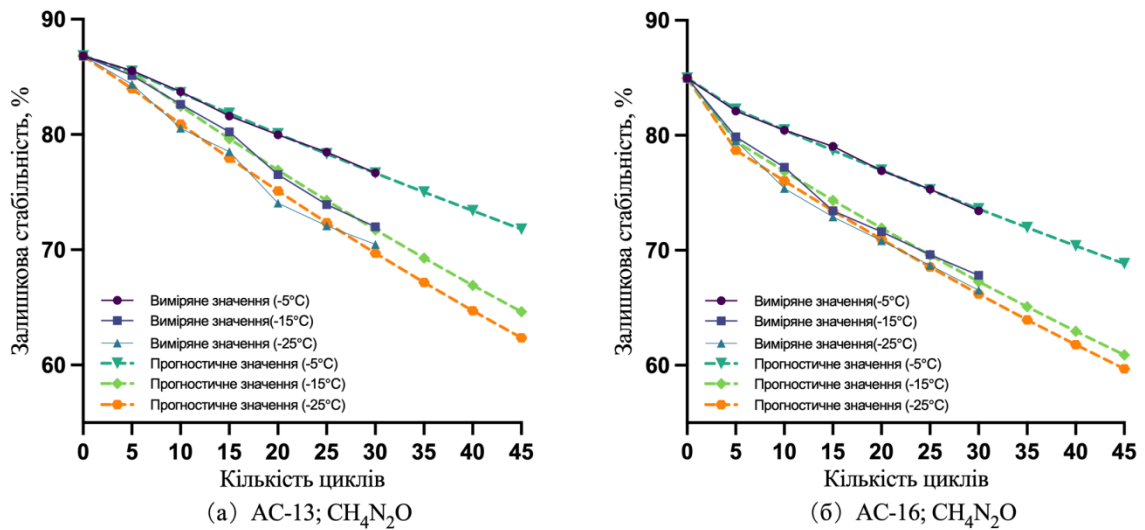


Рисунок 6.6 – Експериментальні та прогнозовані значення залишкової стабільності

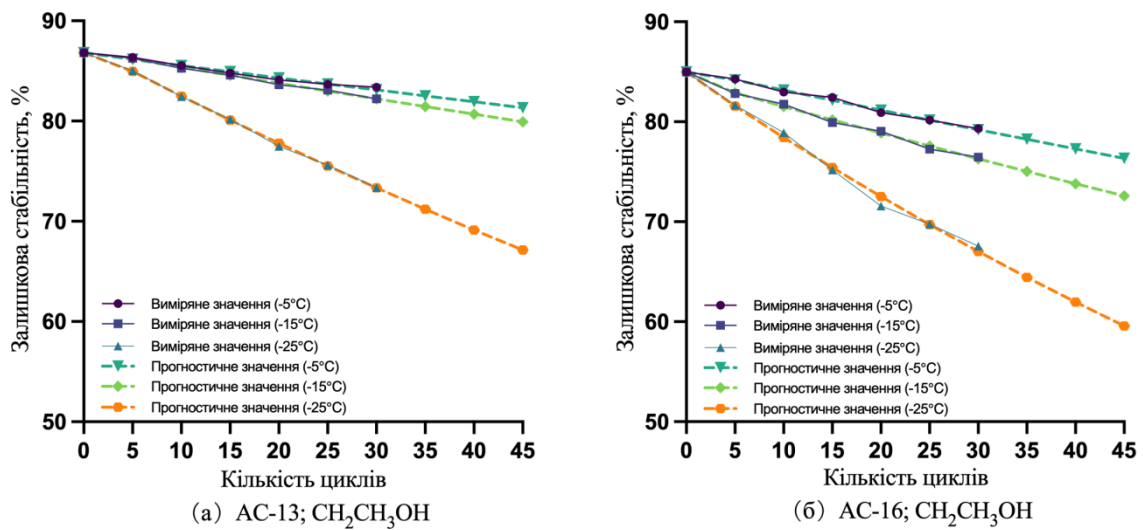


Рисунок 6.7 – Експериментальні та прогнозовані значення залишкової стабільності

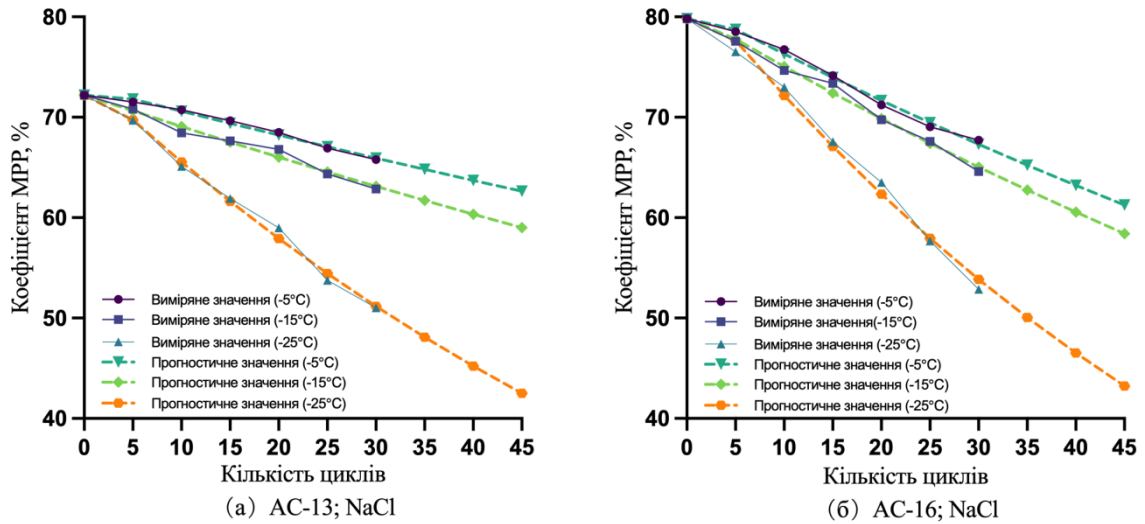


Рисунок 6.8 – Експериментальні та прогнозовані значення коефіцієнта міцності на розтяг при розколюванні

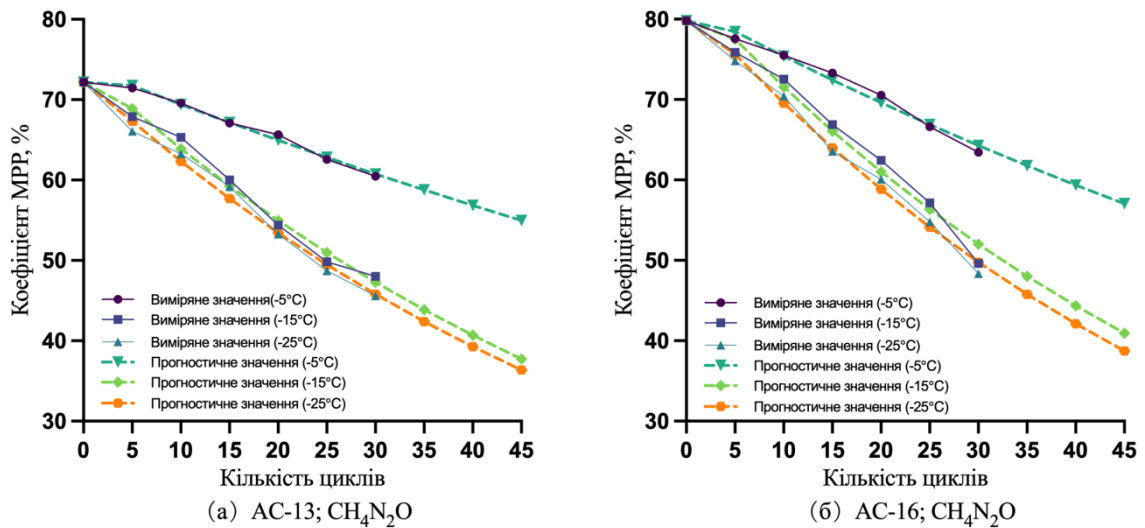


Рисунок 6.9 – Експериментальні та прогнозовані значення коефіцієнта міцності на розтяг при розколюванні

Відносні похибки між результатами прогнозування при використанні удосконаленої моделі та результатами експериментальних досліджень залишкової стабільності і коефіцієнта міцності на розтяг при розколюванні знаходяться в межах 5%.

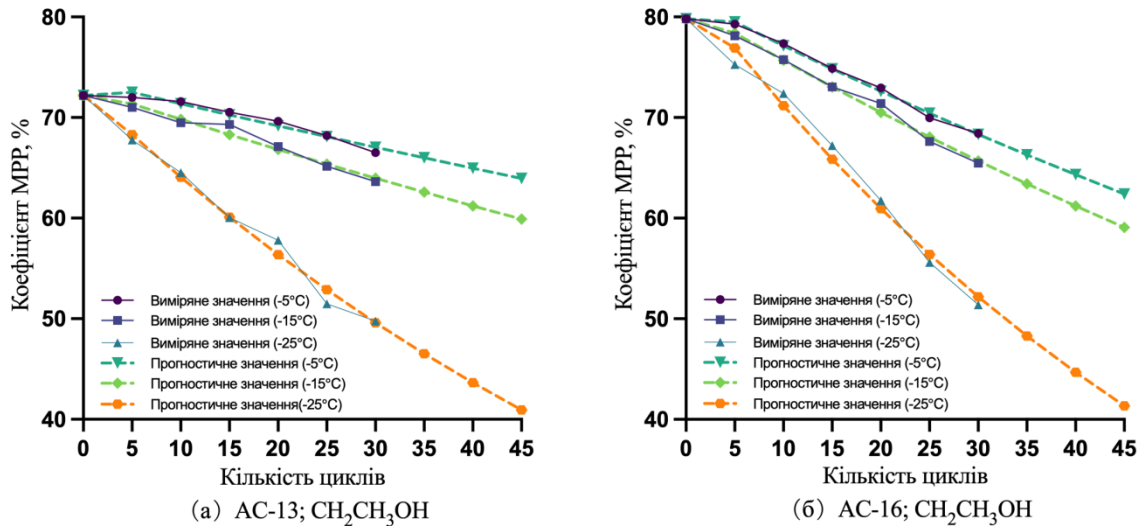


Рисунок 6.10 – Експериментальні та прогнозовані значення коефіцієнта міцності на розтяг при розколюванні

6.4.3 Прогнозування експлуатаційних характеристик асфальтобетону в умовах гідродинамічного впливу протижелезними речовинами

Результати випробувань залишкової стабільності, коефіцієнта міцності на розтяг при розколюванні та залишкової пористості при проходженні 9000 циклів, наведених у розділі 5, були використані для прогнозування. За допомогою моделі NPGM (1,N) спрогнозовано залишкову стабільність, коефіцієнт MPP та залишкову пористість асфальтобетону після проходження 12000 циклів гідродинамічного розмиву. Графічні залежності експериментальних та прогнозованих значень наведені на рис. 6.11–6.13.

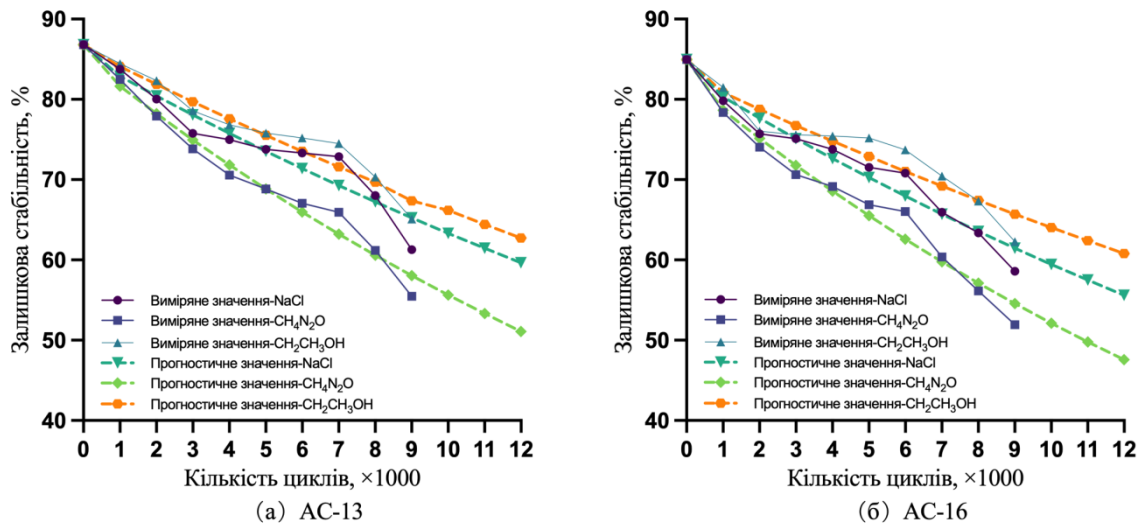


Рисунок 6.11 – Експериментальні та прогнозовані значення залишкової стабільності

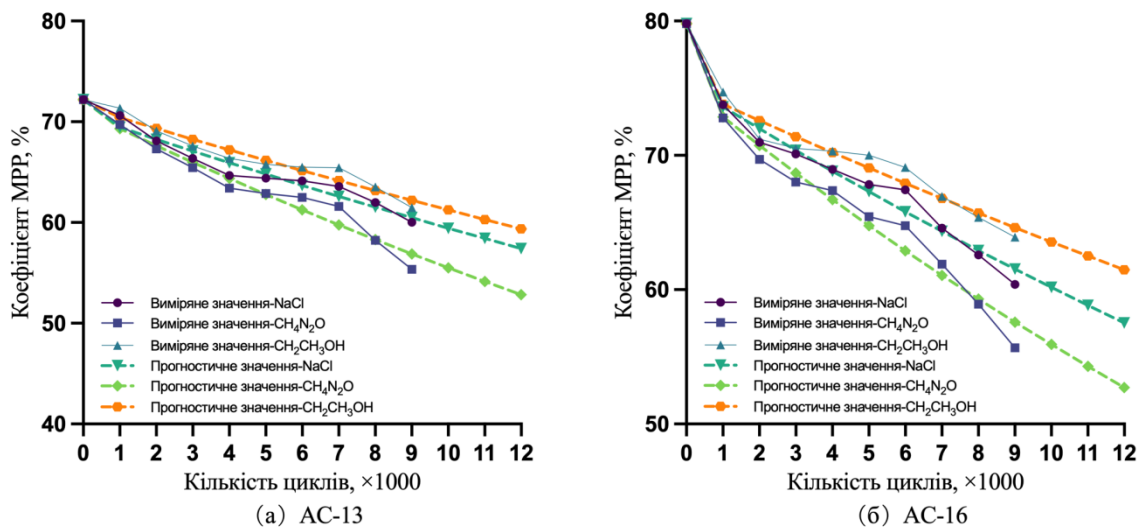


Рисунок 6.12 – Експериментальні та прогнозовані значення коефіцієнта міцності на розтяг при розколюванні

Відносні похибки між результатами прогнозування удосконаленою моделлю та результатами експериментальних випробувань знаходяться в межах 5%.

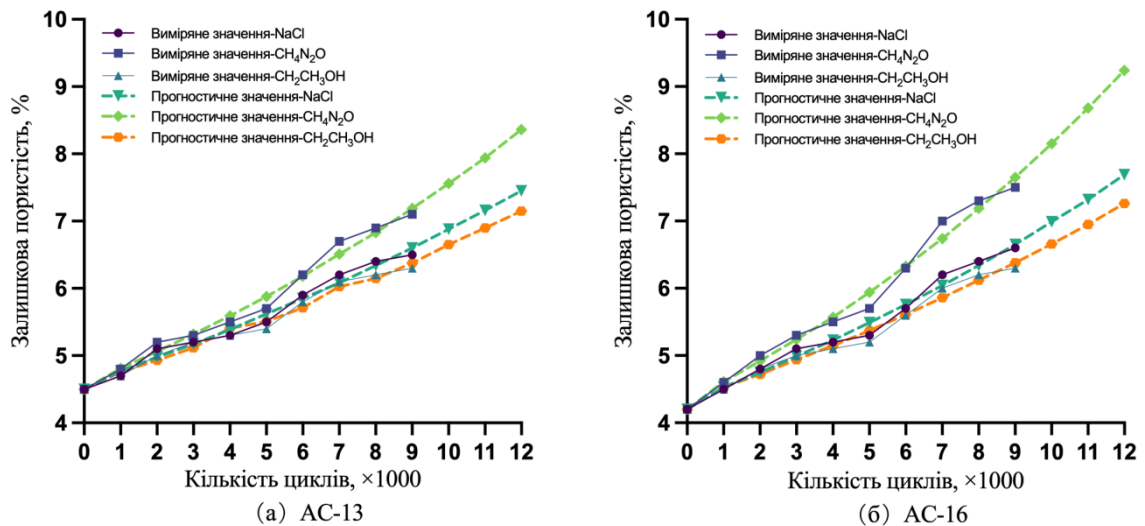


Рисунок 6.13 – Експериментальні та прогнозовані значення залишкової пористості

6. 5 Висновки до розділу 6

1. У даному розділі розглянуто класичну модель прогнозування $GM(1,N)$ та її основні принципи, а також проаналізовано її недоліки. Виявлений недолік полягає в тому, що базові значення розраховуються лише як середнє значення сукупного ряду, що суттєво впливає на точність моделі прогнозування.

2. Класична модель $GM(1,N)$ була вдосконалена за рахунок інтегрування базових значень, а застосування формули Сімпсона дало можливість отримати більш точні базові значення для створення моделі прогнозування $NPGM(1,N)$.

3. При порівнянні точності та адекватності розглянутих моделей, виявлено, що модель прогнозування $NPGM(1,N)$ точніша на 13–16 %, а середнє значення відносної похибки при перевірці адекватності не перевищує 2 %. Тому, модель $NPGM(1,N)$ була використана для прогнозування змін технічних параметрів асфальтобетону під час циклів поперемінного насичення-зневоднення, заморожування-відтавання та гідродинамічного розмиву.

ВИСНОВКИ

У відповідності з поставленими завданнями та науковою новизною одержаних результатів дослідження можемо сформулювати наступні висновки:

1. Досліджено зміну температурних параметрів шарів асфальтобетонного покриття масиву експлуатованої дороги високого класу в провінції Ганьсу, Китай. Встановлено, що мінімальна температура, верхнього шару, дорожнього покриття в зимовий період може досягати $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$

2. Доведено зниження нормованих експлуатаційних властивостей (тріщиностійкості, яка характеризується швидкістю втрати деформації розтягу при згині, водостійкості, - характеризується втратою залишкової стабільності, колійності, - характеризується втратою динамічної стабільності) зразків моделей асфальтобетону після попереминого насичення і зневоднення в розчині протиожеледних речовин.

3 Встановлено, що при збільшені кількості циклів попереминого насичення та зневоднення асфальтобетонних зразків в розчинах протиожеледних речовин швидкість втрати деформації розтягу при згині становлять (близько 40 %), а швидкість втрати залишкової стабільності і динамічної стабільності становить (близько 20 %), що вказує на комбінований вплив протиожеледних речовин і попереминого насичення-зневоднення має найбільший вплив на низькотемпературні властивості асфальтобетону.

4. За допомогою аналізу ентропії сірої кореляції, виявлено, що на водостійкість та колійність переважно впливає тип асфальтобетону, який відрізняється за зерновим складом заповнювачів та вмістом бітуму, а різні види протиожеледних речовин, в основному, впливають на тріщиностійкість асфальтобетону.

5. Досліджено зміну водостійкості зразків-моделей асфальтобетонного покриття доріг після 30 циклів попереминого заморожування-відтавання, з варіюванням граничних значень температури замерзання $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ і

– 25 °C при насичені 15 % розчином сечовини ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$), 20 % розчином технічної солі (NaCl) і 20 % розчином спирту ($\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$).

6. Виявлено, що при температурі випробування, яка менша за температуру замерзання розчину протиожеледної речовини, відбувається не значне зниження водостійкості за рахунок хімічної корозії асфальтобетону. Доведено, що при температурі випробування, яка нижче за температуру замерзання розчину протиожеледної речовини, відбувається пошкодження асфальтобетону внаслідок замерзання та збільшення об'єму розчину в порах асфальтобетону, а це призводить до значного зниження показників водостійкості.

7. Доведено, що найбільший вплив на показники водостійкості асфальтобетону спричиняє $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ (швидкість втрати залишкової стабільності 17,2%; швидкість втрати коефіцієнта МРР 30,72%), помірний - NaCl (швидкість втрати залишкової стабільності 10,47%; швидкість втрати коефіцієнта МРР 19,85%), а $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ (швидкість втрати залишкової стабільності 10,32%; швидкість втрати коефіцієнта МРР 19,77%) спричиняє мінімальний вплив.

8. Збільшення вмісту дрібного заповнювача в АС–13 на 4% підвищує водостійкість асфальтобетону при поперемінному заморожуванні-відтаванні у розчинах протиожеледних речовин.

9. На основі проведеного теоретичного аналізу визначення гідродинамічного тиску у сполучених порах, розроблена методика та виготовлена лабораторна установка для дослідження зміни характеристик асфальтобетонних зразків при гідродинамічному впливі. Виявлено, що сумісна дія протиожеледних речовин та гідродинамічного розмиву суттєво впливає на короткострокові зміни експлуатаційних характеристик асфальтобетону.

10. Отримано графічні інтерпретації трьох стадій зміни властивостей асфальтобетону при гідродинамічному впливі протиожеледних речовин, що дозволило отримати додаткові уявлення про руйнування асфальтобетонного

покриття. Аналіз впливу трьох протижелезних речовин показує, що $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ має найбільший вплив на короткочасне пошкодження асфальтобетону, NaCl має більш помірний вплив, тоді як $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$ має найменший вплив. Результати дисперсійного аналізу вказують на те, що кількість циклів гідродинамічного розмиву є основним фактором, що впливає на швидке руйнування асфальтобетону.

11. Розглянуто класичну модель прогнозування $\text{GM}(1,\text{N})$ та її основні принципи, а також проаналізовано її недоліки. Виявлені недоліки полягають в тому, що базові значення розраховуються лише як середні значення сукупного ряду, які суттєво впливають на точність моделі прогнозування. Класична модель $\text{GM}(1,\text{N})$ була вдосконалена за рахунок застосування формули Сімпсона для інтегрування базових значень, що дозволило отримати більш точні базові значення для створення моделі прогнозування $\text{NPGM}(1,\text{N})$.

12. Порівнявши точність та адекватність розглянутих моделей, виявлено, що модель прогнозування $\text{NPGM}(1,\text{N})$ точніша на 13–16 %, а при перевірці адекватності середнє значення відносної похибки становить 2 %. Тому, модель $\text{NPGM}(1,\text{N})$ була застосована для прогнозування змін технічних параметрів асфальтобетону підчас циклів поперемінного насичення-зневоднення, заморожування-відтавання та гідродинамічного розмиву.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] M. Guo, V. P. Kovalskiy, T. Nian, and P. Li, “Influence of Deicer on Water Stability of Asphalt Mixture under Freeze–Thaw Cycle,” *Sustainability*, vol. 15, no. 18, p. 13707, 2023.
- [2] M. Guo, T. Nian, P. Li, and V. P. Kovalskiy, “Exploring the short-term water damage characteristics of asphalt mixtures: The combined effect of salt erosion and dynamic water scouring,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 411, p. 134310, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134310>.
- [3] В. П. Ковальський and Г. Мінцзюнь, “ВПЛИВ ПРОТИОЖЕЛЕДНИХ РЕЧОВИН НА ЗАЛИШКОВУ ПОРИСТІТЬ І ВОДОПРОНИКНІСТЬ АСФАЛЬТОБЕТОНУ ПРИ ПОПЕРЕМІННОМУ НАСИЧЕННІ ТА ВИСУШУВАННІ,” *Сучасні Технології Та Методи Розрахунків У Будівництві*, vol. 20, pp. 63–71, 2023, doi: 10.36910/6775-2410-6208-2023-10(20)-07.
- [4] Г. Мінцзюнь and С. В. Королевська, “СТІЙКІСТЬ ДО РОЗТРІСКУВАННЯ АСФАЛЬТОБЕТОНУ, НАСИЧЕНОГО ДОРОЖНЬОЮ СІЛЛЮ, ПРИ ЗАМОРОЖУВАНІ,” *Сучасні Технології Матеріали І Конструкції В Будівництві*, vol. 33, no. 2, Art. no. 2, 2022, doi: 10.31649/2311-1429-2022-2-54-59.
- [5] G. Mingjun and V. P. Kovalskiy, “IMPACT OF DEICING SALT ON THE PERFORMANCE OF ASPHALT MIXTURES IN NORTHWEST CHINA: AN INVESTIGATION INTO MECHANICAL PROPERTIES AND INFLUENTIAL FACTORS,” *Mod. Constr. Archit.*, no. 5, pp. 90–99, Sep. 2023, doi: 10.31650/2786-6696-2023-5-90-99.
- [6] V. P. Kovalskiy and G. Mingjun, “EFFECT OF DEICING SALT ON PERMEABILITY COEFFICIENT OF ASPHALT MIXTURE UNDER FREEZE-THAW CYCLE,” *SWorldJournal*, vol. 22–02, pp. 3–10, 2023, doi: 10.30888/2663-5712.2023-22-02-007.
- [7] В. П. Ковальський and Г. Мінцзюнь, “THE INFLUENCE OF DEICING SALT ON AIR VOIDS OF ASPHALT MIXTURE UNDER FREEZE-THAW CYCLE,” *Сучасні Технології Матеріали І Конструкції В Будівництві*, vol. 34, no. 1, pp. 43–50, 2023.
- [8] І. Ю. Ваков, “Капітальний ремонт автомобільної дороги Одеса-Рені з розробкою заходів з експлуатаційного утримання в зимовий період,” 2020.
- [9] D. D. Williams, N. E. Williams, and Y. Cao, “Road salt contamination of groundwater in a major metropolitan area and development of a biological index to monitor its impact,” *Water Res.*, vol. 34, no. 1, pp. 127–138, 2000.
- [10] R. Yuanyuan, X. Li, and J. Xi, “Research on Urban Road Section Capacity under the Condition of Ice and Snow,” in *2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, May 2010, pp. 194–197. doi: 10.1109/ICICTA.2010.653.

- [11] X. Liu, S. Xu, L. Pan, S. Yang, and H. Wang, "The calibration of freeway traffic safety warning level under snow and ice conditions," *Commun. Sci. Technol. Heilongjiang*, vol. 41, no. 11, pp. 165-166+169, 2018, doi: 10.16402/j.cnki.issn1008-3383.2018.11.095.
- [12] D. Kuemmel, "Accident Study Validates Benefits of Preventive Maintenance," *Am. City Cty.*, vol. 109, no. 5, 1994.
- [13] H. Yu, K. Zhang, and H. Dai, "Impact of Chemical Deicers on Regional Environment and the Characteristics of its Accumulation and Translocation," *Chin. J. Soil Sci.*, vol. 42, no. 05, pp. 1276–1280, 2011, doi: 10.19336/j.cnki.trtb.2011.05.046.
- [14] A. K. Andersson and L. Chapman, "The impact of climate change on winter road maintenance and traffic accidents in West Midlands, UK," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 43, no. 1, pp. 284–289, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.aap.2010.08.025.
- [15] H.-L. Qu, J.-W. Chu, and D.-C. Li, "Study on Urban Traffic Safety Remedy Countermeasures on the Ice-Snow Road," in *2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment*, Nov. 2010, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICEEE.2010.5660227.
- [16] О. О. Фоменко and А. В. Седов, "Зниження агресивного впливу протижелезних матеріалів на асфальтобетонне покриття при зимовому утриманні автомобільних доріг," *Сучасні Технології Та Методи Розрахунків У Будівництві*, no. 19, pp. 217–225, 2023.
- [17] О. П. Шимчук, "Вплив протижелезних матеріалів для зимового утримання доріг на навколишнє середовище та безпеку дорожнього руху," *Містобудування Та Територіальне Планування*, no. 54, pp. 486–490, 2014.
- [18] K. Zhang, W. Li, and F. Han, "Performance deterioration mechanism and improvement techniques of asphalt mixture in salty and humid environment," *Constr. Build. Mater.*, vol. 208, pp. 749–757, 2019.
- [19] R. D. CODY, A. M. CODY, P. G. SPRY, and G.-L. GAN, "Experimental Deterioration of Highway Concrete by Chloride Deicing Salts," *Environ. Eng. Geosci.*, vol. II, no. 4, pp. 575–588, Jan. 1996, doi: 10.2113/gsegeosci.II.4.575.
- [20] J. Yuan, Z. Du, Y. Wu, and F. Xiao, "Freezing-thawing resistance evaluations of concrete pavements with deicing salts based on various surfaces and air void parameters," *Constr. Build. Mater.*, vol. 204, pp. 317–326, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.149.
- [21] C. Zhang, "Factors Affecting Pavement Flatness in Highway Construction and Countermeasures," *China Munic. Eng.*, vol. 7, no. 4, 2022.
- [22] L. W. Hu and Y. L. Pei, "Study on Ice-Snow Road and its Traffic Operating Characteristics in Wintry Harbin China," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 97–98, pp. 587–590, 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.97-98.587.

- [23] Z. Lili, D. Tongqiang, H. Xiuhua, and S. Jian, "Traffic Observation and Analysis of Road Snow Hazard in China," in *2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*,
- [24] W. Yu, X. Yi, M. Guo, and L. Chen, "State of the art and practice of pavement anti-icing and de-icing techniques," *Sci Cold Arid Reg*, vol. 6, no. 1, pp. 14–21, 2014.
- [25] K. Gustafson, "Methods and materials for snow and ice control on roads and runways: MINSALT Project," *Transp. Res. Rec.*, no. 1387, 1993.
- [26] T. Pan, X. He, and X. Shi, "Laboratory investigation of acetate-based deicing/anti-icing agents deteriorating airfield asphalt concrete," *Asph. Paving Technol.-Proc.*, vol. 77, p. 773, 2008.
- [27] E. L. Miller, "MODELS FOR PREDICTING SNOW-REMOVAL COSTS AND CHEMICAL USAGE," in *Highway Research Board Special Report*, 1970. Accessed: Oct. 21, 2022. [Online]. Available: <https://trid.trb.org/view/110807>
- [28] L. Fu, R. Sooklall, and M. S. Perchanok, "Effectiveness of alternative chemicals for snow removal on highways," *Transp. Res. Rec.*, vol. 1948, no. 1, pp. 125–134, 2006.
- [29] M. Akin, J. Huang, X. Shi, D. Veneziano, and D. Williams, "Snow removal at extreme temperatures," *West. Transp. Inst. Mont. State Univ. Bozeman MT USA*, 2013.
- [30] A. Rahmatmand, S. J. Harrison, and P. H. Oosthuizen, "An experimental investigation of snow removal from photovoltaic solar panels by electrical heating," *Sol. Energy*, vol. 171, pp. 811–826, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.07.015.
- [31] L. Wang, M. Li, X. Wang, and X. Sun, "Research on ice-melting technology of high elasticity pavement surface," in *Functional Pavement Design*, CRC Press, 2016, pp. 1327–1336.
- [32] S. Wu, J. Yang, X. Sun, C. Wang, R. Yang, and J. Zhu, "Preparation and characterization of anti-freezing asphalt pavement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 236, p. 117579, 2020.
- [33] Y. Sun, S. Wu, Q. Liu, J. Hu, Y. Yuan, and Q. Ye, "Snow and ice melting properties of self-healing asphalt mixtures with induction heating and microwave heating," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 129, pp. 871–883, 2018.
- [34] G. G. Koenig and C. C. Ryerson, "An investigation of infrared deicing through experimentation," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 65, no. 1, pp. 79–87, 2011.
- [35] P. J. Tumidajski, P. Xie, M. Arnott, and J. J. Beaudoin, "Overlay current in a conductive concrete snow melting system," *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 11, pp. 1807–1809, Nov. 2003, doi: 10.1016/S0008-8846(03)00198-4.
- [36] C. Huang, Z. Zheng, Q. Ma, and D. Xiang, "Preliminary Design of Electric Cable Heating System," in *2018 7th International Conference on Energy, Environment and Sustainable*

Development (ICEESD 2018), Atlantis Press, 2018, pp. 507–512.

[37] P. Pan, S. Wu, Y. Xiao, and G. Liu, “A review on hydronic asphalt pavement for energy harvesting and snow melting,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 48, pp. 624–634, 2015.

[38] H. Zuofu, L. Zhuoqi, and T. Zuquan, “Finite element analysis and design of electrically conductive concrete for roadway deicing or snow-melting system,” *Mater. J.*, vol. 100, no. 6, pp. 469–476, 2003.

[39] H. Abdulla, H. Ceylan, S. Kim, K. Gopalakrishnan, P. C. Taylor, and Y. Turkan, “System requirements for electrically conductive concrete heated pavements,” *Transp. Res. Rec.*, vol. 2569, no. 1, pp. 70–79, 2016.

[40] X. Zhu, Q. Zhang, Z. Du, H. Wu, and Y. Sun, “Snow-melting pavement design strategy with electric cable heating system balancing snow melting, energy conservation, and mechanical performance,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 177, p. 105970, 2022.

[41] K. Morita and M. Tago, “Operational characteristics of the Gaia snow-melting system in Ninohe, Iwate, Japan,” *GHC Bull.*, vol. 21, no. 4, pp. 5–11, 2000.

[42] M. Chen, S. Wu, H. Wang, and J. Zhang, “Study of ice and snow melting process on conductive asphalt solar collector,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, no. 12, pp. 3241–3250, 2011.

[43] K. Zhong, M. Sun, and X. Wang, “Study on Deicing Mechanism of High-elastic/salt-storage Functional Pavement,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, 2019, p. 042075.

[44] J. Z. Zhou, L. Q. Han, A. H. Liu, D. H. Tu, Y. H. Chen, and X. P. Xu, “The research and summary of road deicing methods,” in *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publ, 2014, pp. 1835–1839.

[45] В. В. Кожушко and В. П. Кожушко, “Розробки засобів продовження термінів експлуатації дорожніх покриттів та штучних споруд при зимовому утриманні автомобільних доріг,” 2010.

[46] В. К. Вирожемський, К. В. Краюшкіна, and А. А. Соц, “Протиожеледний асфальтобетон перспективний матеріал для поліпшення зимового утримання доріг,” *Вісник Харківського Національного Автомобільно-Дорожнього Університету*, no. 40, 2008.

[47] Z. Liu, M. Xing, S. Chen, R. He, and P. Cong, “Influence of the chloride-based anti-freeze filler on the properties of asphalt mixtures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 51, pp. 133–140, 2014.

[48] Y. Zhao, C. Chen, Y. Xiang, and J. Wang, “Preparation, Characterization, and Anti-Icing Properties of Sustained-Release Low-Freezing-Point Asphalt Mixture,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 34, no. 8, p. 04022171, 2022.

- [49] L. Ding, X. Wang, W. Zhang, S. Wang, J. Zhao, and Y. Li, "Microwave deicing efficiency: study on the difference between microwave frequencies and road structure materials," *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 12, p. 2360, 2018.
- [50] Z. Liu, X. Yang, Y. Wang, and S. Luo, "Engineering properties and microwave heating induced ice-melting performance of asphalt mixture with activated carbon powder filler," *Constr. Build. Mater.*, vol. 197, pp. 50–62, 2019.
- [51] C. Ryerson, M. Wyderski, D. Tarazano, and J. Davila, "Objective evaluation of fluid, blower, and infrared ground deicing technologies," in *41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2003, p. 567.
- [52] T. Xie, J. Dong, H. Chen, Y. Jiang, and Y. Yao, "Experiment investigation on deicing characteristics and energy efficiency using infrared ray as heat source," *Energy*, vol. 116, pp. 998–1005, 2016.
- [53] G. Cheng, P. Han, and S. Du, "The Discussion on the Conditions and Main Problem of the Deicer," *Shanxi Sci. Technol. Commun.*, no. 5, pp. 45–46, 2004.
- [54] M. Cheng, Z. Li, and H. Guo, "Snow-Melting Mechanism and Development of Deicing Salt," *Transp. Res.*, no. 24, pp. 53–56, 2013, doi: 10.16503/j.cnki.2095-9931.2013.24.019.
- [55] B. Xie, Y. Li, and L. Jin, "Vehicle routing optimization for deicing salt spreading in winter highway maintenance," *Procedia-Soc. Behav. Sci.*, vol. 96, pp. 945–953, 2013.
- [56] G. Ke, J. Zhang, and B. Tian, "Evaluation and selection of de-icing salt based on multi-factor," *Materials*, vol. 12, no. 6, p. 912, 2019.
- [57] J. Fang, J. Xiao, and H. Hu, "Classification and Development of Additives in Highway Deicing," *Transp. Res.*, vol. 42, no. 19, pp. 131–134, 2014, doi: 10.16503/j.cnki.2095-9931.2014.19.027.
- [58] V. G. Papadakis, M. N. Fardis, and C. G. Vayenas, "Physicochemical processes and mathematical modeling of concrete chlorination," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 51, no. 4, pp. 505–513, 1996.
- [59] L. Jin, "The Information Performance after Chlorine Salt Erosion and Structure Performance Enhancement after the Usage of Repair Materials," in *2008 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*, IEEE, 2008, pp. 147–150.
- [60] Z. Q. Liu, F. Y. Jiang, and R. C. Liu, "Preparation of environment-friendly deicing salt of calcium-magnesium acetate from apple sticks," in *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publ, 2012, pp. 954–957.
- [61] O. Peterson, "Chemical effects on cement mortar of calcium magnesium acetate as a

deicing salt,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 25, no. 3, pp. 617–626, 1995.

[62] M. C. Santagata and M. Collepardi, “The effect of CMA deicers on concrete properties,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 9, pp. 1389–1394, 2000.

[63] D. Wang, Q. Zhu, Y. Su, J. Li, A. Wang, and Z. Xing, “Preparation of MgAlFe-LDHs as a deicer corrosion inhibitor to reduce corrosion of chloride ions in deicing salts,” *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 174, pp. 164–174, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.01.123.

[64] F. Jin, G. Zhang, Y. Jin, Y. Watanabe, A. Kishita, and H. Enomoto, “A new process for producing calcium acetate from vegetable wastes for use as an environmentally friendly deicer,” *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 19, pp. 7299–7306, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2010.04.081.

[65] Y. Feng, Y. Luo, J. Gao, P. Guo, Y. Jiang, and F. Liu, “Preparation and Application of a Novel Slow-Releasing with Core-Shell Deicer in Asphalt Mixtures,” *Polymers*, vol. 14, no. 13, p. 2615, 2022.

[66] L. Zhao, “Study on Inhibitive Performance of Inhibitor in Deicing Salt to Carbon Steel,” Beijing University of Technology, 2008.

[67] R. A. Crowther and H. B. N. Hynes, “The effect of road deicing salt on the drift of stream benthos,” *Environ. Pollut. 1970*, vol. 14, no. 2, pp. 113–126, 1977.

[68] P. Zhao, H. Zhang, B. Ma, C. Duojie, W. Si, and Y. Hu, “Influence of Subgrade Freezing and Thawing on Vertical Deformation of Asphalt Pavement,” *J. Test. Eval.*, vol. 50, no. 4, pp. 2116–2136, 2022.

[69] О. П. Шимчук, “Аудит, як форма впливу протижезедних матеріалів на навколишнє середовище та безпеку дорожнього руху,” *Містобудування Та Територіальне Планування*, no. 56, pp. 124–126, 2015.

[70] D. Sanzo and S. J. Hecnar, “Effects of road de-icing salt (NaCl) on larval wood frogs (*Rana sylvatica*),” *Environ. Pollut.*, vol. 140, no. 2, pp. 247–256, 2006.

[71] N. E. Karraker and J. P. Gibbs, “Road deicing salt irreversibly disrupts osmoregulation of salamander egg clutches,” *Environ. Pollut.*, vol. 159, no. 3, pp. 833–835, 2011.

[72] E.-L. Thunqvist, “Regional increase of mean chloride concentration in water due to the application of deicing salt,” *Sci. Total Environ.*, vol. 325, no. 1, pp. 29–37, Jun. 2004, doi: 10.1016/j.scitotenv.2003.11.020.

[73] C. Amrhein and J. E. Strong, “The Effect of Deicing Salts on Trace Metal Mobility in Roadside Soils,” *J. Environ. Qual.*, vol. 19, no. 4, pp. 765–772, 1990, doi: 10.2134/jeq1990.00472425001900040022x.

[74] M. A. Cunningham, E. Snyder, D. Yonkin, M. Ross, and T. Elsen, “Accumulation of deicing salts in soils in an urban environment,” *Urban Ecosyst.*, vol. 11, no. 1, pp. 17–31, Mar.

2008, doi: 10.1007/s11252-007-0031-x.

[75] E. V. Novotny, D. Murphy, and H. G. Stefan, “Increase of urban lake salinity by road deicing salt,” *Sci. Total Environ.*, vol. 406, no. 1, pp. 131–144, Nov. 2008, doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.07.037.

[76] R. E. Hanes, L. W. Zelazny, and R. E. Blazer, “EFFECTS OF DEICING SALTS ON WATER QUALITY AND BIOTA - LITERATURE REVIEW AND RECOMMENDED RESEARCH,” *NCHRP Rep.*, no. 91, 1970, Accessed: Oct. 20, 2022. [Online]. Available: <https://trid.trb.org/view/97185>

[77] G. Blomqvist and E.-L. Johansson, “Airborne spreading and deposition of de-icing salt — a case study,” *Sci. Total Environ.*, vol. 235, no. 1, pp. 161–168, Sep. 1999, doi: 10.1016/S0048-9697(99)00209-0.

[78] H. K. Robinson, E. A. Hasenmueller, and L. G. Chambers, “Soil as a reservoir for road salt retention leading to its gradual release to groundwater,” *Appl. Geochem.*, vol. 83, pp. 72–85, 2017.

[79] N. Perera, B. Gharabaghi, and K. Howard, “Groundwater chloride response in the Highland Creek watershed due to road salt application: A re-assessment after 20 years,” *J. Hydrol.*, vol. 479, pp. 159–168, 2013.

[80] S. Löfgren, “The Chemical Effects of Deicing Salt on Soil and Stream Water of Five Catchments in Southeast Sweden,” *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 130, no. 1, pp. 863–868, Aug. 2001, doi: 10.1023/A:1013895215558.

[81] U. Mahrosh, M. Kleiven, S. Meland, B. O. Rosseland, B. Salbu, and H.-C. Teien, “Toxicity of road deicing salt (NaCl) and copper (Cu) to fertilization and early developmental stages of Atlantic salmon (*Salmo salar*),” *J. Hazard. Mater.*, vol. 280, pp. 331–339, 2014.

[82] I. Czerniawska-Kusza, G. Kusza, and M. Dużyński, “Effect of deicing salts on urban soils and health status of roadside trees in the Opole region,” *Environ. Toxicol. Int. J.*, vol. 19, no. 4, pp. 296–301, 2004.

[83] K. D. Coldsnow, B. M. Mattes, W. D. Hintz, and R. A. Relyea, “Rapid evolution of tolerance to road salt in zooplankton,” *Environ. Pollut.*, vol. 222, pp. 367–373, 2017.

[84] M. A. Equiza *et al.*, “Long-term impact of road salt (NaCl) on soil and urban trees in Edmonton, Canada,” *Urban For. Urban Green.*, vol. 21, pp. 16–28, 2017.

[85] C. Ordóñez-Barona, V. Sabetski, A. A. Millward, and J. Steenberg, “De-icing salt contamination reduces urban tree performance in structural soil cells,” *Environ. Pollut.*, vol. 234, pp. 562–571, 2018.

[86] T. Katayama, M. Tagami, Y. Sarai, S. Izumi, and T. Hira, “Alkali-aggregate reaction under the influence of deicing salts in the Hokuriku district, Japan,” *Mater. Charact.*, vol. 53, no. 2,

pp. 105–122, Nov. 2004, doi: 10.1016/j.matchar.2004.07.003.

[87] Z. Liu and W. Hansen, “Freezing characteristics of air-entrained concrete in the presence of deicing salt,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 74, pp. 10–18, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.cemconres.2015.03.015.

[88] X. Shi, L. Fay, Z. Yang, T. A. Nguyen, and Y. Liu, “Corrosion of deicers to metals in transportation infrastructure: Introduction and recent developments,” *Corros. Rev.*, vol. 27, no. 1–2, pp. 23–52, 2009.

[89] J.-S. Chung, B.-H. Kim, and I.-S. Kim, “A case study on chloride corrosion for the end zone of concrete deck subjected to de-icing salts added calcium chloride,” *J. Korean Soc. Saf.*, vol. 29, no. 6, pp. 87–93, 2014.

[90] R. B. Polder and W. H. Peelen, “Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 24, no. 5, pp. 427–435, 2002.

[91] E. Redaelli, L. Bertolini, W. Peelen, and R. Polder, “FEM-models for the propagation period of chloride induced reinforcement corrosion,” *Mater. Corros.*, vol. 57, no. 8, pp. 628–635, 2006.

[92] S. E. Hussain, A. Al-Musallam, and A. S. Al-Gahtani, “Factors affecting threshold chloride for reinforcement corrosion in concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 25, no. 7, pp. 1543–1555, 1995.

[93] K. W. Howard and H. Maier, “Road de-icing salt as a potential constraint on urban growth in the Greater Toronto Area, Canada,” *J. Contam. Hydrol.*, vol. 91, no. 1–2, pp. 146–170, 2007.

[94] G. Guesdon *et al.*, “Impacts of salinity on Saint-Augustin Lake, Canada: Remediation measures at watershed scale,” *Water*, vol. 8, no. 7, p. 285, 2016.

[95] M. O. Rivett *et al.*, “Highway deicing salt dynamic runoff to surface water and subsequent infiltration to groundwater during severe UK winters,” *Sci. Total Environ.*, vol. 565, pp. 324–338, 2016.

[96] Z. Li, Y. Liang, J. Zhou, and X. Sun, “Impacts of de-icing salt pollution on urban road greenspace: a case study of Beijing,” *Front. Environ. Sci. Eng.*, vol. 8, no. 5, pp. 747–756, 2014.

[97] N. Hong, “Corrosion of Rebar by Chlorides and Concrete Durability,” *Corros. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 3, pp. 127–130, 2004.

[98] Н. П. Нагорна, Н. О. Столярова, Д. В. Гуляк, and В. П. Демешкін, “Сучасні дорожньо-будівельні матеріали для будівництва і поточного ремонту автомобільних доріг,” *Вісник Донбаської Національної Академії Будівництва І Архітектури*, no. 6, pp. 124–129,

2013.

[99] H. Arnfelt, *Skador på betongvägar uppkomna genom saltbehandling vintertid*. Statens Väginstytut, 1943.

[100] A. Седов and O. Фоменко, “Дослідження зносу асфальтобетонного покриття з урахуванням впливу температури, вологості покриття і наявності агресивних середовищ,” *Вісник Харківського Національного Автомобільно-Дорожнього Університету*, vol. 2, no. 92, pp. 68–68, 2021.

[101] A. K. Соловейкіна, В. І. Савченко, and С. В. Карпенко, “Фізико-хімічні показники протижелезної дії рідини та їх аналіз,” *Проблеми Розвитку Міського Середовища*, no. 8, pp. 236–243, 2012.

[102] B. Feng, H. Wang, S. Li, K. Ji, L. Li, and R. Xiong, “The durability of asphalt mixture with the action of salt erosion: A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 315, p. 125749, 2022.

[103] K. Zhang, Y. Luo, W. Xie, and J. Wu, “Evaluation of road performance and adhesive characteristic of asphalt binder in salt erosion environment,” *Mater. Today Commun.*, vol. 25, p. 101593, 2020.

[104] J. Wei, G. Fu, and Q. Fu, “Influence of chlorine salt snow-melting agent on road performance of asphalt binder,” *J. Traffic Transp. Eng.*, vol. 14, no. 4, pp. 7–13, 2014.

[105] J. Han, “Research on the Microstructure and Rheology Performance of Asphalt under the Salt Freezing Cycles,” Inner Mongolia University of Technology, 2016.

[106] J. Han, Y. Cui, J. Li, S. Zhang, and L. Wang, “Microstructure and rheological properties at low temperature of modified asphalt under salt frezing cycle,” *Acta Mater. Compos. Sin.*, vol. 33, no. 8, pp. 1718–1724, 2016, doi: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20151214.001.

[107] J. Han, Y. Cui, L. Wang, Z. Li, and S. Zhang, “The mechanical properties analysis of SBS modified asphalt mortar under salt freezing cycle,” *J. Funct. Mater.*, vol. 46, no. 12, pp. 12141–12145, 2015, doi: 1001-9731(2015)12-12141-05.

[108] Y. Cui, L. Zhao, J. Han, and G. Sun, “High temperature rheological properties and microstructures of asphalt under salt frezing cycles,” *Acta Mater. Compos. Sin.*, vol. 34, no. 8, pp. 1839–1846, 2017, doi: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20161008.002.

[109] Q. Xiao, Y. Wang, H. Hu, and M. Liu, “Mechanism of acetate-based deicer eroding asphalt mixture,” *Eng. J. Wuhan Univ.*, vol. 48, no. 2, pp. 187–190, 2015, doi: 10.14188/j.1671-8844.2015-02-009.

[110] Q. Xaio, X. Bai, H. Hu, and Z. Hou, “Experimental Study on Erosion of Asphalt and Asphalt Mixture by New De-icing Salt,” *China Harb. Eng.*, no. 4, pp. 54–56, 2012, doi: 1003-3688(2012)04-0054-03.

[111] Y. Cui, R. Chen, J. Han, and Z. Li, "Microstructure and Low Temperature Creep Properties of SBS Modified Asphalt and Its Mixture under Salt Freezing Cycle," *Bull. Chin. Ceram. Soc.*, vol. 37, no. 4, pp. 1467–1473, 2018, doi: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2018.04.056.

[112] Y. Cui, G. Sun, J. Han, and L. Zhao, "Microstructure and high-and-low temperature performance of two kinds of asphalt under salt freezing cycle," *Acta Mater. Compos. Sin.*, vol. 34, no. 4, pp. 906–914, 2017, doi: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20160616.004.

[113] В. К. Жданюк, Д. Ю. Костін, and О. О. Воловик, "Дослідження колієстійкості щебенево-мастикових асфальтобетонів при різних температурах," *Автошляховик України*, no. 2, pp. 25–29, 2012.

[114] А. В. Мішутін, "Аналіз факторів, що впливають на колієстійкість асфальтобетону," *Автомобільні Дороги І Дорожнє Будівництво Вун*, vol. 100, pp. 130–148, 2017.

[115] W. Wang, "The Research on the Performance of Asphalt and Asphalt Mixture Under the Effect of Chloride Etching," *Transp. Sci. Technol.*, no. 6, pp. 113–116, 2015, doi: 10.3963/j.isn.1671-7570.2015.06.035.

[116] C. Li, "Study on the influence of chlorine salt snowmelt agent on the road performance of asphalt mixture," *J. China Foreign Highw.*, vol. 36, no. 2, pp. 248–252, 2016, doi: 10.14048/ji.sn.1671-2579.2016.02.056.

[117] R. Chang and P. Hao, "Impact of Freeze-Thaw Cycles with Salt on Low Temperature Properties of Asphalt Mixture," *J. Build. Mater.*, vol. 20, no. 3, pp. 481–488, 2017, doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2017.03.027.

[118] L. Wang, Li. Gong, and Y. Xing, "Researching the influence factors of asphalt mixture performance under the damage of deicing salt and freezing-thawing cycles," *J. Funct. Mater.*, vol. 47, no. 4, pp. 88–93, 2016, doi: 10.3969/i.sn.1001-9731.2016.04.018.

[119] L. Wang and Y. Wang, "Influence Factors of Crack Resistance of Asphalt Mixture under the Damage of Deicing Salt and Freezing-Thawing Cycles," *J. Build. Mater.*, vol. 19, no. 4, pp. 773–778, 2016, doi: 10.3969/j.isn.1007-9629.2016.04.029.

[120] L. Shan, L. Wang, and B. Zhang, "Low Temperature Properties of Warm-Mixed Crumb Rubber Asphalt Mixture under Salt and Freeze-Thaw Cycles," *J. Build. Mater.*, vol. 22, no. 3, pp. 467–473, 2019, doi: 10.3969/j.isn.1007-9629.2019.03.020.

[121] Y. Cui, J. Han, Z. Li, S. Zhang, and Z. Liu, "Research on the performance and microstructure of asphalt under salt freezing cycle," *J. Funct. Mater.*, vol. 46, no. 18, pp. 18037–18042, 2015, doi: 10.3969/j.issn.1001-9731.2015.18.007.

[122] L. Zhang, Y. Xu, and Y. Wang, "Effect of deicing salt on performance of asphalt

mixture and determination of its dosage,” *J. China Foreign Highw.*, vol. 37, no. 1, pp. 197–199, 2017, doi: 10.14048/ji.sn.1671-2579.2017.01.043.

[123] C. Cao, X. Chen, and X. Cao, “Research on Influence of Chloride Salt Snow - melting Agent on Mechanical Property of Aggregate and Adhesivity of Asphalt,” *North. Commun.*, no. 8, pp. 61–63, 2017, doi: 10.15996/j.cnki.bfjt.2017.08.017.

[124] Q. Ma, Ji. Wu, and K. Qin, “Tests and Analyses of the Influence of Chlorine Salt on Freezing-Thawing Splitting Tensile Strength of Asphalt Concrete,” *J. Glaciol. Geocryol.*, vol. 35, no. 5, pp. 1202–1208, 2013, doi: 10.7522/j.isn.1000-0240.2013.0135.

[125] L. Feng, Z. Cui, and C. Li, “Water Stability of Rubber Modified Asphalt Mixture under Salt Freeze Cycle,” *Jianzhu Cailiao Xuebao J. Build. Mater.*, vol. 17, no. 5, 2014, doi: 10.3969/j.isn.1007-9629.2014.05.012.

[126] Ministry of Communications of PRC, “Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering (JTG E20).” Beijing: China Communications Press, 2011(in Chinese).

[127] Ministry of Communications of PRC, “Technical Specification for Construction of Highway Asphalt Pavements (JTG F40).” Beijing: China Communications Press, 2017(in Chinese).

[128] Ministry of Communications of PRC, “Test Methods of Aggregate for Highway Engineering (JTG E42).” Beijing: China Communications Press, 2017(in Chinese).

[129] D. Julong, “Introduction to grey system theory,” *J. Grey Syst.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–24, 1989.

[130] Z. Long, N. Guo, X. Tang, Y. Ding, L. You, and F. Xu, “Microstructural evolution of asphalt induced by chloride salt erosion,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 343, p. 128056, 2022.

[131] A. C. Falchetto, M. I. Turos, and M. O. Marasteanu, “Investigation on asphalt binder strength at low temperatures,” *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 13, no. 4, pp. 804–816, 2012.

[132] L. Li, W. Si, B. Ma, X. Zhou, and Y. Tian, “Impact of freeze-thaw cycles on flexural tensile characteristics of asphalt mixture in cold plateau regions,” *J. Jiangsu Univ. Sci. Ed.*, vol. 36, no. 5, pp. 610–614, 2015, doi: 10.3969/j.issn.1671-7775.2015.05.021.

[133] P. Zhang, “Research on Characteristics and Detection Methods of Asphalt Mixture Damage Induced by Water-Temperature-Radiation,” Jilin university, 2015.

[134] T. Suzuki and T. Fujikawa, “Improvement of hydroplaning performance based on water flow around tires,” SAE Technical Paper, 2001.

[135] Su Xianfeng and Zhao Shile, “Pavement Structure Calculation Based on the New Version of Highway Asphalt Pavement Design Code,” *Eng. Constr.*, vol. 33, no. 3, pp. 430–431, 2019.

- [136] W. B. Horne and R. C. Dreher, *Phenomena of pneumatic tire hydroplaning*, vol. 2056. National Aeronautics and Space Administration, 1963.
- [137] A. Hald, “Nicholas Bernoulli’s theorem,” *Int. Stat. Rev. Int. Stat.*, pp. 93–99, 1984.
- [138] Hu Xiaodi and Sun Lijun, “Measuring Tire Ground Pressure Distribution of Heavy Vehicle,” *J. Tongji Univ. Sci.*, vol. 33, no. 11, pp. 1443–1448, 2005.
- [139] Li Qiang, “Calculation and Research of Hydrodynamic Pressure of Road Surface,” Chongqing Jiaotong University, 2012.
- [140] P. S. Kandhal, C. W. Lubold, and F. L. Roberts, “WATER DAMAGE TO ASPHALT OVERLAYS: CASE HISTORIES (WITH DISCUSSION),” in *Association of Asphalt Paving Technologists Proc*, 1989.
- [141] R. Xiong *et al.*, “Performance evaluation of asphalt mixture exposed to dynamic water and chlorine salt erosion,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 201, pp. 121–126, 2019.
- [142] L. A. Cooley, B. D. Prowell, and E. Brown, “Issues pertaining to the permeability characteristics of coarsegraded superpave mixes,” 2002.
- [143] H. Xu, F. Chen, X. Yao, and Y. Tan, “Micro-scale moisture distribution and hydrologically active pores in partially saturated asphalt mixtures by X-ray computed tomography,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 160, pp. 653–667, 2018.
- [144] K. Zhang, Y. Luo, Z. Li, Y. Zhao, and Y. Zhao, “Evaluation of performance deterioration characteristics of asphalt mixture in corrosion environment formed by snow-melting agents,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 34, no. 3, p. 04021481, 2022.
- [145] A. Galakhova *et al.*, “Corrosion of Stainless Steel by Urea at High Temperature,” *Corros. Mater. Degrad.*, vol. 2, no. 3, pp. 461–473, 2021.
- [146] T. W. Kennedy, F. L. Roberts, and K. W. Lee, “Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixtures using the Texas Freeze-Thaw Pedestal Test,” in *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*, 1982.
- [147] G. W. Maupin Jr, “THE USE OF ANTISTRIPPING ADDITIVES IN VIRGINIA (WITH DISCUSSION),” in *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*, 1982.

ДОДАТКИ

Додаток А

**Експериментальні дані, які можуть бути використані як еталон
(розділ 3)**

Таблиця А.1 – Дані випробувань при стабільності після занурення у воду на 30 хв (АС – 13)

| Кількість циклів | Стабільність після занурення у воду на 30 хв, кН (АС – 13) | | |
|------------------|--|----------------------------------|------------------------------------|
| | NaCl | CH ₄ N ₂ O | CH ₂ CH ₃ OH |
| 0 | 9,48 | 9,48 | 9,48 |
| 5 | 9,195 | 9,045 | 9,335 |
| 10 | 8,85 | 8,59 | 9,13 |
| 15 | 8,455 | 8,145 | 8,92 |
| 20 | 8,12 | 7,64 | 8,75 |
| 25 | 7,795 | 7,29 | 8,495 |
| 30 | 7,41 | 7 | 8,3 |

Таблиця А.2 – Дані випробувань при стабільності після занурення у воду на 48 годин (АС – 13)

| Кількість циклів | Стабільність після занурення у воду на 48 годин, кН (АС – 13) | | |
|------------------|---|----------------------------------|------------------------------------|
| | NaCl | CH ₄ N ₂ O | CH ₂ CH ₃ OH |
| 0 | 8,23 | 8,23 | 8,23 |
| 5 | 7,7 | 7,29 | 7,74 |
| 10 | 7,31 | 6,74 | 7,12 |
| 15 | 6,93 | 6,12 | 6,81 |
| 20 | 6,46 | 5,64 | 6,53 |
| 25 | 6,12 | 5,12 | 6,23 |
| 30 | 5,81 | 4,57 | 6,01 |

Таблиця А.3 – Дані випробувань при стабільності після занурення у воду на 30 хв (АС – 16)

| Кількість циклів | Стабільність після занурення у воду на 30 хв, кН (АС – 16) | | |
|------------------|--|----------------------------------|------------------------------------|
| | NaCl | CH ₄ N ₂ O | CH ₂ CH ₃ OH |
| 0 | 10,05 | 10,05 | 10,05 |
| 5 | 9,64 | 9,48 | 9,7 |
| 10 | 9,23 | 8,93 | 9,31 |
| 15 | 8,925 | 8,155 | 8,88 |
| 20 | 8,56 | 7,44 | 8,47 |
| 25 | 7,855 | 7,185 | 8,11 |
| 30 | 7,11 | 6,95 | 7,75 |

Таблиця А.4 – Дані випробувань при стабільності після занурення у воду на 48 годин (АС – 16)

| Кількість циклів | Стабільність після занурення у воду на 48 годин, кН (АС – 16) | | |
|------------------|---|----------------------------------|------------------------------------|
| | NaCl | CH ₄ N ₂ O | CH ₂ CH ₃ OH |
| 0 | 8,54 | 8,54 | 8,54 |
| 5 | 7,84 | 7,34 | 7,93 |
| 10 | 7,12 | 6,43 | 7,3 |
| 15 | 6,67 | 5,63 | 6,73 |
| 20 | 6,03 | 4,92 | 6,13 |
| 25 | 5,18 | 4,53 | 5,69 |
| 30 | 4,44 | 4,01 | 5,32 |

Таблиця А.5 – Дані випробувань на межу міцності при згинанні (АС – 13)

| Кількість циклів | Межа міцності при згині, МПа (АС – 13) | | |
|------------------|--|----------------------------------|------------------------------------|
| | NaCl | CH ₄ N ₂ O | CH ₂ CH ₃ OH |
| 0 | 11,67 | 11,67 | 11,67 |
| 5 | 10,33 | 10,39 | 11,12 |
| 10 | 9,56 | 9,42 | 10,87 |
| 15 | 8,62 | 8,31 | 10,57 |
| 20 | 7,67 | 7,12 | 10,12 |
| 25 | 6,82 | 6,41 | 8,85 |
| 30 | 6,01 | 5,54 | 7,68 |

Таблиця А.6 – Дані випробувань на межу міцності при згинанні (АС – 16)

| Кількість циклів | Межа міцності при згині, МПа (АС – 16) | | |
|------------------|--|----------------------------------|------------------------------------|
| | NaCl | CH ₄ N ₂ O | CH ₂ CH ₃ OH |
| 0 | 11,13 | 11,13 | 11,13 |
| 5 | 9,45 | 9,83 | 10,59 |
| 10 | 7,95 | 8,79 | 10,09 |
| 15 | 6,85 | 7,87 | 9,52 |
| 20 | 5,98 | 7,01 | 8,95 |
| 25 | 5,68 | 6,27 | 7,81 |
| 30 | 5,42 | 5,68 | 6,74 |

Таблиця А.7 – Дані випробувань залишкової пористості (АС – 13)

| Кількість циклів | Залишкова пористість, % (АС – 13) | | |
|------------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| | NaCl | CH ₄ N ₂ O | CH ₂ CH ₃ OH |
| 0 | 4,51 | 4,51 | 4,51 |
| 5 | 4,79 | 4,91 | 4,63 |
| 10 | 4,94 | 5,03 | 4,83 |
| 15 | 5,03 | 5,27 | 4,92 |
| 20 | 5,18 | 5,39 | 5,01 |
| 25 | 5,26 | 5,61 | 5,04 |
| 30 | 5,36 | 6,05 | 5,1 |

Таблиця А.8 – Дані випробувань залишкової пористості (АС – 16)

| Кількість циклів | Залишкова пористість, % (АС – 16) | | |
|------------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| | NaCl | CH ₄ N ₂ O | CH ₂ CH ₃ OH |
| 0 | 4,23 | 4,23 | 4,23 |
| 5 | 4,45 | 4,73 | 4,34 |
| 10 | 4,71 | 4,97 | 4,51 |
| 15 | 4,89 | 5,18 | 4,66 |
| 20 | 5,14 | 5,54 | 4,94 |
| 25 | 5,46 | 5,87 | 5,09 |
| 30 | 5,89 | 6,38 | 5,24 |

Таблиця А.9 – Дані випробувань коефіцієнта водопроникності (АС – 13)

| Кількість циклів | Коефіцієнт водопроникності, мл/хв (АС – 13) | | |
|------------------|---|----------------------------------|------------------------------------|
| | NaCl | CH ₄ N ₂ O | CH ₂ CH ₃ OH |
| 0 | 81 | 81 | 81 |
| 5 | 83,74463 | 85,2843 | 83,20909 |
| 10 | 85,15041 | 89,83636 | 84,37832 |
| 15 | 86,75702 | 92,71488 | 85,96308 |
| 20 | 93,10696 | 96,85515 | 87,13946 |
| 25 | 96,15519 | 99,62466 | 88,37484 |
| 30 | 96,89198 | 107,4756 | 88,3171 |

Таблиця А.10 – Дані випробувань коефіцієнта водопроникності (АС – 16)

| Кількість циклів | Коефіцієнт водопроникності, мл/хв (АС – 16) | | |
|------------------|---|----------------------------------|------------------------------------|
| | NaCl | CH ₄ N ₂ O | CH ₂ CH ₃ OH |
| 0 | 77 | 77 | 77 |
| 5 | 78,76 | 82,84949 | 77,88 |
| 10 | 81,10667 | 90,23718 | 78,68667 |
| 15 | 88,00609 | 95,4917 | 79,71333 |
| 20 | 93,90012 | 101,5667 | 80,15333 |
| 25 | 99,80753 | 109,78 | 86,16667 |
| 30 | 106,5357 | 116,7467 | 91,96 |

Додаток Б

Експериментальні дані отримані в результаті досліджень (розділ 4)

Таблиця Б.1 – Дані випробувань при стабільності після занурення у воду на 30 хв (АС – 13, CH₄N₂O)

| Кількість циклів | Стабільність після занурення у воду на 30 хв, кН (АС – 13, CH ₄ N ₂ O) | | |
|------------------|--|--------|--------|
| | – 5°C | – 15°C | – 25°C |
| 0 | 9,48 | 9,48 | 9,48 |
| 5 | 9,13 | 8,74 | 8,63 |
| 10 | 8,54 | 8,17 | 7,92 |
| 15 | 8,15 | 7,59 | 7,35 |
| 20 | 7,59 | 7,03 | 6,82 |
| 25 | 7,15 | 6,48 | 5,98 |
| 30 | 6,73 | 5,82 | 5,45 |

Таблиця Б.2 – Дані випробувань при стабільності після занурення у воду на 48 годин (АС – 13, CH₄N₂O)

| Кількість циклів | Стабільність після занурення у воду на 48 годин, кН (АС – 13, CH ₄ N ₂ O) | | |
|------------------|---|--------|--------|
| | – 5°C | – 15°C | – 25°C |
| 0 | 8,23 | 8,23 | 8,23 |
| 5 | 7,81 | 7,44 | 7,28 |
| 10 | 7,15 | 6,75 | 6,38 |
| 15 | 6,65 | 6,09 | 5,77 |
| 20 | 6,07 | 5,38 | 5,05 |
| 25 | 5,61 | 4,79 | 4,31 |
| 30 | 5,16 | 4,19 | 3,84 |

Таблиця Б.3 – Дані випробувань при стабільності після занурення у воду на 30 хв (АС – 16, CH₄N₂O)

| Кількість циклів | Стабільність після занурення у воду на 30 хв, кН (АС – 16, CH ₄ N ₂ O) | | |
|------------------|--|--------|--------|
| | – 5°C | – 15°C | – 25°C |
| 0 | 10,05 | 10,05 | 10,05 |
| 5 | 9,56 | 9,19 | 8,94 |
| 10 | 8,74 | 8,25 | 7,88 |
| 15 | 8,11 | 7,68 | 7,05 |
| 20 | 7,76 | 7,01 | 6,17 |
| 25 | 7,01 | 6,42 | 5,46 |
| 30 | 6,25 | 5,81 | 5,02 |

Таблиця Б.4 – Дані випробувань при стабільності після занурення у воду на 48 годин (АС – 16, CH₄N₂O)

| Кількість циклів | Стабільність після занурення у воду на 48 годин, кН (АС – 16, CH ₄ N ₂ O) | | |
|------------------|---|--------|--------|
| | – 5°C | – 15°C | – 25°C |
| 0 | 8,54 | 8,54 | 8,54 |
| 5 | 7,85 | 7,34 | 7,11 |
| 10 | 7,03 | 6,37 | 5,94 |
| 15 | 6,41 | 5,64 | 5,14 |
| 20 | 5,97 | 5,02 | 4,37 |
| 25 | 5,28 | 4,47 | 3,75 |
| 30 | 4,59 | 3,94 | 3,34 |

Таблиця Б.5 – Дані випробувань при стабільності після занурення у воду на 30 хв (АС – 13, NaCl)

| Кількість циклів | Стабільність після занурення у воду на 30 хв, кН (АС – 13, NaCl) | | |
|------------------|--|--------|--------|
| | – 5°C | – 15°C | – 25°C |
| 0 | 9,48 | 9,48 | 9,48 |
| 5 | 9,27 | 9,12 | 8,85 |
| 10 | 8,92 | 8,79 | 8,36 |
| 15 | 8,57 | 8,36 | 7,93 |
| 20 | 8,25 | 8,14 | 7,52 |
| 25 | 8,03 | 7,71 | 7,08 |
| 30 | 7,63 | 7,42 | 6,61 |

Таблиця Б.6 – Дані випробувань при стабільності після занурення у воду на 48 годин (АС – 13, NaCl)

| Кількість циклів | Стабільність після занурення у воду на 48 годин, кН (АС – 13, NaCl) | | |
|------------------|---|--------|--------|
| | – 5°C | – 15°C | – 25°C |
| 0 | 8,23 | 8,23 | 8,23 |
| 5 | 8,02 | 7,82 | 7,56 |
| 10 | 7,61 | 7,45 | 6,94 |
| 15 | 7,25 | 7,01 | 6,45 |
| 20 | 6,94 | 6,76 | 5,87 |
| 25 | 6,73 | 6,32 | 5,39 |
| 30 | 6,38 | 6,01 | 4,91 |

Таблиця Б.7 – Дані випробувань при стабільності після занурення у воду на 30 хв (АС – 16, NaCl)

| Кількість циклів | Стабільність після занурення у воду на 30 хв, кН (АС – 16, NaCl) | | |
|------------------|--|--------|--------|
| | – 5°C | – 15°C | – 25°C |
| 0 | 10,05 | 10,05 | 10,05 |
| 5 | 9,82 | 9,69 | 9,57 |
| 10 | 9,34 | 9,15 | 9,03 |
| 15 | 8,87 | 8,78 | 8,36 |
| 20 | 8,44 | 8,27 | 7,87 |
| 25 | 8,19 | 7,69 | 7,16 |
| 30 | 7,85 | 7,28 | 6,51 |

Таблиця Б.8 – Дані випробувань при стабільності після занурення у воду на 48 годин (АС – 16, NaCl)

| Кількість циклів | Стабільність після занурення у воду на 48 годин, кН (АС – 16, NaCl) | | |
|------------------|---|--------|--------|
| | – 5°C | – 15°C | – 25°C |
| 0 | 8,54 | 8,54 | 8,54 |
| 5 | 8,23 | 8,01 | 7,87 |
| 10 | 7,74 | 7,42 | 7,15 |
| 15 | 7,24 | 7,01 | 6,39 |
| 20 | 6,81 | 6,49 | 5,76 |
| 25 | 6,51 | 5,92 | 5,03 |
| 30 | 6,19 | 5,51 | 4,43 |

Таблиця Б.9 – Дані випробувань при стабільності після занурення у воду на 30 хв (АС – 13, CH₂CH₃ОН)

| Кількість циклів | Стабільність після занурення у воду на 30 хв, кН (АС – 13, CH ₂ CH ₃ ОН) | | |
|------------------|--|--------|--------|
| | – 5°C | – 15°C | – 25°C |
| 0 | 9,48 | 9,48 | 9,48 |
| 5 | 9,31 | 9,17 | 8,81 |
| 10 | 9,05 | 8,96 | 8,14 |
| 15 | 8,67 | 8,57 | 7,62 |
| 20 | 8,37 | 8,24 | 7,15 |
| 25 | 8,14 | 7,98 | 6,85 |
| 30 | 7,82 | 7,59 | 6,31 |

Таблиця Б.10 – Дані випробувань при стабільності після занурення у воду на 48 годин (АС – 13, CH₂CH₃ОН)

| Кількість циклів | Стабільність після занурення у воду на 48 годин, кН (АС – 13, CH ₂ CH ₃ ОН) | | |
|------------------|---|--------|--------|
| | – 5°C | – 15°C | – 25°C |
| 0 | 8,23 | 8,23 | 8,23 |
| 5 | 8,04 | 7,91 | 7,49 |
| 10 | 7,74 | 7,64 | 6,71 |
| 15 | 7,35 | 7,25 | 6,11 |
| 20 | 7,04 | 6,89 | 5,54 |
| 25 | 6,81 | 6,63 | 5,18 |
| 30 | 6,52 | 6,24 | 4,63 |

Таблиця Б.11 – Дані випробувань при стабільності після занурення у воду на 30 хв (АС – 16, CH₂CH₃ОН)

| Кількість циклів | Стабільність після занурення у воду на 30 хв, кН (АС – 16, CH ₂ CH ₃ ОН) | | |
|------------------|--|--------|--------|
| | – 5°C | – 15°C | – 25°C |
| 0 | 10,05 | 10,05 | 10,05 |
| 5 | 9,86 | 9,73 | 9,49 |
| 10 | 9,46 | 9,27 | 8,91 |
| 15 | 9,05 | 8,87 | 8,26 |
| 20 | 8,59 | 8,45 | 7,74 |
| 25 | 8,32 | 7,78 | 7,11 |
| 30 | 7,88 | 7,35 | 6,41 |

Таблиця Б.12 – Дані випробувань при стабільності після занурення у воду на 48 годин (АС – 16, $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$)

| Кількість циклів | Стабільність після занурення у воду на 48 годин, кН (АС – 16, $\text{CH}_2\text{CH}_3\text{OH}$) | | |
|------------------|---|--------|--------|
| | – 5°C | – 15°C | – 25°C |
| 0 | 8,54 | 8,54 | 8,54 |
| 5 | 8,31 | 8,06 | 7,75 |
| 10 | 7,85 | 7,58 | 7,03 |
| 15 | 7,46 | 7,09 | 6,21 |
| 20 | 6,95 | 6,68 | 5,54 |
| 25 | 6,67 | 6,01 | 4,96 |
| 30 | 6,25 | 5,62 | 4,33 |

Таблиця Б.13 – Дані випробувань на міцність при розтріскуванні (АС – 13, $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$)

| Кількість циклів | Міцність при розколюванні, МПа (АС – 13, $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) | | |
|------------------|--|--------|--------|
| | – 5°C | – 15°C | – 25°C |
| 0 | 1.35 | 1.35 | 1.35 |
| 5 | 1.26 | 1.20 | 1.20 |
| 10 | 1.18 | 1.11 | 1.10 |
| 15 | 1.11 | 1.02 | 0.98 |
| 20 | 1.03 | 0.92 | 0.91 |
| 25 | 0.97 | 0.86 | 0.84 |
| 30 | 0.91 | 0.78 | 0.76 |

Таблиця Б.14 – Дані випробувань на міцність при розтріскуванні (АС – 16, $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$)

| Кількість циклів | Міцність при розколюванні, МПа (АС – 16, $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) | | |
|------------------|--|--------|--------|
| | – 5°C | – 15°C | – 25°C |
| 0 | 1.31 | 1.31 | 1.31 |
| 5 | 1.21 | 1.18 | 1.14 |
| 10 | 1.14 | 1.06 | 1 |
| 15 | 1.05 | 0.92 | 0.88 |
| 20 | 0.95 | 0.84 | 0.73 |
| 25 | 0.88 | 0.72 | 0.61 |
| 30 | 0.86 | 0.63 | 0.54 |

Таблиця Б.15 – Дані випробувань на міцність при розтріскуванні
(АС – 13, NaCl)

| Кількість циклів | Міцність при розколюванні, МПа (АС – 13, NaCl) | | |
|------------------|--|--------|--------|
| | – 5°C | – 15°C | – 25°C |
| 0 | 1.35 | 1.35 | 1.35 |
| 5 | 1.26 | 1.25 | 1.23 |
| 10 | 1.21 | 1.17 | 1.1 |
| 15 | 1.14 | 1.09 | 1.03 |
| 20 | 1.08 | 1.03 | 0.94 |
| 25 | 1.02 | 0.98 | 0.86 |
| 30 | 0.98 | 0.93 | 0.82 |

Таблиця Б.16 – Дані випробувань на міцність при розтріскуванні
(АС – 16, NaCl)

| Кількість циклів | Міцність при розколюванні, МПа (АС – 16, NaCl) | | |
|------------------|--|--------|--------|
| | – 5°C | – 15°C | – 25°C |
| 0 | 1.31 | 1.31 | 1.31 |
| 5 | 1.24 | 1.23 | 1.21 |
| 10 | 1.18 | 1.17 | 1.14 |
| 15 | 1.11 | 1.08 | 1.07 |
| 20 | 1.03 | 1.03 | 0.99 |
| 25 | 0.99 | 0.97 | 0.9 |
| 30 | 0.95 | 0.9 | 0.81 |

Таблиця Б.17 – Дані випробувань на міцність при розтріскуванні
(АС – 13, CH₂CH₃ОН)

| Кількість циклів | Міцність при розколюванні, МПа (АС – 13, CH ₂ CH ₃ ОН) | | |
|------------------|--|--------|--------|
| | – 5°C | – 15°C | – 25°C |
| 0 | 1.35 | 1.35 | 1.35 |
| 5 | 1.27 | 1.26 | 1.22 |
| 10 | 1.22 | 1.18 | 1.08 |
| 15 | 1.16 | 1.1 | 1.02 |
| 20 | 1.08 | 1.04 | 0.91 |
| 25 | 1.02 | 0.99 | 0.87 |
| 30 | 0.98 | 0.94 | 0.81 |

Таблиця Б.18 – Дані випробувань на міцність при розтріскуванні (АС – 16, CH₂CH₃ОН)

| Кількість циклів | Міцність при розколюванні, МПа (АС – 16, CH ₂ CH ₃ ОН) | | |
|------------------|--|--------|--------|
| | – 5°C | – 15°C | – 25°C |
| 0 | 1.31 | 1.31 | 1.31 |
| 5 | 1.26 | 1.24 | 1.19 |
| 10 | 1.19 | 1.18 | 1.12 |
| 15 | 1.13 | 1.09 | 1.04 |
| 20 | 1.05 | 1.04 | 0.94 |
| 25 | 1.01 | 0.97 | 0.87 |
| 30 | 0.95 | 0.91 | 0.78 |

Таблиця Б.19 – Дані випробувань залишкової пористості (АС – 13, – 5°C)

| Кількість циклів | Залишкова пористість, % (АС – 13, – 5°C) | | |
|------------------|--|----------------------------------|------------------------------------|
| | NaCl | CH ₄ N ₂ O | CH ₂ CH ₃ ОН |
| 0 | 4,51 | 4,51 | 4,51 |
| 5 | 4,78 | 4,93 | 4,62 |
| 10 | 4,95 | 5,09 | 4,84 |
| 15 | 5,04 | 5,34 | 4,94 |
| 20 | 5,17 | 5,48 | 5,03 |
| 25 | 5,28 | 5,83 | 5,09 |
| 30 | 5,39 | 6,28 | 5,14 |

Таблиця Б.20 – Дані випробувань залишкової пористості (АС – 16, – 5°C)

| Кількість циклів | Залишкова пористість, % (АС – 16, – 5°C) | | |
|------------------|--|----------------------------------|------------------------------------|
| | NaCl | CH ₄ N ₂ O | CH ₂ CH ₃ ОН |
| 0 | 4,23 | 4,23 | 4,23 |
| 5 | 4,43 | 4,75 | 4,35 |
| 10 | 4,72 | 5,01 | 4,53 |
| 15 | 4,91 | 5,26 | 4,71 |
| 20 | 5,13 | 5,85 | 4,98 |
| 25 | 5,47 | 6,25 | 5,14 |
| 30 | 5,93 | 6,54 | 5,23 |

Таблиця Б.21 – Дані випробувань залишкової пористості (АС – 13, – 15°C)

| Кількість циклів | Залишкова пористість, % (АС – 13, – 15°C) | | |
|------------------|---|----------------------------------|------------------------------------|
| | NaCl | CH ₄ N ₂ O | CH ₂ CH ₃ OH |
| 0 | 4,51 | 4,51 | 4,51 |
| 5 | 4,79 | 4,98 | 4,63 |
| 10 | 4,96 | 5,28 | 4,85 |
| 15 | 5,06 | 5,52 | 4,96 |
| 20 | 5,39 | 6,14 | 5,15 |
| 25 | 5,59 | 7,58 | 5,38 |
| 30 | 6,05 | 8,12 | 5,6 |

Таблиця Б.22 – Дані випробувань залишкової пористості (АС – 16, – 15°C)

| Кількість циклів | Залишкова пористість, % (АС – 16, – 15°C) | | |
|------------------|---|----------------------------------|------------------------------------|
| | NaCl | CH ₄ N ₂ O | CH ₂ CH ₃ OH |
| 0 | 4,23 | 4,23 | 4,23 |
| 5 | 4,46 | 4,73 | 4,42 |
| 10 | 4,73 | 5,21 | 4,63 |
| 15 | 4,98 | 6,41 | 4,76 |
| 20 | 5,21 | 7,49 | 5,12 |
| 25 | 5,52 | 8,35 | 5,14 |
| 30 | 6,01 | 8,98 | 5,68 |

Таблиця Б.23 – Дані випробувань залишкової пористості (АС – 13, – 25°C)

| Кількість циклів | Залишкова пористість, % (АС – 13, – 25°C) | | |
|------------------|---|----------------------------------|------------------------------------|
| | NaCl | CH ₄ N ₂ O | CH ₂ CH ₃ OH |
| 0 | 4,51 | 4,51 | 4,51 |
| 5 | 4,82 | 4,91 | 4,69 |
| 10 | 5,04 | 5,37 | 4,98 |
| 15 | 5,25 | 6,18 | 5,09 |
| 20 | 6,15 | 7,42 | 5,97 |
| 25 | 7,52 | 8,21 | 7,32 |
| 30 | 7,99 | 8,62 | 7,74 |

Таблиця Б.24 – Дані випробувань залишкової пористості (АС – 16, – 25°C)

| Кількість циклів | Залишкова пористість, % (АС – 16, – 25°C) | | |
|------------------|---|----------------------------------|------------------------------------|
| | NaCl | CH ₄ N ₂ O | CH ₂ CH ₃ OH |
| 0 | 4,23 | 4,23 | 4,23 |
| 5 | 4,45 | 4,73 | 4,34 |
| 10 | 4,71 | 5,12 | 4,51 |
| 15 | 5,68 | 6,57 | 5,48 |
| 20 | 6,88 | 7,85 | 6,38 |
| 25 | 7,98 | 8,69 | 7,64 |
| 30 | 8,74 | 9,24 | 8,41 |

Таблиця Б.25 – Дані випробувань коефіцієнта водопроникності (АС – 13, – 5°C)

| Кількість циклів | Коефіцієнт водопроникності, мл/хв (АС – 13, – 5°C) | | |
|------------------|--|----------------------------------|------------------------------------|
| | NaCl | CH ₄ N ₂ O | CH ₂ CH ₃ OH |
| 0 | 81.00 | 81.00 | 81.00 |
| 5 | 83.88 | 85.62 | 83.28 |
| 10 | 85.35 | 89.90 | 84.88 |
| 15 | 87.09 | 93.52 | 86.29 |
| 20 | 93.59 | 98.07 | 88.03 |
| 25 | 98.87 | 104.23 | 91.38 |
| 30 | 103.96 | 115.34 | 95.46 |

Таблиця Б.26 – Дані випробувань коефіцієнта водопроникності (АС – 16, – 5°C)

| Кількість циклів | Коефіцієнт водопроникності, мл/хв (АС – 16, – 5°C) | | |
|------------------|--|----------------------------------|------------------------------------|
| | NaCl | CH ₄ N ₂ O | CH ₂ CH ₃ OH |
| 0 | 77.00 | 77.00 | 77.00 |
| 5 | 78.98 | 82.85 | 77.88 |
| 10 | 81.33 | 90.24 | 78.69 |
| 15 | 89.10 | 95.49 | 79.71 |
| 20 | 94.89 | 101.57 | 80.89 |
| 25 | 100.91 | 109.78 | 87.63 |
| 30 | 108.02 | 116.75 | 100.83 |

Таблиця Б.27 – Дані випробувань коефіцієнта водопроникності (АС – 13, – 15°C)

| Кількість циклів | Коефіцієнт водопроникності, мл/хв (АС – 13, – 15°C) | | |
|------------------|---|----------------------------------|------------------------------------|
| | NaCl | CH ₄ N ₂ O | CH ₂ CH ₃ OH |
| 0 | 81.00 | 81.00 | 81.00 |
| 5 | 84.55 | 85.28 | 83.41 |
| 10 | 86.69 | 90.84 | 85.15 |
| 15 | 89.17 | 95.75 | 85.95 |
| 20 | 93.45 | 115.35 | 87.83 |
| 25 | 102.02 | 127.83 | 93.45 |
| 30 | 108.78 | 138.65 | 102.56 |

Таблиця Б.28 – Дані випробувань коефіцієнта водопроникності (АС – 16, – 15°C)

| Кількість циклів | Коефіцієнт водопроникності, мл/хв (АС – 16, – 15°C) | | |
|------------------|---|----------------------------------|------------------------------------|
| | NaCl | CH ₄ N ₂ O | CH ₂ CH ₃ OH |
| 0 | 77.00 | 77.00 | 77.00 |
| 5 | 79.13 | 83.23 | 78.39 |
| 10 | 83.31 | 92.25 | 80.30 |
| 15 | 90.13 | 102.84 | 80.96 |
| 20 | 95.48 | 126.49 | 83.82 |
| 25 | 104.50 | 155.06 | 91.96 |
| 30 | 120.63 | 168.73 | 109.63 |

Таблиця Б.29 – Дані випробувань коефіцієнта водопроникності (АС – 13, – 25°C)

| Кількість циклів | Коефіцієнт водопроникності, мл/хв (АС – 13, – 25°C) | | |
|------------------|---|----------------------------------|------------------------------------|
| | NaCl | CH ₄ N ₂ O | CH ₂ CH ₃ OH |
| 0 | 81.00 | 81.00 | 81.00 |
| 5 | 85.55 | 85.42 | 83.21 |
| 10 | 91.38 | 95.53 | 88.23 |
| 15 | 95.40 | 103.04 | 96.50 |
| 20 | 106.41 | 122.80 | 101.59 |
| 25 | 120.23 | 133.19 | 117.23 |
| 30 | 136.19 | 154.02 | 133.19 |

Таблиця Б.30 – Дані випробувань коефіцієнта водопроникності (АС – 16, – 25°C)

| Кількість циклів | Коефіцієнт водопроникності, мл/хв (АС – 16, – 25°C) | | |
|------------------|---|----------------------------------|------------------------------------|
| | NaCl | CH ₄ N ₂ O | CH ₂ CH ₃ OH |
| 0 | 77.00 | 77.00 | 77.00 |
| 5 | 78.76 | 84.63 | 78.32 |
| 10 | 81.11 | 92.91 | 80.15 |
| 15 | 100.61 | 118.15 | 91.75 |
| 20 | 123.96 | 155.06 | 116.34 |
| 25 | 155.70 | 174.42 | 143.91 |
| 30 | 172.13 | 180.99 | 163.39 |

Додаток В**Список публікацій здобувача за темою дисертації**

– матеріали дисертаційної роботи, викладені у квазіперіодичному виданні, що внесено до міжнародних науково-метричних баз Scopus / WoS:

[1] M. Guo, T. Nian, P. Li, V. P. Kovalskiy, “Exploring the short-term water damage characteristics of asphalt mixtures: The combined effect of salt erosion and dynamic water scouring,” *Construction and building materials*, vol. 411, p. 134310, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134310>.

[2] M. Guo, V. P. Kovalskiy, T. Nian, P. Li, “Influence of Deicer on Water Stability of Asphalt Mixture under Freeze–Thaw Cycle”, *Sustainability*, vol. 15(18), p. 13707, 2023. <https://doi.org/10.3390/su151813707>.

– матеріали дисертаційної роботи, викладені у виданнях, що внесені до переліку фахових для захисту дисертацій з технічних наук:

[3] В. П. Ковальський, Г. Мінцзюнь, “Вплив протижеледної солі на пористість асфальтобетону при поперемінному заморожуванні та відтаванні”, *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*, т. 34, № 1, с. 43-50, 2023. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-1-43-50>.

[4] Г. Мінцзюнь, С. В. Королевська, “Стійкість до розтріскування асфальтобетону, насиченого дорожньою сіллю, при заморожуванні”, *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*, т. 33, № 2 с. 54-59, 2022. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2022-2-54-59>.

[5] Г. Мінцзюнь, В. П. Ковальський, “Вплив протижеледної солі на експлуатаційні характеристики асфальтобетонних сумішей у Північно-Західному Китаї: дослідження механічних властивостей та факторів впливу”, *Сучасне будівництво та архітектура*, № 5, с. 90-99, 2023. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2023-5-90-99>.

[6] В. П. Ковальський, Г. Мінцзюнь, “Вплив протижеледних речовин

на залишкову пористість і водопроникність асфальтобетону при поперемінному насиченні та висушуванні”, *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, № 20, с. 63–71, 2023. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-10\(20\)-07](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-10(20)-07).

– матеріали дисертаційної роботи, викладені у закордонному науковому виданні держави, яка входить до Європейського Союзу:

[7] V. P. Kovalskiy, M. Guo, “Effect of deicing salt on permeability coefficient of asphalt mixture under freeze-thaw cycle” *SWorldJournal*, no. 22-02, pp. 3–10, 2023. <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2023-22-02-007>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

[8] Г. Мінцзюнь, та В. П. Ковальський, “Research of mechanical properties of bituminous concrete at low-temperature”, In *Applied Scientific and Technical Research: proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference*, Ivano-Frankivsk, April 1–3, 2020. V. 2: p. 104-105. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/30435>

[9] Г. Мінцзюнь, В. П. Ковальський, та М. Д. Бондар, “Common evaluation methods for water stability of asphalt mixture”, на *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Енергоефективність в галузях економіки України"*, Вінниця, 2021. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2021/paper/view/14092>

[10] В. П. Ковальський, та Г. Мінцзюнь, “The main areas of research on the durability of asphalt concrete under the influence of anti-icing reagents”, на *Органічні і мінеральні в’язучі та дорожні бетони на їх основі : збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції*, Харків, 2022. с. 65-67. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/37030>

[11] Г. Мінцзюнь, та В. П. Ковальський, “Overview of the test method for road pavement at high temperatures”, на *Матеріали XLIX науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 2020. [Електронний ресурс]. Режим

доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2020/paper/view/8817>

Додаток Г

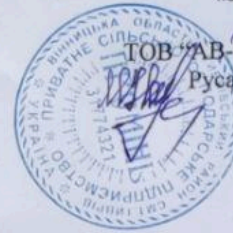
Акти впровадження результатів дослідження

Товариство з обмеженою відповідальністю «АВ-Поділлябуд»

23300, Вінницька обл., смт. Тиврів,
вул. Злагоди 28, ЄДРПОУ: 43642280

«Затверджую»

Директор

ТОВ «АВ-Поділлябуд»
Русавський А. В.

№ 221 видана 05. 06. 2023р.

Довідка видана для подання
до спеціалізованої вченої ради.

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня
доктора філософії Го Мінцзюня

Даною довідкою засвідчується, що результати наукових досліджень в дисертаційній роботі Го Мінцзюня на тему «Удосконалення методики визначення та прогнозування зміни експлуатаційних характеристик асфальтобетонного покриття доріг при впливі протижелезних речовин в умовах клімату Північно-Західного Китаю» використанні в процесі проведення дослідно-промислової апробації для прогнозування експлуатаційних властивостей асфальтобетону. Результати прогнозованих значень водостійкості асфальтобетону в умовах впливу протижелезних речовин при поперемінному насиченні та зневодненні відповідають результатам проведених лабораторних випробувань. Відносна похибка між експериментальними та прогнозованими значеннями складає 1,8 %. Отримана автором удосконалена модель NPGM(1,N) була застосована для прогнозування водостійкості тротуарної плитки. Відносна похибка між експериментальними значеннями водостійкості та прогнозованими значеннями складає 2,2 %.

Застосування розробленої автором моделі NPGM(1,N) для прогнозування експлуатаційних властивостей зразків з асфальтобетону дозволяє зменшити вартість проведення досліджень на 32%, що в свою чергу дає можливість отримати економічний ефект в розмірі 320 ум. од. з кожної 1000 ум. од., витрачених на проведення досліджень.

Розроблена автором Го Мінцзюнь модель NPGM(1,N) була впроваджена для проведення попередньої оцінки водостійкості в умовах будівельної лабораторії підприємства ТОВ «АВ-Поділлябуд» при дослідженні нових рецептурних складів бетону.

Головний інженер ТОВ «АВ-Поділлябуд»

Гришук О. М.

Гол. бухгалтер ТОВ «АВ-Поділлябуд»

Матвієнко Н. О.

Завідувач лабораторією ТОВ «АВ-Поділлябуд»

Полятичко Л. П.





«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Проректор з науково-педагогічної
 роботи та організації освітнього
 процесу, канд. техн. наук, доцент
 Олександр ПЕТРОВ
 «24» жовтня 2023р.

АКТ

**впровадження результатів дисертаційної роботи Го Мінцюзня
 «Удосконалення методики визначення та прогнозування зміни
 експлуатаційних характеристик асфальтобетонного покриття доріг при
 впливі протижелезних речовин в умовах клімату Північно-Західного
 Китаю» у навчальний процес**

Члени комісії у складі: завідувача кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, канд. техн. наук, доцента Швеця В. В., канд. техн. наук, доцента Очеретного В. П., канд. техн. наук, доцента Бондар А.В. склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Го Мінцюзня на тему «Удосконалення методики визначення та прогнозування зміни експлуатаційних характеристик асфальтобетонного покриття доріг при впливі протижелезних речовин в умовах клімату Північно-Західного Китаю», яка виконана під науковим керівництвом канд. техн. наук, доцента кафедри міського господарства та архітектури Вінницького національного технічного університету Ковальського Віктора Павловича за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія, впроваджено у навчальний процес вивчення дисциплін «Будівельне матеріалознавство» та «Будівельні матеріали та виробы» для студентів спеціальностей 192 Будівництво та цивільна інженерія.

Таким чином, комісія констатує, що наведені результати дисертаційної роботи Го Мінцюзня використовуються в навчальному процесі у Вінницькому національному технічному університеті.

Завідувач кафедри будівництва,
 міського господарства та
 архітектури, канд. техн. наук, доцент

Віталій ШВЕЦЬ

Доцент кафедри будівництва,
 міського господарства та
 архітектури, канд. техн. наук, доцент

Володимир ОЧЕРЕТНИЙ

Доцент кафедри будівництва,
 міського господарства та
 архітектури, канд. техн. наук, доцент

Альона БОНДАР