

Національний транспортний університет
Міністерства освіти і науки України

Національний транспортний університет
Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

СОКОЛОВ ОЛЕКСІЙ ВЛАДИСЛАВОВИЧ

УДК 625.85

ДИСЕРТАЦІЯ

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБЛЕННЯ АСФАЛЬТОБЕТОННИХ
СУМІШЕЙ ІЗ ЗОЛОЮ-ВИНЕСЕННЯ ДЛЯ ВЛАШТУВАННЯ ШАРІВ
ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ

СПЕЦІАЛЬНІСТЬ: 192 – БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ: АРХІТЕКТУРА ТА БУДІВНИЦТВО

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ О. В. Соколов

Наукові керівники –

Мозговий Володимир Васильович

доктор технічних наук, професор

Каськів Володимир Іванович

кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Соколов О. В. Удосконалення технології вироблення асфальтобетонних сумішей із золою-винесення для влаштування шарів дорожнього одягу.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю: 192 – «Будівництво та цивільна інженерія». – Національний транспортний університет, Київ, 2024.

Підготовлена дисертація – це актуальне наукове дослідження в сфері дорожнього будівництва шляхом впровадження нових видів асфальтобетонних шарів для розвитку дорожньої галузі в цілому та підвищення рівня екологічного стану України. У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-практична задача, що полягає у вивченні та впровадженні такого матеріалу, як асфальтобетонна суміш із золою-винесення для асфальтобетонних шарів дорожнього одягу.

У першому розділі проаналізовано проблему кондиційних мінеральних порошків та стан екологічного питання що до відходів від електрогенеруючих підприємств, проведено аналіз закордонних досліджень та існуючого досвіду використання асфальтобетону із золою-винесення, умов його проектування та застосування, визначено переваги та недоліки таких сумішей.

У другому розділі визначено узагальнені передумови найбільш вагомих параметрів, які впливають на впровадження та проектування асфальтобетонів із золою-винесення. Виконано порівняння стандартного вапнякового наповнювача та золи-винесення різного походження за такими показниками як: адгезійна активність, стійкість до технологічного старіння асфальтов'язучого на їх основі, а також структурувальну здатність за різних експлуатаційних та технологічних температур. Встановлена можливість використання золи-винесення як наповнювача в асфальтобетоні, із цією метою розроблено коефіцієнт якості та критерій придатності золи-винесення як наповнювача асфальтобетонних сумішей. Розроблено математичну модель оптимізації зернового складу мінеральної частини асфальтобетонної суміші, зокрема з наповнювачем із золою-

винесення. Розв'язання задачі здійснюється з використанням алгоритмів нелінійної оптимізації методом узагальненого зведеного градієнта або еволюційним методом. Розроблена математичка модель дозволила удосконалити метод проектування зернового складу асфальтобетонних сумішей та розробити програмне забезпечення із застосуванням програм табличного процесора Excel. Використання даного методу дозволить пришвидшити оптимізацію зернового складу асфальтобетонної суміші, а також завдяки цьому можна вийти на найщільнішу можливу градацію зернового складу мінеральної частини асфальтобетонної суміші, яка називається максимальною градацією щільності або іноді кривою максимальної щільності Фуллера (W.B. Fuller), ці дані дозволяють підібрати оптимальне співвідношення компонентів для виготовлення асфальтобетону з визначеним гранулометричним складом, що відповідає встановленим вимогам. Такий підхід гарантує високу якість та стабільність асфальтобетону, а також забезпечує довговічність асфальтобетонних шарів.

У третьому розділі встановлено відповідність золи-винесення згідно національних стандартів. Виявлено закономірності впливу золи-винесення на атмосферостійкість асфальтобетону.

Встановлено оптимальний вміст бітуму в складі асфальтобетонної суміші із золою-винесення становить 5,5 %, а для вапняку – 6 %, що говорить про економічну доцільність використання золи-винесення для виготовлення асфальтобетону. Розрахунковий модуль пружності асфальтобетону із золою-винесення практично не відрізняються від асфальтобетону з вапняковим наповнювачем. Додавання золи-винесення дозволяє підвищити модуль пружності асфальтобетону, що робить його більш стійким до руйнування та зносу під впливом навантажень і погодних умов.

У четвертому розділі розроблено метод визначення ущільнюваності асфальтобетонної суміші, який дозволяє визначити закінчення ущільнення асфальтобетонної суміші з оптимальним значенням залишкової пористості, встановлено, що асфальтобетонна суміш із золою-винесення ущільнюється швидше ніж з вапняковим наповнювачем на 7 %, що може свідчити про

можливість зменшення кількості проходів катка в польових умовах. Розроблені практичні рекомендації щодо виробництва асфальтобетонних сумішей та виконано виробниче впровадження отриманих результатів.

Результати досліджень впроваджено при розробленні державних нормативних документів, зокрема при перегляді ДСТУ Б В.2.7-121:2014 та розробки стандартів серії ДСТУ EN 13108.

На підставі техніко-економічних розрахунків підтверджена доцільність застосування золи-винесення як наповнювача в асфальтобетоні. Враховуючі, що асфальтобетон із золою-винесення – це звичайний вид асфальтобетону, при влаштуванні якого технологія практично не змінюється і тому можна порівняти зі звичайним асфальтобетоном також типу, завдяки визначеним вагомим економічним факторам таким як матеріали (зерновий склад) здешевлення (до 10,5 %), вартість суміші (до 6 %), впровадження асфальтобетону із золою-винесення в Україні відкриває можливість ремонтувати старі та будувати нові асфальтобетонні дороги за більш вигідними цінами. Зекономлені кошти можна направити на відбудову країни в після воєнний час.

Ключові слова: автомобільна дорога, дорожній одяг, асфальтобетонна суміш, зола-винесення, асфальтобетон, наповнювач, екологія, відходи промисловості.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. V.I Kaskiv, O.V. Sokolov, V.V. Mozghovyi. Assessment of the impact of fly ash on the technological aging of bitumen in the asphalt binder system. *World Science* 2024. 1(83). DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30032024/8109

2. Ivan Kopynets, Oleksii Sokolov, Comparison of density of asphalt concrete mixture with fly ash and limestone filler. *Modern Science*. 2023 No 4

DOI: 10.62204/2336-498X-2023-4-15

Статті у фахових виданнях:

3. Соколов О. В., Желотобрях А. Д., Копинець І. В., Каськів В. І. Використання відходів промисловості в дорожньому будівництві. *Дороги і мости*. 2020. Вип. 21. С. 110–119.

DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.110>

4. Копинець І.В., Соколов О.В., Желтобрях А.Д., Головченко В.С. Дослідження можливості використання дробильних матеріалів виробництва ВАТ «Нікопольський завод феросплавів» під час будівництва доріг. *Автошляховик України*. № 4. 2020.

DOI: [10.33868/0365-8392-2020-4-264-52-58](https://doi.org/10.33868/0365-8392-2020-4-264-52-58)

5. Каськів В. І., Копинець І. В., Соколов О. В. Дослідження властивостей пилюватих відходів з електрогенеруючих підприємств України. *Дороги і мости*. 2021. Вип. 23. С. 94–101.

DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.23.094>

6. Каськів В. І., Копинець І. В., Соколов О. В. Дослідження золи-винесення електрогенеруючих підприємств з метою її використання як альтернативи вапняковому мінеральному порошку для виробництва асфальтобетонних сумішей. *Дороги і мости*. 2021. Вип. 24. С. 40–47.

DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.24.040>

7. Каськів В. І., Копинець І. В., Соколов О. В. Дослідження структуровальної здатності мінерального порошку різного походження. *Дороги і мости*. 2022. Вип. 26. С. 36–47.

DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.26.036>

8. Соколов О. В. Дослідження властивостей зол-виносу різного походження на відповідність національним вимогам. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2023. Вип. 113.2. С. 82-89.

DOI: 10.33744/0365-8171-2023-113.2-082-089

9. Каськів В. І., Соколов О. В. Дослідження впливу наповнювачів різного походження на властивості асфальтобетонів. *Дороги і мости*. 2023. Вип. 27. С. 68–80.

DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.27.068>

10. Соколов О. В. Підбір оптимальних зернових складів асфальтобетонних сумішей у середовищі MS Excel. *Дороги і мости*. 2023. Вип. 28. С. 159–171.

DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.159>

11. Каськів В.І., Соколов О. В. Дослідне впровадження асфальтобетонних сумішей із золою-виносу. *Вісник Національного транспортного університету*. Випуск 55. 2023. С. 124 – 130.

DOI: 10.33744/2308-6645-2023-1-55-124-130

Опубліковані праці апробаційного характеру:

12. Каськів В. І., Соколов О. В. Зола-виносу як альтернатива вапняковому мінеральному порошку під час виробництва асфальтобетонних сумішей. *LXXVII Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету, НТУ*, 2021 р. С. 163.

13. Каськів В.І., Соколов О.В., Касай К.І. Дослідження золи-винесення як заміну традиційним мінеральним порошкам. *LXXVIII Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету, НТУ*, 2022 р. С. 92.

DOI: 10.33744/2786-6459-2022-78

14. Олексій Соколов. Дослідження впливу наповнювачів різного походження на властивості асфальтобетонів. *Матеріали міжнародної конференції «Впровадження інноваційних матеріалів і технологій при проектуванні, будівництві та експлуатації об'єктів транспортної інфраструктури в рамках програми «Велике будівництво»*. НТУ, 2022. С. 363.

DOI: 10.33744/978-966-632-317-3-2022-2

15. Копинець І.В., Соколов О.В., Желтобрюх А.Д., Головченко В.С. Установлення впливу методу ущільнення на об'ємні властивості асфальтобетонів. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Органічні і мінеральні в'язучі та дорожні бетони на їх основі". ХНАДУ, 2022. С. 76-79.*

ISBN 978-617-8009-87-8

16. Копинець І.В., Соколова О.Б., Соколов О.В., Юнак А.Л. Уточнення технологічних температур виробництва та ущільнення асфальтобетонних сумішей. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Органічні і мінеральні в'язучі та дорожні бетони на їх основі". ХНАДУ, 2022. С. 68-71.*

ISBN 978-617-8009-87-8

17. Соколов О.В. Оцінювання структурувальної здатності мінерального порошку в широкому діапазоні температур. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Органічні і мінеральні в'язучі та дорожні бетони на їх основі". ХНАДУ, 2022. С. 133-136.*

ISBN 978-617-8009-87-8

18. Каськів В. І., Соколов О. В. Дослідження структурувальної здатності мінерального порошку різного походження. *LXXVII Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету, НТУ, 2023 р. С. 161.*

DOI: 10.33744/2786-6459-2023-79

ABSTRACT

Sokolov O. V. Theoretical and technological aspects of the use of fly ash in road construction.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in the specialty: 192 "Construction and civil engineering". – National Transport University, Kyiv, 2024.

The prepared dissertation is an actual scientific study in the field of road construction through the introduction of new types of asphalt concrete layers for the development of the road industry as a whole and improvement of the ecological status of Ukraine. An important scientific and practical task is solved in the dissertation work, which consists in the study and implementation of such a material as asphalt concrete with fly ash for asphalt concrete layers of road wear.

At the first stage, the problem of conditioned mineral powders and the state of the environmental issue regarding waste from power-generating enterprises were analyzed, the analysis of foreign research and the existing experience of using asphalt concrete with fly ash, the conditions of its design and application, the advantages and disadvantages of such mixtures were determined.

At the second stage, the generalized prerequisites of the most important parameters that affect the implementation and design of asphalt concrete with fly ash are defined. Compliance of ash removal according to national standards has been established. A comparison of standard limestone filler and fly ash of various origins was made according to such indicators as: adhesive activity, resistance to technological aging of the asphalt binder based on them, as well as structuring ability at different operational and technological temperatures. The possibility of using fly ash as a filler in asphalt concrete has been established.

At the third stage, the regularities of the impact of fly ash on the weatherability of asphalt concrete are established. An automatic method of selecting the grain composition of the mixture with fly ash has been developed.

Using this method will allow you to speed up the optimization of the grain composition of the asphalt concrete mixture, and thanks to this, you can reach the densest possible gradation of the grain composition of the mineral part of the asphalt concrete mixture, which is called the maximum density gradation or sometimes Fuller's maximum density curve (W.B. Fuller), these data allow you to choose the optimal ratio components for the production of asphalt concrete with a defined granulometric composition that meets the established requirements. This approach guarantees high quality and stability of asphalt concrete, and also ensures durability of asphalt concrete layers.

It was established that the optimal content of bitumen in the asphalt concrete mixture with fly ash is 5.5 %, and for limestone – 6 %, which indicates the economic feasibility of using fly ash for the production of asphalt concrete. The calculated modulus of elasticity of asphalt concrete with fly ash practically does not differ from asphalt concrete with limestone filler. The addition of fly ash allows to increase the elasticity modulus of asphalt concrete, which makes it more resistant to destruction and wear under the influence of loads and weather conditions.

Research results were implemented in the development of state regulatory documents, in particular, in the revision of DSTU B V.2.7-121:2014 and the development of standards of the DSTU EN 13108 series.

On the basis of technical and economic calculations, the feasibility of using fly ash as a filler in asphalt concrete has been confirmed. Taking into account that asphalt concrete with fly ash is a common type of asphalt concrete, the technology of which practically does not change during installation, and therefore can be compared with ordinary asphalt concrete of the same type, due to certain important economic factors such as materials (grain composition) cost reduction (up to 10.5 %), the cost of the mixture (up to 6 %), the introduction of asphalt concrete with fly ash in Ukraine opens up the opportunity to repair old and build new asphalt roads at more favorable prices. The saved funds can be directed to the reconstruction of the country in the post-war period. Key words: road, road clothing, asphalt concrete mixture, ash removal, asphalt concrete, filler, ecology, industrial waste.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. V.I Kaskiv, O.V. Sokolov, V.V. Mozghovyi. Assessment of the impact of fly ash on the technological aging of bitumen in the asphalt binder system. *World Science* 2024. 1(83). DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30032024/8109

2. Ivan Kopynets, Oleksii Sokolov, Comparison of density of asphalt concrete mixture with fly ash and limestone filler. *Modern Science*. 2023 No 4
DOI: 10.62204/2336-498X-2023-4-15

Статті у фахових виданнях:

3. Соколов О. В., Желотобрюх А. Д., Копинець І. В., Каськів В. І. Використання відходів промисловості в дорожньому будівництві. *Дороги і мости*. 2020. Вип. 21. С. 110–119.

DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.110>

4. Копинець І.В., Соколов О.В., Желтобрюх А.Д., Головченко В.С. Дослідження можливості використання дробильних матеріалів виробництва ВАТ «Нікопольський завод феросплавів» під час будівництва доріг. *Автошляховик України*. № 4. 2020.

DOI: [10.33868/0365-8392-2020-4-264-52-58](https://doi.org/10.33868/0365-8392-2020-4-264-52-58)

5. Каськів В. І., Копинець І. В., Соколов О. В. Дослідження властивостей пилюватих відходів з електрогенеруючих підприємств України. *Дороги і мости*. 2021. Вип. 23. С. 94–101.

DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.23.094>

6. Каськів В. І., Копинець І. В., Соколов О. В. Дослідження золи-винесення електрогенеруючих підприємств з метою її використання як альтернативи

вапняковому мінеральному порошку для виробництва асфальтобетонних сумішей. *Дороги і мости*. 2021. Вип. 24. С. 40–47.

DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.24.040>

7. Каськів В. І., Копинець І. В., Соколов О. В. Дослідження структуровальної здатності мінерального порошку різного походження. *Дороги і мости*. 2022. Вип. 26. С. 36–47.

DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.26.036>

8. Соколов О. В. Дослідження властивостей зол-виносу різного походження на відповідність національним вимогам. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2023. Вип. 113.2. С. 82-89.

DOI: 10.33744/0365-8171-2023-113.2-082-089

9. Каськів В. І., Соколов О. В. Дослідження впливу наповнювачів різного походження на властивості асфальтобетонів. *Дороги і мости*. 2023. Вип. 27. С. 68–80.

DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.27.068>

10. Соколов О. В. Підбір оптимальних зернових складів асфальтобетонних сумішей у середовищі MS Excel. *Дороги і мости*. 2023. Вип. 28. С. 159–171.

DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.159>

11. Каськів В.І., Соколов О. В. Дослідне впровадження асфальтобетонних сумішей із золою-виносу. *Вісник Національного транспортного університету*. Випуск 55. 2023. С. 124 – 130.

DOI: 10.33744/2308-6645-2023-1-55-124-130

Опубліковані праці апробаційного характеру:

12. Каськів В. І., Соколов О. В. Зола-виносу як альтернатива вапняковому мінеральному порошку під час виробництва асфальтобетонних сумішей. *LXXVII Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів,*

студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету, НТУ, 2021 р. С. 163.

13. Каськів В.І., Соколов О.В., Касай К.І. Дослідження золи-винесення як заміну традиційним мінеральним порошкам. *LXXVIII Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету, НТУ, 2022 р. С. 92.*

DOI: 10.33744/2786-6459-2022-78

14. Олексій Соколов. Дослідження впливу наповнювачів різного походження на властивості асфальтобетонів. *Матеріали міжнародної конференції «Впровадження інноваційних матеріалів і технологій при проєктуванні, будівництві та експлуатації об'єктів транспортної інфраструктури в рамках програми «Велике будівництво».* НТУ, 2022. С. 363.

DOI: 10.33744/978-966-632-317-3-2022-2

15. Копинець І.В., Соколов О.В., Желтобрюх А.Д., Головченко В.С. Установлення впливу методу ущільнення на об'ємні властивості асфальтобетонів. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Органічні і мінеральні в'язучі та дорожні бетони на їх основі". ХНАДУ, 2022. С. 76-79.*

ISBN 978-617-8009-87-8

16. Копинець І.В., Соколова О.Б., Соколов О.В., Юнак А.Л. Уточнення технологічних температур виробництва та ущільнення асфальтобетонних сумішей. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Органічні і мінеральні в'язучі та дорожні бетони на їх основі". ХНАДУ, 2022. С. 68-71.*

ISBN 978-617-8009-87-8

17. Соколов О.В. Оцінювання структурувальної здатності мінерального порошку в широкому діапазоні температур. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Органічні і мінеральні в'язучі та дорожні бетони на їх основі". ХНАДУ, 2022. С. 133-136.*

ISBN 978-617-8009-87-8

18. Каськів В. І., Соколов О. В. Дослідження структурувальної здатності мінерального порошку різного походження. *LXXVIV Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету, НТУ, 2023 р. С. 161.*

DOI: 10.33744/2786-6459-2023-79

ЗМІСТ

	С
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЩОДО ІСНУЮЧОГО ДОСВІДУ ВИКОРИСТАННЯ ЗОЛИ-ВИНЕСЕННЯ ЯК НАПОВНЮВАЧА В АСФАЛЬТОБЕТОННИХ СУМІШАХ	23
1.1 Існуючі проблеми сировинної бази асфальтобетонів та методи їх вирішення	23
1.2 Роль наповнювача в формуванні структури асфальтобетону	27
1.3 Загальні положення про золу-винесення в дорожньому будівництві.....	34
1.4 Огляд існуючого закордонного досвіду використання золи-винесення в дорожньому будівництві	42
Висновки до розділу 1.....	49
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ЗОЛИ-ВИНЕСЕННЯ В ЯКОСТІ НАПОВНЮВАЧА...	51
2.1 Вплив процесів взаємодії бітуму з мінеральними матеріалами на міцність та довговічність асфальтобетону.....	51
2.2 Вплив взаємодії мінерального матеріалу та бітуму на водостійкість асфальтобетону.....	55
2.3 Дослідження хімічного складу золи-винесення та обґрунтування можливості використання як наповнювача в асфальтобетоні	63
2.4 Дослідження структуровальної здатності мінерального порошку за різних експлуатаційних температур	67
2.5 Визначення адгезії бітуму до наповнювача.....	72
2.6 Визначення експлуатаційного старіння асфальтов'язучої речовини з різними наповнювачами.....	77
2.7 Розроблення коефіцієнта якості наповнювача та критерію придатності золи-винесення як наповнювача асфальтобетонних сумішей	88
2.8 Розроблення математичної моделі оптимізації підбору зернового складу асфальтобетонної суміші	93

	15
Висновки до розділу 2.....	98
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АСФАЛЬТОБЕТОНУ ІЗ ЗОЛОЮ-ВИНЕСЕННЯ ДЛЯ УЛАШТУВАННЯ ШАРІВ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ	100
3.1 Дослідження наповнювачів різного походження.....	100
3.1.1 Методи випробування наповнювача (мінерального порошку)	100
3.1.2 Результати випробування наповнювачів	101
3.2 Визначення впливу наповнювачів на атмосферостійкість асфальтобетону.....	107
3.2.1 Вихідні матеріали.....	107
3.2.2 Результати дослідження впливу наповнювачів на атмосферостійкість асфальтобетонів.....	109
3.3 Дослідження асфальтобетону із золою-винесення	129
3.3.1 Методика досліджень.....	129
3.3.2 Результати випробування асфальтобетону.....	131
3.4 Визначення модуля пружності	136
3.5 Визначення ущільнюваності асфальтобетонної суміші	141
Висновки до розділу 3.....	144
РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	146
4.1 Техніко-економічне обґрунтування доцільності застосування асфальтобетонних шарів із асфальтобетону із золою-винесення	146
4.2 Методика визначення ущільнюваності асфальтобетонної суміші.....	151
4.2.1 Загальні поняття.....	151
4.2.2 Устаткування.....	154
4.2.3 Виготовлення зразків.....	155
4.2.4 Проведення випробування.....	156
4.2.5 Ущільнення.....	156
4.2.6 Визначення точки блокування.....	156

4.3 Технологія вироблення асфальтобетонної суміші із золою-винесення в якості наповнювача.....	157
4.4 Будівництво дослідної ділянки для впровадження асфальтобетонів із золою винесення.....	161
4.4.1 Вихідні дані.....	161
4.4.2 Визначення фізичних показників відібраних зразків-кернів.....	171
4.4.3 Визначення фізико-механічних показників виготовлених зразків	173
Висновки до розділу 4.....	175
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	177
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	182
ДОДАТОК А ПРИКЛАД ОПТИМІЗАЦІЇ ЗЕРНОВОГО СКЛАДУ МІНЕРАЛЬНОЇ ЧАСТИНИ ГАРЯЧОЇ АСФАЛЬТОБЕТОННОЇ СУМІШІ ..	193
ДОДАТОК Б ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.....	206
ДОДАТОК В СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.....	213

ВСТУП

Актуальність роботи.

Однією з пріоритетних завдань України є розвиток транспортної інфраструктури. Експлуатація асфальтобетонних доріг в умовах агресивного впливу зовнішніх факторів і безперервного зростання кількості транспортних засобів призводить до утворення різних дефектів і, як наслідок, до передчасних деформацій та руйнування автомобільних доріг.

У наш час вчені й фахівці дорожньої галузі приділяють особливу увагу якості будівництва автомобільних доріг, проводять пошук нових ефективних рішень для подальшого підвищення якості, а також збільшення строку безремонтної експлуатації твердих покриттів. При цьому основним матеріалом для укладання покриттів автомобільних доріг залишається асфальтобетон. Протяжність доріг з таким покриттям в Україні перевищує 169,5 тис. км.

Асфальтобетон – штучний будівельний матеріал, який утворюється після ущільнення асфальтобетонної суміші, приготовленої у нагрітому стані у змішувачах, і включає раціонально підібрані мінеральні матеріали (щебінь, пісок, мінеральний порошок) та бітум. У витраті на виробництво асфальтобетонних сумішей вартість матеріалів складає найбільшу частину – 80 %. Щорічне зростання вартості матеріалів (включаючи щебінь, мінеральний порошок та бітум) і енергоресурсів призводить до зростання витрат на виробництво асфальтобетонних сумішей у середньому на 10 – 15 %.

Ця обставина зобов'язує детально вивчити ринок вихідних будівельних матеріалів, які входять у склад асфальтобетонної суміші, визначити існуючі проблеми та шляхи їх вирішення.

Першочерговим завданням галузі дорожнього господарства залишається підвищення якості та тривалості служби асфальтобетонного покриття. Рішенням цієї проблеми є виробництво та використання асфальтобетону з підвищеними показниками експлуатаційних характеристик, а також здешевлення виготовлення

асфальтобетонної суміші без зменшення фізико-механічних властивостей матеріалу.

Мінеральний порошок, окрім бітуму, – один із дорожчих компонентів асфальтобетону. Його основне призначення полягає у: переведенні органічного в'язучого в адсорбційно-сольватний стан, збільшення поверхні контакту між структуроутворюючими частинками, підвищення теплостійкості бітуму, підвищенні адгезії та когезії в'язучого, а також щільності мінерального кістяка асфальтобетону. В Україні як наповнювач використовують переважно матеріал, отриманий подрібненням карбонатних гірських порід, що встановлено в ДСТУ Б В.2.7-119 та ДСТУ Б В.2.7-121. У той самий час на електрогенеруючих підприємствах України, у результаті спалювання вугілля, утворюються мільйони тон пилоподібних відходів – золи-винесення. Такі відходи є порівняно недорогою альтернативою стандартним наповнювачам.

На сьогодні в Україні не вирішено питання утилізації відходів промисловості, тому значна їх частина знаходяться у відвалах та несе в собі великий ризик для екології, і тільки незначна частина утилізується в будівельних проєктах, хоча вже існує «Державна цільова економічна програма розвитку автомобільних доріг загального користування державного значення на 2018–2022 роки» та розпорядженням Кабінету міністрів України, які регламентують використання місцевих матеріалів, включаючи відходи промисловості під час будівництва автомобільних доріг.

Виходячи із цього актуальність роботи полягає у вирішенні науково-практичної задачі – удосконалення технології вироблення асфальтобетонних сумішей із золою-винесення та впровадження технології влаштування шарів дорожнього одягу з асфальтобетонних сумішей із золою-винесення без погіршення їх довговічності, що сприятиме поліпшенню екологічного стану та розвитку дорожньої галузі в цілому.

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає у розробленні теоретично та експериментально обґрунтованих критеріїв застосування золи-винесення при

виробництві асфальтобетонних сумішей та удосконаленні технології їх вироблення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

- провести аналіз існуючого вітчизняного і закордонного досвіду використання золи-винесення в асфальтобетонних сумішах та асфальтобетонів на її основі, умов його застосування та проєктування;

- провести експериментальні дослідження придатності золи-винесення як наповнювача для асфальтобетонних сумішей, на їх основі розробити критерії її придатності;

- на основі проведених досліджень визначити фізико-механічні характеристики асфальтобетону із золою-винесення та розробити методіку визначення ущільнюваності асфальтобетонної суміші;

- розробити математичну модель оптимізації підбору зернового складу асфальтобетонної суміші та удосконалити метод проєктування зернового складу асфальтобетонних сумішей;

- розробити практичні рекомендації та технічні вимоги щодо виробництва асфальтобетонних сумішей та влаштування шарів дорожнього одягу з асфальтобетонів із золою-винесення та провести дослідницьке виробниче впровадження отриманих результатів, обґрунтувати техніко-економічну доцільність застосування асфальтобетонних шарів із золою-винесення в якості наповнювача.

Об'єкт дослідження – процес вироблення асфальтобетонної суміші із золою-винесення та властивості асфальтобетону на її основі.

Предмет дослідження – об'ємні властивості, технологія вироблення, проєктування складу та влаштування асфальтобетонних шарів із золою-винесення.

Методи дослідження: метод аналізу та порівняння, розрахунково-дослідний; експериментально-аналітичний, економічна оцінка.

Наукова новизна отриманих результатів.

- вперше обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість використання золи-винесення в якості наповнювача для асфальтобетонних сумішей;

- вперше встановлено закономірності впливу золи-винесення на атмосферостійкість асфальтобетону;

- розроблено коефіцієнт якості наповнювача та критерій придатності золи-винесення як наповнювача асфальтобетонних сумішей;

- удосконалено метод проектування зернового складу асфальтобетонних сумішей на основі розробленої математичної моделі оптимізації підбору зернового складу.

Практичне значення отриманих результатів полягає в обґрунтуванні можливості практичного використання золи-винесення в якості наповнювача в асфальтобетонних сумішах; розробленні методики визначення ущільнюваності асфальтобетонної суміші і програмного забезпечення раціонального підбору складу асфальтобетонної суміші; визначенні основних характеристик асфальтобетону із золою-винесення; встановлені залежності вмісту бітуму від типу наповнювача; удосконалені технології та розроблені рекомендації з виробництва асфальтобетонних сумішей із золою-винесення; удосконалені вимог до наповнювачів та розроблені ДСТУ 9246-1:2023 «Заповнювачі для асфальтобетонних сумішей та матеріалів, оброблених бітумним в'язучим. Технічні умови. Частина 1. Наповнювач»; практичному впровадженні виробництва асфальтобетонних сумішей та влаштування асфальтобетонних шарів дорожнього одягу із золою-винесення під'їзду до Бурштинської ТЕС.

Матеріали досліджень були впроваджені в Державному агентстві відновлення та розвитку інфраструктури України при розробленні нормативних документів: зміна до ДСТУ Б В.2.7-121:2014 «Порошок мінеральний для асфальтобетонних сумішей. Технічні умови» та зміна до ДСТУ 8772:2018 «Порошок мінеральний для асфальтобетонних сумішей. Методи випробування», ДСТУ EN 13108-1:2019 «Бітумомінеральні суміші. Технічні вимоги до

матеріалів. Частина 1. Асфальтобетон (EN 13108-1:2006, IDT» та у навчальному процесі, а саме при викладанні дисциплін «Технологія будівництва доріг», «Сучасні технології будівництва автомобільних доріг» та в дипломному проектуванні для студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія, ОП «Автомобільні дороги, вулиці та дороги населених пунктів».

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні результати досліджень, які виносяться на захист, отримано автором самостійно. Внесок автора в опублікованих зі співавторами наукових працях:

– проведено аналітичний огляд досліджень та досвіду використання зазначеного матеріалу закордоном. Вивчено та проаналізовано етапи підбору складу суміші із золю-винесення, висвітлені вимоги до наповнювачів, хімічного складу [3, 16, 18];

– проведено експериментальні дослідження на встановлення придатності золи-винесення для використання в асфальтобетонних сумішах [1, 5–7];

– проведено експериментальні дослідження впливу золи-винесення на властивості асфальтобетону [9];

– розроблено математичну модель оптимізації зернового складу та розроблене програмне забезпечення [10];

– розроблено метод визначення ущільнюваності асфальтобетонної суміші. Даний метод дозволяє визначити закінчення ущільнюваності асфальтобетонних сумішей з використанням гіраторного ущільнювача [2];

– автором проаналізовано технологічні та вартісні аспекти доцільності використання золи-винесення в асфальтобетонних сумішах [13].

Обґрунтованість та достовірність отриманих в роботі результатів: підтверджується збіжністю теоретичних розрахунків та експериментальних результатів; достатнім обсягом експериментальних даних, що отримані з використанням сучасного лабораторного обладнання; апробацією результатів роботи під час виробничого впровадження.

Апробація результатів дисертації.

Основні результати дисертаційної роботи були представлені на наступних конференціях і семінарах: Міжнародній науково-практичній конференції «Органічні і мінеральні в'язучі та дорожні бетони на їх основі». Харків, ХНАДУ, 2022; Міжнародній конференції «Впровадження інноваційних матеріалів і технологій при проектуванні, будівництві та експлуатації об'єктів транспортної інфраструктури в рамках програми «Велике будівництво». Київ, НТУ, 2022.; наукових конференціях професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету у 2021 р., 2022 р. та 2023 р.

Публікації. За темою дисертаційного дослідження опубліковано 18 наукових праць, у тому числі: 9 у періодичних фахових виданнях, що входять до переліку МОН України; 2 статті у зарубіжних періодичних наукових виданнях; 7 у збірниках праць за матеріалами наукових конференцій;

Структура та обсяг дисертації. Дисертація включає вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел із 108 найменувань та три додатки. Загальний обсяг дисертації становить 217 сторінок. Основний текст викладений на 152 сторінці. Текст ілюструється 58 рисунками і містить 49 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЩОДО ІСНУЮЧОГО ДОСВІДУ ВИКОРИСТАННЯ ЗОЛИ-ВИНЕСЕННЯ ЯК НАПОВНЮВАЧА В АСФАЛЬТОБЕТОННИХ СУМІШАХ

1.1 Існуючі проблеми сировинної бази асфальтобетонів та методи їх вирішення

Рівень соціально-економічного розвитку країни визначається станом внутрішньої інфраструктури та розвитком транспортної мережі. На даний момент стан мережі автомобільних доріг України не повністю відповідає потребам населення, економіки, транспортної інфраструктури та вимог до технічного стану і пропускарної здатності. Актуальність проблеми будівництва нових та ремонтування існуючих автомобільних робіт пов'язана зі збільшенням числа транспортних засобів в загальному потоці пасажирських та вантажних перевезень. Дорожнє будівництво є однією з найбільш масштабних галузей промисловості, що змушує акцентувати увагу на колосальні потреби у сировинних матеріалах [1].

У наш час вчені й фахівці дорожньої галузі приділяють особливу увагу якості будівництва автомобільних доріг, проводять пошук нових ефективних рішень для подальшого підвищення якості, а також збільшення строку безремонтної експлуатації твердих покриттів. При цьому основним матеріалом для укладання покриттів автомобільних доріг залишається асфальтобетон.

Протяжність доріг з таким покриттям в Україні перевищує 169,5 тис. км.

Асфальтобетон – штучний будівельний матеріал, який утворюється після ущільнення асфальтобетонної суміші, приготовленої у нагрітому стані у змішувачах, і включає раціонально підібрані мінеральні матеріали (щебінь, пісок, мінеральний порошок) та бітум. У витраті на виробництво асфальтобетонних сумішей вартість матеріалів складає найбільшу частину – 80 %. Щорічне зростання вартості матеріалів (включаючи щебінь, мінеральний порошок та

бітум) і енергоресурсів призводить до зростання витрат на виробництво асфальтобетонних сумішей у середньому на 10 – 15 %. Ця обставина зобов'язує детально вивчити ринок вихідної бази для дорожніх асфальтобетонів, визначити існуючі проблеми та методи їх вирішення.

Першочерговим завданням галузі дорожнього господарства залишається підвищення якості та тривалості служби асфальтобетонного покриття. Рішенням цієї проблеми є виробництво та використання асфальтобетону з підвищеними показниками експлуатаційних характеристик, а також здешевлення виготовлення асфальтобетонної суміші без зменшення фізико-механічних властивостей матеріалу.

Встановлено, що реологічні та міцнісні властивості асфальтобетону, типи конструкції дорожнього покриття та умови експлуатації, а також міцність асфальтобетону характеризуються вираженою часовою залежністю від рівня утворення тріщин і стійкості до деформацій асфальтобетонного покриття. Інтенсивність пружних процесів під час деформації та руйнування бітумних матеріалів в значній мірі залежить від температури та рівня діючих навантажень. Загалом стійкість матеріалу до утворення тріщин і колій різного роду визначається наступними його властивостями: теплофізичними (коефіцієнт лінійного температурного розширення), деформаційними (модуль пружності при розрахунковій низькій температурі), міцності (гранична структурна міцність) та втомними (рівень пошкодження матеріалу покриву) [2]. Аналіз великої кількості наукових публікацій та нормативної літератури дає змогу зробити висновок, що існує багато підходів до оцінки стійкості до тріщин та деформацій дорожніх покриттів. Однак залежність міцнісних властивостей асфальтобетону від реологічних характеристик в'язучого змушує акцентувати увагу на впливі складових асфальтобетонної суміші на цей показник. Оскільки бітум є основною реологічною складовою суміші, то використання матеріалу високої якості або модифікованого аналога дозволить збільшити період бездефектної роботи після укладання покриття.

Таким чином, дослідження вихідної бази для дорожніх асфальтобетонів потрібно проводити комплексно. У сучасному дорожньому будівництві існує ряд проблем і завдань щодо забезпечення якісним вихідним матеріалом, від детального вивчення властивостей до розгляду процесів взаємодії компонентів суміші на макро-, мікро- та нано-рівнях. Переходячи до обговорення проблем вихідних компонентів асфальтобетонної суміші, варто акцентувати увагу на самому понятті для чіткого розуміння складених проблем асфальтобетону та методів їх вирішення.

У структурі асфальтобетонної суміші можна виділити наступні компоненти: крупний та дрібний наповнювач, головною функцією яких є створення високоміцної конструкції суміші, мінеральний порошок, головне призначення якого полягає в заповненні порожнин між частинками дрібного та крупного наповнювачів, а також перехід бітуму у плівковий стан, та бітум, завдання якого полягає у "склеюванні" частинок неорганічної частини асфальтобетонної суміші.

Вибір конкретних складових асфальтобетонної суміші та технічні вимоги, які до них пред'являються, визначаються роллю компонентів у структурі асфальтобетону, його призначенням та властивостями. У якості крупного наповнювача традиційно застосовують щебінь або гравій з гірських порід вивержених, осадових та метаморфічного походження, а також з деяких видів атмосферостійких та міцних сланців. Будучи макроструктурною одиницею, великий наповнювач формує каркас асфальтобетону. Цей компонент є базовим і складає приблизно 85 % від маси суміші. І відповідно до цього до його якості пред'являють високі вимоги, які, з одного боку, залежать від способу виробництва, а з іншого - від походження.

Для оцінки ефективності використання кам'яного матеріалу слід враховувати ряд властивостей, визначених у ДСТУ Б В.2.7-75 [3] та ДСТУ Б В.2.7-210 [4]. Залежно від класу та типу асфальтобетону, щебінь повинен відповідати вимогам ДСТУ Б В.2.7-119 [5].

Як відомо, якість асфальтобетонної суміші, а отже, асфальтобетонного покриття, в більшості визначається структурно-механічними характеристиками асфальтов'язучого, яке представляє собою бінарну систему органічного в'язкого (бітуму) та мінерального порошку. В якості мінерального порошку використовують різноманітні матеріали, вимоги до яких визначені в ДСТУ Б В.2.7-121 [6]. Функціональне призначення мінерального порошку полягає в заповненні пор між більш крупними частинками та утворенні разом з бітумом асфальтов'язучої речовини, підвищуючи його в'язкість та клеючу здатність у складі асфальтобетону. Завдяки великій площі адсорбційної поверхні мінеральний порошок надає асфальтобетону необхідні характеристики міцності та стійкості. Використання мінерального порошку дозволяє знизити температуру готової суміші та підвищити її зручність для влаштування.

Традиційно для виробництва асфальтобетону застосовують мінеральні порошки карбонатного складу. Зазвичай їх одержують шляхом подрібнення природної сировини – карбонатних гірських порід різного походження. На їхню частку в осадовій оболонці Землі припадає близько 14 %. За зменшенням частоти використання найбільш поширених порід, у яких породоутворюючим мінералом є кальцит.

Карбонатні породи високої якості, які задовольняють вимогам ДСТУ Б В.2.7-121 [6], з одного боку, не є доступними у всіх регіонах країни, а з іншого боку, використовуються в інших галузях промисловості та є досить вартісними. Тому у технології виробництва асфальтобетонів розглядається використання різних відходів промисловості [7–10], що задовольняють вимоги до складу, дисперсності та інших фізико-механічних характеристик, вимоги які пред'являються до мінеральних порошоків.

У зв'язку з тим, що дорожньо-будівельна галузь є найбільш важкотоннажною галуззю промисловості України, де, згідно з державними стратегіями розвитку, передбачено збільшення темпів будівництва, ремонту та реконструкції автомобільних доріг, особливо гостро стоїть питання якості та доступності основних будівельних матеріалів для дорожнього будівництва, що

безпосередньо пов'язано з високою матеріаломісткістю даної галузі промисловості. Відомі запаси якісної сировини, яка могла б бути використана як складові асфальтобетону, постійно зменшуються, тому необхідно шукати альтернативні джерела сировини для будівельних матеріалів та вивчати можливість їх застосування. У зв'язку із цим найбільш ефективним використанням місцевих сировинних ресурсів є використання відходів промислового виробництва, що стане одним із рішень проблеми сировинних матеріалів неорганічного походження.

Таким чином, однією з основних проблем, що виникають при приготуванні асфальтобетонної суміші, є відсутність запасів кондиційної сировини на території нашої країни, що може призвести до можливого підвищення вартості суміші через транспортні витрати при калькулюванні вартості її складових компонентів. Вирішенням цієї проблеми є використання некондиційних природних матеріалів різної будови та генезису, а також відходів промисловості, передбачаючи можливість часткової або повної заміни традиційних компонентів асфальтобетонної суміші, застосування як основних, так і кислих порід у якості сировини для виробництва асфальтобетону.

1.2 Роль наповнювача в формуванні структури асфальтобетону

Мінеральний порошок є важливим складником асфальтобетонної суміші, що виконує велику роль в забезпеченні якості асфальтобетонних сумішей. Питома поверхня мінерального порошку становить близько 90 % питомої поверхні мінеральних матеріалів у складі асфальтобетонної суміші. У складі асфальтобетонної суміші мінеральний порошок виконує дві ролі – заповнює пори між дрібним та крупним заповнювачем і структурує бітум [11]. Завдяки адсорбуючій поверхні, мінеральний порошок вбирає в себе значну частину нафтового бітуму, тим самим надаючи асфальтобетону необхідні характеристики: механічну міцність, стійкість до деформацій збільшує строк його служби [11].

Завдяки цьому якість та довговічність дорожнього покриття істотно підвищується. Використання мінерального порошку не обмежується одним тільки асфальтобетоном. Його застосовують також: як наповнювач для сухих сумішей, покрівельних матеріалів; використовують у вигляді добавки в бетонні суміші; в хімічній промисловості для виробництва пластмас, лінолеуму, руберойду, засобів для чищення та м'якої покрівлі. Строк придатності такого порошку необмежений.

Мінеральний порошок вирішальним чином впливає на структуру та властивості асфальтобетону. Під структурою асфальтобетону розуміють просторове взаємне розташування його складових та їх фізико-хімічну взаємодію на поверхні розділу фаз "органічне в'язуче - мінеральні матеріали". Розмір, форма, характер поверхні і відносне розташування мінеральних частинок визначає макроструктуру мінеральної частини асфальтобетону, а під структурою бітуму в складі асфальтобетонної суміші розуміють особливості його розподілу в асфальтобетоні (співвідношення вмісту вільного і сорбованого бітуму) і сам характер будови плівок бітуму на поверхні мінеральних зерен.

При перемішуванні бітуму з мінеральною складовою асфальтобетонної суміші, в'язуче переходить з об'ємного в плівко-подібний стан. Завдяки розвиненій сітці поверхневих мікропор мінеральний порошок вбирає легкі фракції бітуму, тобто відбувається так звана фізична адсорбція молекул в'язучого мінеральною поверхнею. Одночасно з цим має місце процес полярної орієнтації певної кількості негативно заряджених молекул бітуму відносно протилежно зарядженої поверхні мінерального матеріалу. Завдяки цьому частина бітуму, що межує з границею розділу фаз стає більш в'язкою, когезійно міцною та структурованою.

При поєднанні мінеральних зерен такими структурованими плівками в'язучого асфальтобетон набуває максимальної міцності та теплостійкості.

Наряду з фізичною адгезією відбувається процеси хімічної взаємодії між позитивно зарядженими активними центрами мінерального порошку та негативно зарядженими молекулами бітуму, що призводить до утворення міцних

водонепроникних сполук (процеси хімічної адсорбції або хемосорбції). Вказані процеси разом з електростатичним тяжінням протилежно заряджених поверхонь бітуму та мінерального порошку забезпечують міцне прилипання (адгезію) в'язучого до мінеральних зерен. Як наслідок забезпечується висока водостійкість асфальтобетону, підвищується опір дорожніх покриттів утворенню вибоїн та лущень.

Таким чином, присутність необхідної кількості мінерального порошку сприяє підвищенню щільності мінерального складу, а отже, і підвищення щільності асфальтобетону. При недостатній кількості мінерального порошку виникає необхідність збільшення кількості бітуму для заповнення пустот, що призводить до отримання неякісного матеріалу.

Ряд дослідників [12, 108] розглядають структуру асфальтобетону на двох рівнях: мікро- і макро-. На макрорівні це структура мінерального складу, представленого частинками піску і щебеню, а на мікрорівні - структура асфальто-в'язучої речовини.

Контактна зона (зона взаємодії органічного в'язучого з поверхнею мінеральних матеріалів) є найважливішою складовою обох підструктур.

Поділ на підструктури допомогло встановити взаємний вплив в'язучого і мінеральних матеріалів на процеси формування структури і міцності. Також встановлено, що адгезійні, когезійні та еластичні властивості адсорбційно-сольватних шари в'язучого на поверхні мінеральних матеріалів значною мірою впливають на фізико-механічні властивості асфальтобетону.

І.М. Борщ [13] визначили бінарну суміш «бітум - мінеральний порошок» як асфальтов'язучу речовину.

У роботах [14, 15] встановлено, що адсорбційна активність мінерального порошку визначається величиною питомої поверхні, хімічним і мінералогічним складом, кількістю активних центрів на поверхні мінерального порошку, мікрорельєфом і чистотою поверхні.

Відповідно до вищенаведених показників встановлено що найбільшу структурувальну здатність мають активні наповнювачі з розміром частинок (10-

100)* 10^{-6} м. При цьому в складі мінерального порошку повинні бути частинки різних розмірів для досягнення максимальної його щільності, що визначається значенням пористості, яка повинна бути не більше 35 % обсягу після ущільнення мінерального порошку тиском 40 МПа. Чим менша пористість заповнювача, тим менше пористість мінеральної частини асфальтобетону і менша витрата бітумного в'язучого.

За величиною набрякання (не більше 2,5 %) і значенням бітумомісткості, яка не повинна перевищувати 65% побічно можна оцінити чистоту поверхні мінерального порошку.

Порошок повинен бути сухим (вологість не більше 1 % за масою), так як надмірна вологість знижує енергію взаємодії між органічним в'язучим і поверхнею мінерального порошку.

Високодисперсні активні частки мінерального порошку є структурними центрами і активними адсорбентами. Мінеральний порошок асфальтобетонних сумішей, подібно до інших адсорбентів, показує великі межі адсорбційного насичення і круті ізотерми адсорбції. Мінералогічний, гранулометричний і кристалографічний склад порошків обумовлюють прояв цих властивостей.

За енергетичною та адсорбційною здатності можуть бути виділені такі заповнювачі:

1) група мінеральних порошків з високим позитивним потенціалом і великою кількістю адсорбційних центрів у вигляді катіонів Ca^{+2} ; Mg^{+2} на поверхні частинок - кальцит, доломіт, вапняк;

2) група мінеральних порошків з високим потенціалом негативного знаку і значною кількістю адсорбційних центрів у вигляді іонів кисню O^{-2} - кварц, каолініт, піщаник, граніт;

3) мінеральні порошки зі зниженим потенціалом негативного знаку в зв'язку з наявністю на поверхні частинок компенсуючих катіонів різної валентності K^{+} , Na^{+} , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Fe^{+2} , Fe^{+3} та інші - польові шпати, мусковіт, азбест, базальт, діабаз і ін.;

4) мінеральні порошки з переважно нейтральної поверхнею частинок - тальк, графіт та ін.

Мінеральні порошки першого типу, які мають високий позитивний потенціал, є активними по відношенню до органічного в'язучого; другого типу - з високим потенціалом негативного знаку - інактивні. Активні функціональні групи органічного в'язучого при взаємодії з активними порошками витрачаються на створення сполук, що міцно утримують органічні молекули на поверхні мінерального порошку, і втрачають свою первісну реакційну здатність. Складові в'язучого типу масел можуть або адсорбуватися на поверхні (щільні мінеральні порошки), або піддаватися капілярної фільтрації всередину мінеральних часток (пористі мінеральні порошки).

Вапняковий мінеральний порошок є стандартним мінеральним порошком з високою структурувальною здатністю і з великою кількістю позитивних адсорбційних центрів (Ca^{2+}).

Згідно з дослідженнями, найкращими мінеральними порошками є порошки, що одержані в результаті подрібнення доломіту і вапняків. Висока якість цих порошоків підтверджується як вітчизняним, так і зарубіжним досвідом будівництва асфальтобетонних покриттів. [16, 17]

Кварцовий порошок має високий енергетичний потенціал, але з негативним знаком. В цьому випадку утворюються хемосорбційні зв'язки з в'язучим, через катіонні групи. Проте, таких груп в органічному в'язучому міститься небагато, тому основний процес в цій системі - фізична адсорбція.

У даний час із-за дефіциту вапнякового мінерального порошку часто використовуються порошки, отримані помелом інших порід або промислових відходів. Але при цьому спочатку необхідно зрозуміти і розібратися в механізмі взаємодії між мінеральним порошком і бітумним в'язучим, для того щоб використовувати їх в бітумомінеральних сумішах без погіршення їх властивостей. Так як в основному контакт відбувається по поверхні розділу фаз, необхідно вивчення властивостей поверхневих шарів для розуміння структури та механізму взаємодії мінерального порошку з бітумним в'язучим [18].

Відповідно до вищевикладеного, властивості бітумомінеральних матеріалів визначаються особливостями зв'язків і залежать від властивостей бітуму, товщини шару, що покриває мінеральні зерна, а також від процесів взаємодії бітуму і мінеральних матеріалів на їх загальній поверхні розділу фаз, і обумовлюються деформаціями, які можуть проявлятися у вигляді підвищеної крихкості при негативних і підвищеної пластичності при підвищених температурах.

Процеси хімічної адсорбції, що відбуваються на межі поділу фаз "бітум - мінеральний матеріал", мають найбільш важливе значення при взаємодії бітуму і мінерального матеріалу. Процеси фізичної адсорбції визначаються складом бітуму і сферою дії ненасичених молекулярних сил поверхні твердого тіла (мінерального матеріалу).

Залежно від мінерального складу кам'яних матеріалів адсорбція бітуму на поверхні мінеральних матеріалів є в основному аполярна фізичній. Дослідження показують, що часто можна досягти повної десорбції "чистого" бітуму в асфальтобетонних сумішах. Однак, експериментальні дослідження підтверджують і наявність процесів обмінної іонної адсорбції бітуму, яка характеризується частковою необоротністю, з поступово встановленою рівновагою, і навіть хемосорбції, при якій утворюються повністю незворотні хімічні сполуки, що міцно зв'язують мінеральний кістяк з органічним в'язучим в граничних шарах.

Найбільш міцний зв'язок досягається при хімічно фіксованій адсорбції з утворенням на поверхні хемосорбційних сполук, катіон яких знаходиться в решітці мінерального матеріалу, а аніон - в складі бітуму.

Хімічна адсорбція в міжфазних контактах є найбільш стійкою. Вона виникає в результаті хемосорбційних процесів при взаємодії високомолекулярних сполук з мінеральним матеріалом. У роботі [19] було підтверджено і розвинене це положення. Доведено, що міцність контакту бітумних плівок з поверхнею мінеральних частинок забезпечується тільки при виникненні хімічних зв'язків між ними. У звичайних умовах хемосорбційні

процеси відбуваються при взаємодії лише деяких мінеральних матеріалів (переважно карбонатних гірських порід) з активними бітумами. Це пояснюється тим, що при взаємодії мінерального матеріалу, до складу якого входять катіони лужноземельних і важких металів, і активного бітуму, аніони органічних кислот бітуму з'єднуються з ними міцними хімічними зв'язками з утворенням нових водо-нерозчинних сполук. При цьому хімічний зв'язок полярних груп бітуму орієнтує вуглеводневі ланцюги від поверхні мінерального матеріалу, надаючи їй гідрофобні властивості.

Взаємодія катіона лужноземельного (Ca^{2+} , Mg^{2+}) або важкого металу, (Fe^{3+} , Al^{3+}), що входить в кристалічну решітку мінерального матеріалу, з аніоном високомолекулярних органічних кислот, що знаходяться в зв'язку матеріалі є найбільш простим випадком хемоадсорбційного зв'язку. Ця взаємодія призводить до виникнення хемоадсорбційного зв'язку з утворенням нерозчинного у воді поверхневого з'єднання типу кальцієвих миль. Вплив хемоадсорбційних взаємодій на утворення міцного і стійкого зв'язку мінерального матеріалу і бітуму було підтверджено в роботах Р.А. Амброса [20], при дослідженні адсорбційної взаємодії бітумів з поверхнею мінеральних матеріалів. Присутність на поверхні мінеральних матеріалів катіонів важких або лужноземельних металів і аніонів кислих сполук в бітумі сприятливо позначається на утворенні хемоадсорбційного зв'язку. Таким чином, міцність зчеплення визначається природою мінерального матеріалу і бітуму.

Виходячи, з природи мінерального матеріалу і хімічного складу бітуму властивості його тонких шарів змінюються по-різному. На інертній поверхні мінерального матеріалу (граніт, кварц) міцність бітуму зі зменшенням товщини шару мало змінюється, на активній мінеральній поверхні (вапняк, доломіт, мармур) міцність бітуму в тонкому шарі зростає зі зменшенням його товщини [21]. У першому випадку міцність бітумомінерального матеріалу в значній мірі визначається когезією бітуму.

У разі активної поверхні зі зменшенням товщини шару бітуму відбуваються одночасно два процеси: орієнтація шару бітуму (або "уламків" його

просторової структури) активною поверхнею з фіксацією в поверхневому шарі, що призводить до підвищення когезії і руйнування просторової структури бітуму, що супроводжується зменшенням когезії.

У результаті того, що для всіх бітумів на активній поверхні спостерігається загальне зростання когезії зі зменшенням товщини шару, можна зробити висновок, що ефект орієнтації елементів структури бітуму поверхнею значно перевершує ефект руйнування структури.

Активність сорбційних процесів на поверхні мінерального матеріалу визначається значною мірою хімічним складом бітуму, перш за все наявністю в його складі поверхнево-активних сполук, що проявляється в лінійній залежності показника активності від кислотного числа бітуму і вмісту в ньому асфальтенів. Активація поверхні мінеральних матеріалів поверхнево-активними добавками, що призводить до виникнення на поверхні хемоадсорбційної взаємодії бітуму і мінерального матеріалу, призводить до різкого зростання когезії бітуму зі зниженням товщини його шару.

Таким чином перед дослідниками стоїть важка задача з пошуку матеріалу який би відповідав всім критеріям які були викладені вище. Тому для здешевлення суміші слід дослідити та використовувати відходи промисловості, одним з яких є зола-винесення.

1.3 Загальні положення про золу-винесення в дорожньому будівництві

Загострення проблеми охорони навколишнього середовища та відбудова країни в після воєнний час змушує акцентувати увагу на можливості вторинного використання техногенної сировини і залучення його в технологічний процес, а у зв'язку з накопиченням великої кількості техногенних відходів промислових комплексів і зниженням рівня вмісту цільових компонентів у вихідній сировині гостро постає питання їхнього комплексного використання.

У класифікацію техногенних відходів, за основу зазвичай покладено умови утворення, мінеральний склад, іноді хімічний склад, дисперсність. Відповідно до

класифікації (рисунок 1.1) відходи можна розділити на механогенні; піро-генні; хемогенні; біогенні. При цьому найбільший інтерес для дорожньо-будівельного сектору, зважаючи на склад і властивості представляють пірогенні та механогенні.

Серед техногенної сировини пірогенного походження одне з перших місць за обсягом займають золи та шлаки від спалювання твердих видів палива. Це пов'язано з тим, що основним джерелом для вироблення електроенергії в нашій країні є паливовмісні копалини (антрацитові, бурі і кам'яні вугілля, горючі сланці, торф).

На вугільних теплоелектростанціях у світі виробляється близько 40 % загального обсягу електроенергії, з них у США, Німеччині та деяких інших країнах – близько 70 %. Передбачається, що щонайменше до 2030 року в Китаї, США та багатьох інших країнах зростання виробництва електроенергії відбуватиметься за рахунок ще більш визначального розвитку вугільної енергетики.

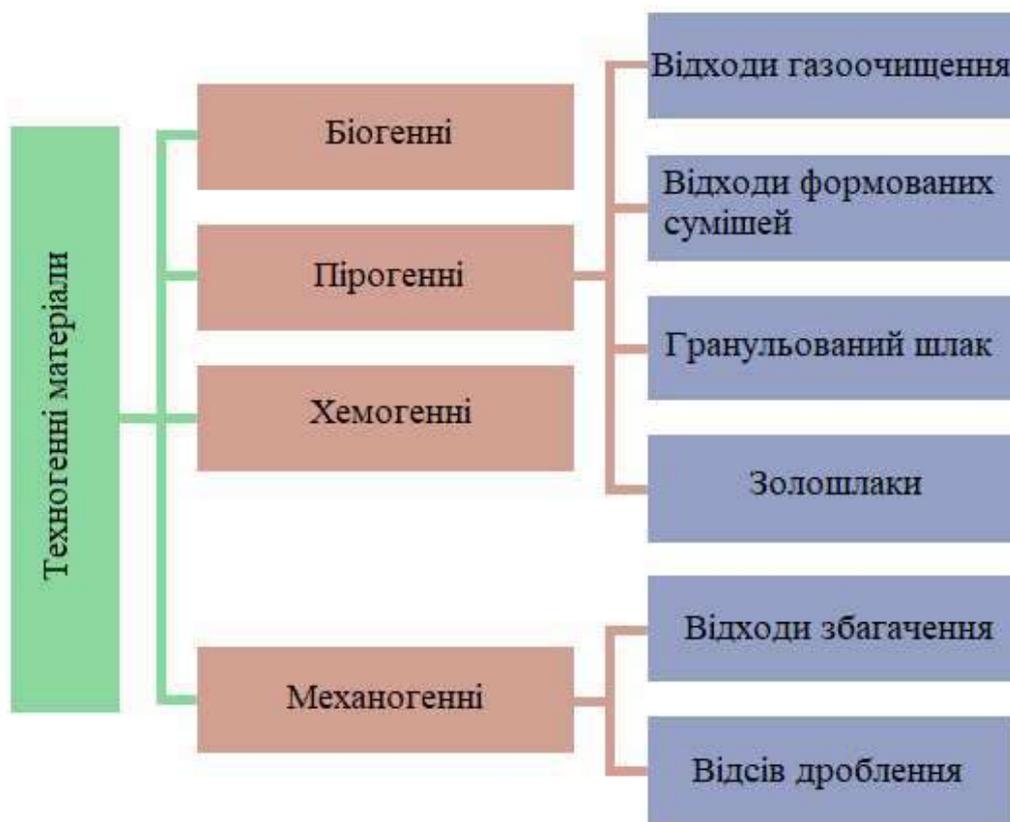


Рисунок 1.1 – Класифікація техногенних матеріалів

В Україні близько 30 % всієї електроенергії виробляє від спалювання твердого палива – вугілля, сланцю, торфу. У нашій країні налічується біля 15 діючих ТЕС (рисунок 1.2) на яких вторинним продуктом в рік утворюється близько 5-6 млн т. золошлакових відходів. Таким чином, відходи паливно-енергетичного комплексу, що утворюються в топках теплових електростанцій, являють собою величезні скупчення золи у вигляді пилоподібних залишків і кускового шламу, а також різні золошлакові суміші. Ці продукти високотемпературної обробки (1200 °С – 1700 °С) мінеральної частини палива знайшли широке застосування в багатьох країнах світу і враховуючи світову тенденцію до збільшення частки вторинного ринку використання відходів, слід прогнозувати підвищення темпів їх переробки і в Україні [22].

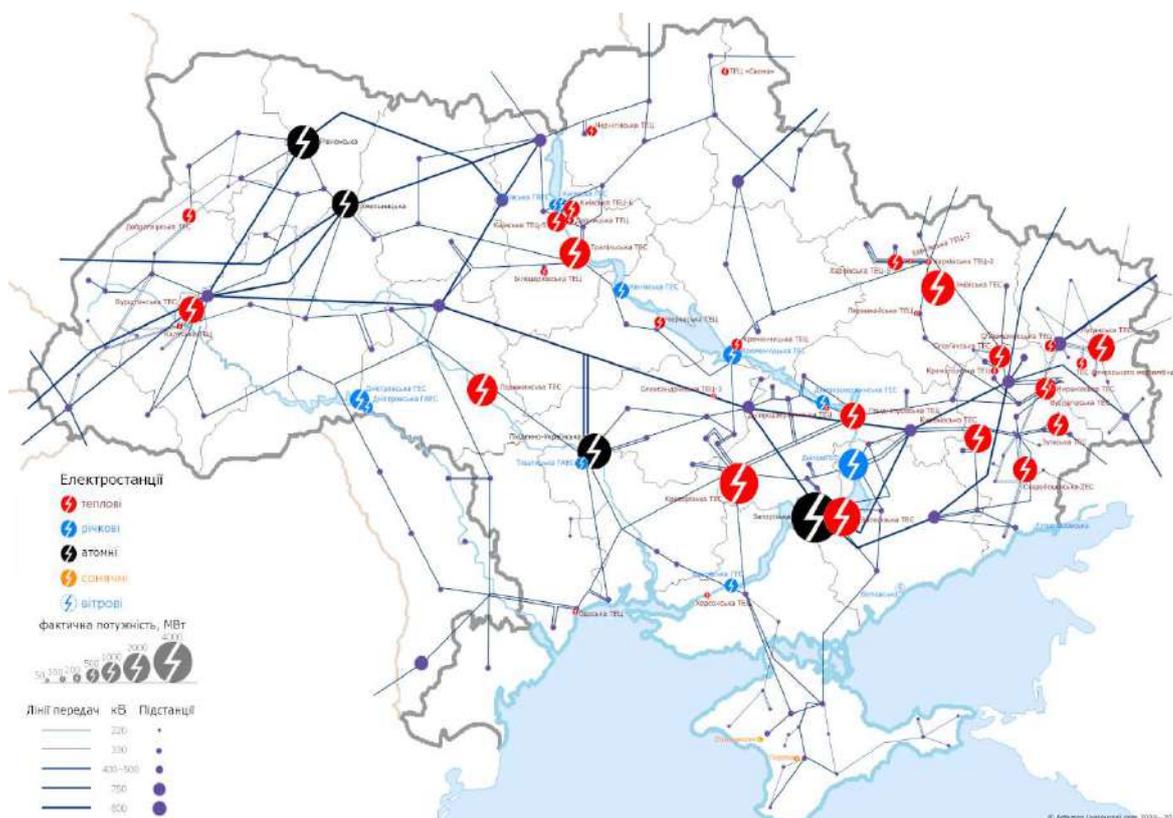


Рисунок 1.2 – Територіальне розташування теплових електростанцій України

Зола-винесення – це вторинний продукт промисловості, що утворюється з мінеральної частини твердого палива, що спалюється в пилоподібному стані, і зібраний золоуловлювальними пристроями з димових газів теплових

електростанцій. Залежно від типу золоуловлювальних пристроїв зола-винесення може виловлюватися у вологому або сухому стані. Механізм утворення відходів залежить від ряду факторів, таких як вид палива, спосіб спалювання та температура спалювання.

Розмір варується від часток мікрона до 0,63 мм тобто є тонкодисперсним матеріалом, що виноситься з димовими газами і осідає в золоуловлювачах (електрофільтри) з подальшим накопиченням в силосних баштах.

Залежність утворення золошлакових відходів від виду палива: в бурому вугіллі 10–15 %; в кам'яному 3–40 %; в горючих сланцях 50–80 %; в мазуті 0,15–0,20 % [23]. У сучасних ТЕС спалюють вугілля в пиловидному вигляді при температурах 1400 °С. Тому зазвичай зола дрібніша за портландцемент, а степінь дрібності пов'язаний з робочим станом вугільних дробарок та дрібністю самого вугілля.

Паливо в топках під дією високих температур знаходиться протягом 3–4 с, за цей час проходить вигорання летких компонентів. Степінь плавлення матеріалу залежить від хімічного складу. Повне плавлення при високому вмісті кислотних оксидів ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) та часткове при високому вмісті основних оксидів ($\text{CaO} + \text{MgO}$). При повному плавленні властивості кінцевого продукту залежать від вмісту Fe_2O_3 і в суміші переважають частинки розміром від 3–5 мкм до 40–50 мкм, які часто злипаються і руйнуються під механічною дією. Швидке плавлення є частковим і негативне, так як у великих частинках згорівший матеріал обволікає поверхню вугілля яке не встигло згоріти і як наслідок в золи-винесення є частка не згорівшого матеріалу, що негативно впливає на властивості золи-винесення. У цьому випадку неможливо передбачити подальшу поведінку сировини в складі інших сумішей.

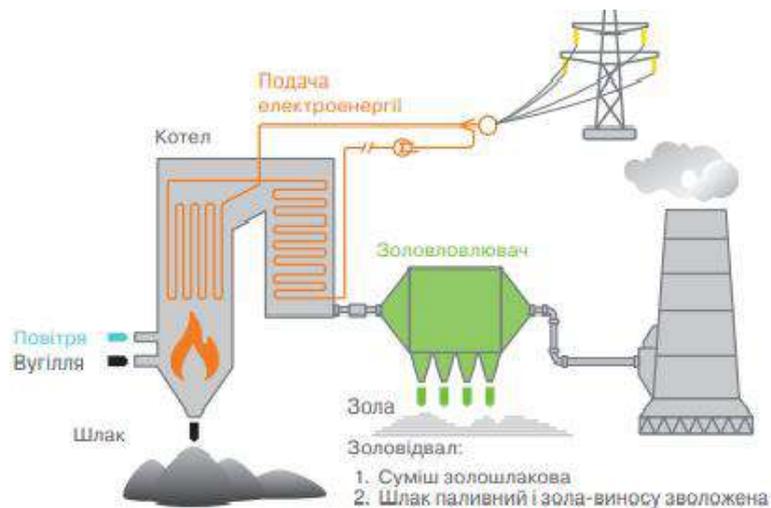


Рисунок 1.3 – Отримання золи з ТЕС

У даний час немає певної загальновизнаної класифікації золи-винесення. Наявні на сьогоднішній день класифікації не узгоджуються між собою і залежать від зручності використання при різних цілях. Для золи-винесення, отриманих спалюванням вугілля кожного родовища, встановлюється зразкові вимоги щодо хімічного складу, питомої поверхні після електрофільтра, а також температури плавкості золи. Однак ці нормативи настільки широкі, що можуть використовуватися тільки як інформаційно-довідковий матеріал, але не керівництво при практичному використанні.

Відомо, що характеристики хімічної активності різних видів золи одного найменування в обох випадках неспівставні, а класифікація золи за родовищами та марками вугілля для оцінки їх придатності для використання в дорожньо-будівельній промисловості неприйнятна.

З-поміж спроб зв'язати хімічну активність золи-винесення при її використанні в асфальтобетоні або бетоні з хімічним складом можна відзначити застосування до золи-винесення коефіцієнта якості (1.1). А також модуль основності (1.2), запропонований для врахування впливу лужних оксидів.

$$K_{\text{я}} = \frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2}. \quad (1.1)$$

$$M_o = \frac{CaO + MgO + R_2O}{SiO_2 + Al_2O_3} . \quad (1.2)$$

При значенні модуля основності більше 0,5 золи пропонується вважати активними, при значенні від 0,1 до 0,5 приховано активними і неактивними при показнику менше 0,1.

Однак, при обчисленні модуля основності недооцінюється роль оксиду алюмінію як активного компонента і не враховується вміст оксиду заліза, який знижує якість золи.

На думку автора [24], наявність у золі, на відміну від доменного шлаку, більшої кількості Fe_2O_3 значною мірою знецінює будь-які можливі методи оцінки активності золи за її хімічним складом, у тому числі і використання різних коефіцієнтів якості, оскільки важко визначити ймовірний вміст склофазу у золі-винесення.

Тому доцільно ввести модуль силікатний, M_c який характеризує силікатну активність яка проявляється через наявність у складі золи-винесення силікатних мінералів, які впливають на реологічні властивості системи.

$$M_c = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} . \quad (1.3)$$

У золі-винесення та золошлакових сумішах, що використовуються у дорожньому будівництві, допускається значно більш високий вміст оксиду кальцію, у тому числі вільного. Ці золи можуть містити до 40 % CaO , зокрема (5–20) % вільного CaO .

В основних золах частинки майже не мають скла, а представлені CaO вільний, $CaSO_4$; різні алюмінати и алюмосилікати кальцію, такі як C_3A , CA_2 , геленіт і близькі до нього алюмосилікати мелітового ряду, а також лужні сульфати. CaO вільний відносно швидко гідратується і реагує склофазною

частиною золи утворюючи низькоосновні гідросилікати, аналогічні цементному каменю[25].

Таблиця 1.1 – Характеристика кальцієвого складу золи винесення

Вид	Різновид	Вміст елементів, % за масою, в розрахунку на оксиди			
		CaO+MgO	SiO ₂ +Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ +FeO+R ₂ O	SO ₃
I Високо-кальцієві	Високосульфатні (I-A)	Не менше 20	-	-	Не менше 5
	Низькосульфатні (I-B)				Менше 5
II Низько-кальцієві	Кислі (II-A)	Менше 20	Не більше 70	Не менше 10	-
	Надкислі (II-B)		Більше 70		

Дисперсність золи характеризується питомою поверхнею і коливається від 1 000 см²/г до 4 000 см²/г, у багатьох випадках наближаючись до питомої поверхні цементу. З високою питомою поверхнею золи пов'язані такі її властивості як адсорбційна здатність, гігроскопічність, гідравлічна активність. Середня насипна густина золи коливається від 600 кг/м³ до 1 100 кг/м³, дійсна густина – від 1 800 кг/м³ до 2 400 кг/м³. За значенням питомої поверхні золи поділяють на тонко- (S₃ > 4 000 см²/г), середньо- (S₃ = 2000...4000 см²/г) і грубодисперсні (S₃ < 2 000 см²/г). При насипній густині менше 800 кг/м³ золи вважаються легкими; від 800 кг/м³ до 1 000 кг/м³ – середньої густини, більше 1 000 кг/м³ – важкими.

Таблиця 1.2 – Степінь дисперсності золи винесення

Степінь дисперсності	Величина питомої поверхні, м ² /кг	Залишок на ситі № 008, % по масі, не більше
Низькодисперсна (Нд)	Менше 150	30
Середньодисперсна (Сд)	Від 150 до 300	20
Високодисперсна (Вд)	Більше 300	15

Відповідно до європейських норм ДСТУ Б EN 197-1 [26] золу-винесення вважають кислою при вмісті в ній активного оксиду кальцію менше 10 % за

масою і основною - при вмісті більше 10 % за масою. Хоча такий поділ досить простий, він позбавлений фізичного сенсу. Досить звичайні випадки, коли зола містить 11–12 % активного (згідно з вимогами ДСТУ Б EN 197-1 [26]) CaO, але не містить вільного оксиду кальцію, тобто хоча відповідно до зазначеної норми ДСТУ Б EN 197-1 [26] така зола повинна вважатися основною, суті вона є типовою кислою золою. В американському стандарті ASTM C 618 [27] золи відносять до кислих, якщо в них сума кислотних оксидів ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) більше 70 %, і до основних, якщо ця сума менше 70 %, але більше 50 %. Така класифікація об'єктивніша за європейську і дозволяє більш обґрунтовано ділити золи на основні та кислі.

За зерновим складом золи суттєво різняться залежно від зернових характеристик вугілля, що спалюється, та умов спалювання. За допомогою лазерної гранулометрії показано, що розміри частинок золи становлять від 02 мкм до 400 мкм з переважанням частинок розміром 5–40 мкм. Гранулограми некласифікованих зол, як правило, далекі від нормального розподілу і можуть відповідати як відносно вузькому так і широкому гранулометричному складу. Великі частинки частіше бувають порожніми і містять основну кількість залишків вугілля, що не згоріли.

Хімічний склад золи-винесення безпосередньо відноситься до хімії мінералів що спалюються. Було проведено безліч досліджень по виявленню хімічного складу. Серед яких треба відзначити дослідження Джамії Мілії та Джамії Нагар, які в своїй роботі визначили досить точні діапазони хімічних сполук в золі-винесення та якісні фізичні характеристики [28]. За цими дослідженнями було встановлено хімічний склад золи, який наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Хімічний склад золи-винесення

Оксиди	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Інші лужні та неіндифіковані
Відсотковий вміст в золі	0,37-27,68	27,88-59,40	5,23-33,99	1,21-29,63	0,42-8,79	0,42-8,79	0,20-6,90	0,64-6,68	0,24-1,73	4,0-6,0

(CaO – Оксид кальцію; SiO₂ – Діоксид кремнію; Al₂O₃ – Оксид алюмінію; Fe₂O₃ – Оксид заліза; MgO – Оксид магнію; SO₃ – Триоксид сірки; Na₂O – Карбонат натрію; K₂O – Оксид калію; TiO₂ – Діоксид титану) Показник LOI – втрата при повторному спалюванні. Він показує кількість горючих речовин, які залишилися неспаленими в золі і цей показник в золі змінюється в межах 0,21–28,37 % . Зольні відходи містять домішки слюди, такі як цинк, свинець, хром, марганець, кобальт, нікель, ртуть, миш'як, сурма, ванадій, стронцій, германій, бор, берилій, фтор тощо [29].

Кислі золи і сферичні основні зазвичай представлені склом з кристалічними включеннями на основі муліту зі змінним складом A₃S до A₂S. Кількість цього елемента залежить від вмісту Al₂O₃, якщо його менше 10 % то муліту може й взагалі не бути. В цьому випадку підвищений вміст SiO₂ з включеннями частинок геленіту C₂AS. Саме це і формує пуцоланову активність через дрібнокристалічні фази в поверхні їх розділу з підвищеною вільною енергією. Вміст кварцу також впливає на цю активність, але не прямо а опосередковано через виникнення поверхонь розділу фаз в кристалічних включеннях скла. Ці включення досить легко виявити на рентгенограмах.

В основних золах частинки майже не мають скла, а представлені CaO вільний, CaSO₄; різні алюмінати и алюмосилікати кальцію, такі як C₃A, CA₂, геленіт і близькі до нього алюмосилікати мелітового ряду, а також лужні сульфати. CaO вільний відносно швидко гідратується і реагує склофазною частиною золи утворюючи низькоосновні гідросилікати, аналогічні цементному каменю[30].

1.4 Огляд існуючого закордонного досвіду використання золи-винесення в дорожньому будівництві

Дорожнє будівництво з влаштуванням асфальтобетонних покриттів вимагає великої кількості вихідних матеріалів для даних сумішей. У зв'язку з цим, зростає потреба в дефіцитних карбонатних мінеральних порошках. Тому

доцільно розглянути дослідження, спрямовані на вивчення ряду побічних продуктів промисловості з метою використання їх в якості мінерального порошку асфальтобетонів.

При нинішньому рівні споживання будівельних матеріалів дорожнім будівництвом першорядне значення має використання і залучення вторинних відходів промисловості. Використання відходів промисловості важливо ще й тому, що воно пов'язане з вирішенням проблеми створення безвідходних та екологічно чистих промислових технологій.

Один з підходів спрямований на використання золи-винесення у бітумних в'язучих як заміну певної кількості бітуму [31] для покращення його властивостей, зокрема стійкості до постійних деформацій, жорсткості, в'язкості при високих температурах та температурної чутливості [31–33].

Соболев [31] вивчав вплив золи-винесення на реологічні властивості бітуму та асфальтов'язучого за допомогою динамічного зрізного реометра (DSR). У дослідженні були використані два типи бітумних в'язучих та два типи золи-винесення, Клас С та Клас F, як визначено в ASTM C618 [27], що розрізняє пил за загальним вмістом кремнію, алюмінію та оксиду заліза ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$). Мікроструктурне дослідження бітуму із золою-винесення за допомогою скануючого електронного мікроскопа (SEM) показало ефект зупинення тріщин, спричинений частками золи-винесення при низьких температурах. Дослідження реологічної продуктивності асфальтов'язучого за допомогою DSR підтвердило, що зола-винесення може бути використана як розширювач бітуму, замінюючи до 15 % бітуму, щоб покращити його стійкість до постійних деформацій при високих температурах. Найкращий результат був досягнутий додаванням 15 % золи-винесення Класу F або 30 % Класу С.

Шарма [32] досліджував використання золи-винесення з різними співвідношеннями золи-винесення /бітум (FA/B) в асфальтов'язучій системі, які варіювалися від 0,6 до 1,2. Автори виявили, що температура розм'якшеності, в'язкість та комплексний модуль асфальтов'язучого зростали зі збільшенням вмісту золи-винесення, тоді як фазний кут зменшувався, що вказувало на

поліпшену стійкість до зсуву зі збільшенням вмісту золи-винесення. Вони також виявили, що асфальтов'язуча стає менш чутливою до співвідношення зола/бітум зі збільшенням температури.

Як представники першого підходу до використання золи-винесення в асфальтобетонних сумішах, ці дослідження мають спільні висновки щодо поліпшення властивостей асфальтов'язучого та можливого зменшення вмісту бітуму, а отже, зменшення вартості та екологічного впливу.

Дослідження, які розглядають застосування золи-винесення в асфальтобетонних сумішах та відносяться до другого підходу, включали різні класи золи-винесення з різною хімічною складовою та вмістом золи-винесення в суміші. Основною метою цих досліджень було визначення оптимальної кількості заміщення мінерального наповнювача, а також вплив золи-винесення на об'ємний склад, оптимальний вміст бітуму, механічні асфальтобетонних сумішей [22, 32, 34–40].

Також дослідники [32] виявили, що оптимальний вміст бітуму (ОВБ) у асфальтобетонних сумішах із золою-винесення Класу С як наповнювачем залежить від вмісту наповнювача та порожнеч Рігдена. ОВБ зменшується зі збільшенням вмісту золи-винесення. Містри та Рой [38] прийшли до подібного висновку для щільних асфальтобетонних сумішей із золою-винесення Класу F. ОВБ трохи зменшувався зі збільшенням вмісту золи-винесення до 6 %, а при додаванні до 4 % золи-винесення ОВБ може бути зменшений на 7,5 % порівняно з контрольною сумішшю з 2 % вапнякового мінерального порошку як наповнювача.

Містри та Рой [38] виявили, що для до 4 % золи-винесення, стабільність по Маршалу була нижчою ніж у контрольної суміші з 2 % вапнякового мінерального порошку. Стабільність по Маршалу збільшувалась з вмістом золи-винесення до 6 %, а потім зменшувалась для вищих вмістів золи винесення. Андройк [37] прийшов до подібного висновку, але отримали найвищу стабільність з 3 % золи-винесення. Однак Кар [34] виявив, що стабільність в усіх випадках була нижчою

для асфальтових сумішей з золи-винесення порівняно з контрольною сумішшю при вмісті бітуму від 4 % до 7 %.

Лікітлерсуанг та Чомпурат [35] виявили, що співвідношення стабільності та текучості сумішей з вмістом золи-винесення від 1 % до 5 % було майже сталим і схожим на контрольну суміш, що підтверджує висновки Містри та Рой [38].

Соболев [36] з'ясував, що асфальтобетонні суміші із золою-винесення мають вищий модуль порівняно з традиційними сумішами з пилом кам'яної крихти, що є результатом збільшення комплексного модулю асфальтових мастик з льотним пилом. Подібні висновки підтверджені результатами Шарми та ін. [30].

Шарма [32] виявив, що міцність на непрямий розтяг (ITR) збільшувалась з вмістом золи-винесення для всіх чотирьох типів досліджуваного матеріалу, які були випробувані. Лікітлерсуанг та Чомпурат [35] також отримали невелике збільшення міцність на непрямий розтяг зі збільшенням вмісту золи-винесення при температурах 25°C та 55°C. Однак результати Кар [34] показують, що асфальтобетонні суміші із золою-винесення мають трохи меншу міцність на непрямий розтяг (ITS) порівняно з контрольною сумішшю.

Відношення міцність на непрямий розтяг (ITSR) є загальним параметром, який використовується для оцінки водостійкості асфальтобетонних сумішей і представляє відношення (ITS) після насичення водою до (ITS) не насиченого водою зразка. Альтернативно, індійські технічні умови [39] використовують «залишкову стабільність» (ЗС) як показник водостійкості асфальтобетонних сумішей. Шарма та ін. [32] виявили, що як (ITSR), так і ЗС асфальтобетонних сумішей із золою-винесення були рівні або вищі за відповідні значення традиційних асфальтобетонних сумішей з наповнювачем кам'яної крихти. Обидва показники зменшувалися зі збільшенням вмісту золи-винесення. Найбільше покращення стійкості до води було отримано із золою-винесення з найбільшим вмістом СаО. Це підтверджено Лікітлерсуанг та Чомпурат [35], які також виявили збільшення (ITSR) для сумішей із золою-винесення. Однак Кар [34] знайшли, що ЗС для сумішей із золою-винесення трохи нижча, ніж для

традиційної суміші з наповнювачем кам'яної крихти, але також відповідала вимогам за технічними умовами [39].

Шарма [32] єдиний досліджувач, хто представляє стійкість до постійних деформацій асфальтобетонних сумішей із золою-винесення, отриману за допомогою статичного випробування на стиск. Автори виявили, що суміші із золою-винесення мають сприятливий опір руйнуванню порівняно зі сумішшю з кам'яною крихтою. Однак випробування проводилися при відносно низькій температурі 30°C, що не є повністю репрезентативним для опору руйнуванню.

К. Миркович [41] висвітлює результати випробувань властивостей різних типів золи-винесення для визначення їх впливу на властивості та продуктивність асфальтобетонних сумішей. Також показані результати випробувань об'ємного складу, а також результати випробувань на водостійкість та стійкість до постійних деформацій, 12 експериментальних асфальтобетонних сумішей, в яких мінеральний наповнювач був заміщений трьома типами золи-винесення різного походження (P, G та K) у чотирьох різних відсотках (25 %, 50 %, 75 % та 100 %). Результати дослідження показують, що задовільний зерновий склад може бути досягнутий шляхом додавання золи-винесення, тоді як дійсна густина і залишкова пористість асфальтобетону, як правило, залежать від типу золи-винесення та її вмісту. Стійкість і текучість сумішей із золою-винесенням кращі порівняно з контрольною сумішшю. Водостійкість сумішей із золою-винесенням зазвичай вища порівняно з контрольною сумішшю і залежить від типу та відсоткового вмісту золи-винесення. Коліестійкість асфальтобетону залежить від типу та процентного вмісту золи-винесення.

Дослідник [42] провів дослідження, щоб оцінити вплив використання різних типів золи-винесення як наповнювача в асфальтобетонній суміші. Він використовував золу-винесення типу «С», а також типу «F» із трьох різних джерел. Порівнявши зразки асфальтобетону з використанням обох типів золи, портландцементу, вапна та вапнякових наповнювачів. Порівняння проводилося на основі механічних властивостей, а саме стійкості за Маршаллом, текучості та довговічності асфальтобетону. Він дійшов висновку, що використання золи-

винесення класу «F» з більш грубим розміром частинок порівняно з іншими дослідженими наповнювачами забезпечило найкращі результати з точки зору всіх вищевказаних параметрів.

У дослідженні [43] автори використовували два види золи: клас F і клас C; цей попіл був охарактеризований з точки зору хімічного складу, мінералогії та розміру зерен. Результати показують, що обидва класи золи-винесення можна застосовувати як альтернативний мінеральний наповнювач, оскільки залишкова пористість, а також водо- та морозостійкість отриманих асфальтобетонних сумішей відповідають стандартам.

У дослідженні [44] встановлено, що суміші, модифіковані золою-винесення, мають покращені характеристики втоми та остаточної деформації, також продемонстрували більшу водостійкість та високий модуль пружності.

Китайські вчені [45] досліджували доцільність заміни мінерального порошку на золу-винесення в асфальтобетонній суміші шляхом дослідження асфальтов'язучого із золою-винесення. Спочатку дослідили мікроструктури та елементний склад золи та мінерального порошку за допомогою скануючої електронної мікроскопії (SEM) та рентгенівської дифракції (XRD). Потім дослідили реологічні властивості асфальтов'язучого з різними наповнювачами за допомогою реологічних випробувань на динамічний зсув (DSR). Результати показують, що коли рівень напруги становив 3,2 кПа, зміна значення J_{nr} відрізнялася від зміни при 0,1 кПа, що вказує на те, що після підвищення рівня напруги J_{nr} асфальтов'язуче із золою-винесення була меншою, але зола-винесення може покращити характеристики повзності за високої температури асфальтов'язучого. Заміна мінерального порошку золою-винесення може покращити високотемпературні реологічні властивості асфальтов'язучого, але це погіршує еластичність і стійкість до розтріскування.

Дослідники [46] оцінили можливість використання золи-винесення, яка є забруднювачем навколишнього середовища, як наповнювача для асфальтобетону з метою прискорення швидкості його мікрохвильового нагрівання для сприяння самовідновленню. У дослідженні швидкості мікрохвильового нагрівання зразків

асфальтобетону визначали за допомогою термографічного зображення. Результати випробувань показали, що розмір тріщини як до, так і після нагрівання можна інтерпретувати як індикатор ефективності самовідновлення зразка. Температура мікрохвильового нагрівання є ключовим фактором самовідновлення, зола-винесення покращила швидкість мікрохвильового нагріву асфальтобетону. Зола-винесення також покращила здатність відновлення зразків на деяких рівнях пошкоджень. Можна зробити висновок, що зола-винесення має великий потенціал як наповнювач для самовідновлюваного асфальтобетону, оскільки вона може покращити самовідновлення та механічні характеристики асфальтобетону.

Висновки цього дослідження підтверджують можливість досягнення задовільних властивостей та продуктивності асфальтових сумішей з частковим заміщенням мінерального наповнювача на золу-винесення. Оптимальний відсоток заміщення залежить від типу та хімічного складу золи-винесення, а також його властивостей. Зола-винесення може бути використана як розширювач бітуму або для покращення стійкості, стійкості до вологи та постійних деформацій асфальтової суміші як економічний варіант замість використання модифікованого полімерами бітуму, та водночас зменшити негативний екологічний вплив.

У дослідженні [47] оцінювали вплив різних наповнювачів з відходів промисловості, такі як: пил керамічних відходів, зола-винесення, вапняковий пил і сталевий шлак, на технічні характеристики бітумів та асфальтобетону. Дослідження показали, що додавання цих наповнювачів до асфальтобетонної суміші покращує її властивості. Було виявлено, що використання пропорції розміру наповнювача 50/50 дало найкращі результати щодо стабільності, коефіцієнта Маршалла та модуля пружності. Незважаючи на те, що дослідники дійшли до висновку, що пил від керамічних відходів і сталевий шлак були найефективнішими наповнювачами, зола-винесення все ж мала хороший вплив.

Дослідники [48] оцінювали вплив хімічно обробленої золи-винесення на асфальтобетон. Дані дослідження засвідчили, що згадана модифікація

покращила міцність на розрив (11 %), модуль пружності (25 %) і довговічність (1400 %) і призвела до зменшення колійності (55 %).

Висновки до розділу 1

1 Проблема дефіциту кондиційної сировини для асфальтобетонних сумішей є актуальною в деяких регіонах країни. Це може спричинити зростання вартості асфальтобетонних сумішей через високі транспортні витрати на доставку компонентів. Одним із можливих вирішень цієї проблеми є використання некондиційних природних матеріалів та відходів промисловості. Це передбачає часткову або повну заміну традиційних складових асфальтобетону альтернативними ресурсами. Такий підхід дозволяє зменшити залежність від кондиційної сировини і знизити витрати на виробництво асфальтобетону.

2 Мінеральний порошок відіграє важливу роль у формуванні структури асфальтобетону і забезпечує високу сорбційну та енергетичну активність поверхні до органічного в'язучого. Це зумовлено високою питомою поверхнею, хімічним та мінералогічним складом, кількістю активних центрів на поверхні наповнювача, мікрорельєфом та чистотою поверхні.

3 Походження наповнювача, його склад, дисперсність, стан поверхні та активність по відношенню до бітуму мають значний вплив на характеристики асфальтобетонів. Використання різного роду наповнювачів дозволяє поліпшити як характеристики бітумів (зсувостійкість, теплостійкість), так і позитивно впливати на техніко-експлуатаційні характеристики асфальтобетонів. В Україні є багато техногенної сировини придатної для вторинного використання. У цьому перспективними є відходи паливно-енергетичних підприємств такі як золи-винесення ТЕС.

4 Зола-винесення позитивно впливає на залишкову пористість і водостійкість асфальтобетону. Використання золи-винесення не потребує кардинальних змін у технології виготовлення суміші та технології влаштування асфальтобетонних шарів.

5 На основі огляду літератури можна зробити висновок, що використання золи-винесення як наповнювача в асфальтобетонних сумішах може покращити фізико-механічні властивості асфальтобетону та привести до здешевлення суміші. Однак результати попередніх досліджень часто суперечливі, що веде до висновку, що валідність деяких з представлених результатів може бути обмежена конкретними золами, які використовувалися у даних дослідженнях.

6. Для отримання точних даних, необхідно провести дослідження для оцінки можливості застосування золи-винесення з Українських ТЕС як наповнювача асфальтобетонної суміші. Для цього необхідно вивчити вплив золи-винесення на властивості кінцевого продукту - асфальтобетону та оцінити вплив складу та окремих властивостей золи на показники асфальтобетону.

Результати досліджень першого розділу викладено у наступних публікаціях: [1, 18, 22].

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ЗОЛИ- ВИНЕСЕННЯ В ЯКОСТІ НАПОВНЮВАЧА

2.1 Вплив процесів взаємодії бітуму з мінеральними матеріалами на міцність та довговічність асфальтобетону

Міцність, водостійкість, морозостійкість і стійкість проти старіння асфальтобетону багато в чому залежать від властивостей бітуму, а також характеру його взаємодії з мінеральними матеріалами.

Впродовж багатьох років виконують дослідження з метою встановлення зв'язку між хімічним складом і властивостями бітумів, з одного боку, і поведінкою їх в конструкції дорожнього одягу — з іншого. Проте ці дослідження до цих пір не дозволили встановити чіткий зв'язок найбільш важливих технологічних і експлуатаційних властивостей бітуму з його хімічним складом, а також розкрити в повній мірі його вплив на міцність і довговічність асфальтобетону. Труднощі вирішення цієї проблеми пояснюються не лише складністю визначення достовірного хімічного складу бітуму, але і відсутністю прямих однозначних доказів його впливу на властивості асфальтобетону.

Вплив бітуму на властивості асфальтобетону залежить також від властивостей мінеральних матеріалів, на поверхні яких він розподілений тонкою плівкою.

Бітумомінеральні матеріали характеризуються також термопластичними властивостями, які можуть проявлятися у вигляді підвищеної пластичності при високій позитивній або появі крихкості при негативних температурах.

Деформації, що пов'язані з підвищеною пластичністю бітумів або бітумомінеральних матеріалів, є залишковими. Залишковими також можуть бути і деформації, що виникли в пружно-крихкому стані, коли при статичних або динамічних діях, а також температурних напруженнях може відбуватися порушення цілісності матеріалу. На території України дорожнє покриття працює

в умовах коливань температур у межах від мінус 30 °С до 60 °С, і для забезпечення найбільшої стійкості і довговічності покриття бажано, щоб бітум в цьому діапазоні температур був у пружно-пластичному стані.

Властивості бітумомінерального матеріалу визначаються особливостями зв'язків, що виникають між окремими мінеральними зернами, і залежать від властивостей бітуму, товщини шару, що покриває мінеральні зерна, а також від процесів взаємодії мінеральних матеріалів і бітуму на їх спільній поверхні розділу. Для забезпечення міцного і стійкого зв'язку між зернами бітум має рівномірно покривати тонким шаром поверхню мінеральних матеріалів. Рівномірність і ступінь покриття, у свою чергу, залежать від змочування бітумом мінеральної поверхні. Після змочування відбувається процес вибіркової адсорбції на мінеральній поверхні окремих компонентів бітуму і, в першу чергу, поверхнево-активних речовин [49]. При взаємодії мінеральних матеріалів і бітуму найбільш важливе значення мають процеси хімічної адсорбції, що протікають на межі розділу бітум — мінеральний матеріал. Процеси фізичної адсорбції визначаються дією ненасичених молекулярних сил поверхні твердого тіла і природою адсорбованого бітуму. Поверхні, на яких не відбуваються процеси хемосорбційної взаємодії, а лише процеси фізичної адсорбції бітуму, можна умовно віднести до категорії інактивних поверхонь (граніт, кварц). На поверхні мінеральних зерен утворюються дифузні структуровані оболонки бітуму, густина і в'язкість яких мають найбільше значення безпосередньо біля границі розділу бітум – мінеральний матеріал. При віддаленні від цієї границі в'язкість і густина бітуму зменшуються і досягають мінімально можливих значень в зоні переходу структурованої оболонки у вільний бітум. Можна вважати, що найміцніше зчеплення зерен досягається, коли вони зв'язані між собою в результаті контакту структурованими оболонками бітуму. Більшість бітумомінеральних сумішей містять в своєму складі дуже тонкі мінеральні зерна з високо розвиненою питомою поверхнею і, отже, підвищеною адсорбційною здатністю. Мінеральні матеріали, які використовують в дорожньому будівництві, як правило, гідрофільні, і тому вода легко змиває з їх поверхні бітумну плівку,

зв'язану лише дією слабких молекулярних ван-дер-вальсових сил. Найбільш важливим чинниками в утворенні міцного і стійкого зв'язку є процеси хімічної адсорбції (хемосорбції) бітуму на поверхні мінерального матеріалу. При цьому аніони високомолекулярних кислот або інші кисневміщуючі групи, що присутні в бітумі, вступають в хімічну взаємодію з катіонами важких або лужноземельних металів на поверхні мінерального матеріалу, внаслідок чого утворюються нерозчинні поверхневі сполуки типу мил.

Необхідно враховувати, що, окрім найдрібніших зерен мінерального порошку карбонатної породи, у складі суміші знаходяться і мінеральні зерна інших порід, на поверхні яких не протікатимуть хемосорбційні процеси. В цьому випадку через меншу активність поверхні мінеральних матеріалів структура і механічні властивості такого «вільного» бітуму зберігатимуться в мало зміненому вигляді.

У випадках коли між зернами, вкритими структурованими оболонками, знаходяться прошарки вільного бітуму, міцність зв'язку між зернами обумовлена не властивостями структурованого, а властивостями об'ємного бітуму, який має меншу в'язкість і міцність. Треба також враховувати можливі зміни компонентного складу бітуму під впливом пористої структури мінерального матеріалу, тобто проникнення бітуму за рахунок дифузії по вузьких капілярах та порах твердого тіла — «фільтраційний ефект».

Мікропори відзначаються вельми високим адсорбційним потенціалом, завдяки цьому може відбуватися фракціонування бітуму із зміною його властивостей в адсорбційному шарі. Ці процеси призводять до розділення компонентів бітуму по молекулярній вазі, тобто до найглибшого проникнення масел, а потім смол в мікропори мінерального матеріалу і відповідно до збільшення концентрації асфальтенів в плівці бітуму, що вкриває поверхню мінерального матеріалу. Це, у свою чергу, супроводжується зменшенням еластичних властивостей бітумної плівки.

Для підвищення міцності дорожнього покриття, побудованого з бітумомінерального матеріалу, необхідно, щоб максимальна кількість бітуму

була адсорбована мінеральним матеріалом, а вміст вільного бітуму зведений до мінімального значення. Цим вимогам зазвичай задовольняють щільніші бітумомінеральні матеріали, що містять в своєму складі тонкий мінеральний порошок карбонатної породи. Наявність такого порошку забезпечує найбільш сприятливі умови для максимального переведення бітуму в адсорбований стан. Хемосорбційні процеси, що розвиваються на поверхні мінеральних зерен при взаємодії з поверхнево–активними речовинами бітуму створюють умови для утворення міцних зв'язків між бітумом і поверхнею мінеральних матеріалів, і, відповідно, зміцнення всієї системи в цілому з забезпеченням найбільш високої міцності, тепло- і водостійкості. Проте для забезпечення потрібної деформативності бітумомінерального матеріалу, а також водостійкості необхідно мати в його складі певну кількість вільного бітуму. Протікання адсорбційних процесів, утворюючих різні за міцністю і стійкістю зв'язки на поверхні розділу мінеральний матеріал – бітум, значною мірою залежить від мінералогічного і хімічного складу, характеру і чистоти поверхні кам'яного матеріалу [49].

Активність взаємодії визначається не лише природою мінерального матеріалу, але і хімічним складом бітуму, перш за все наявністю в ньому поверхнево–активних речовин, що певною мірою характеризується кислотним числом бітуму і вмістом в ньому полярних компонентів — смол та асфальтенів.

Залежно від природи мінерального матеріалу і хімічного складу бітуму по різному змінюються властивості його тонких шарів. На активній мінеральній поверхні (вапняк, доломіт, мармур) міцність бітуму в тонкому шарі збільшується із зменшенням його товщини, на інактивній поверхні (граніт, кварц) міцність бітуму із зменшенням товщини шару мало змінюється. У останньому випадку міцність бітумомінерального матеріалу фактично визначається когезією об'ємного бітуму [49].

Змінюючи товщину бітумних шарів і властивості поверхні мінеральних зерен, можна регулювати пружні і пластичні характеристики бітумомінерального матеріалу, а отже одні з найбільш важливих його дорожньо–будівельних властивостей.

Такі вчені, як Л.Б. Гезенцевей та І.В. Корольов вважають, що якість бітумомінерального матеріалу характеризується його міцністю і деформативністю, що зберігаються тривалий час під дією автомобільного руху і погодно-кліматичних умов. Опір матеріалу руйнівній дії напруги стиснення і розтягування, що виникають в дорожньому покритті, визначається зчепленням і внутрішнім тертям його зерен. Величина внутрішнього тертя залежить від зернового складу мінеральної суміші, розміру, форми і характеру поверхні мінеральних зерен. У дорожніх покриттях, влаштованих із щебеню (чорні щебеневі), особливо з використанням щебеню крупного розміру (способом просочення), внутрішнє тертя суттєво впливає на показники міцності, і особливо сталості матеріалу. У цих конструкціях міцність і інші властивості покриття залежать більшою мірою від структурного скелета мінерального остову, отриманого упаковкою його зерен при ущільненні.

Міцність зв'язку визначається когезією бітуму, що вкриває шаром достатньої товщини поверхню мінерального матеріалу. У покриттях, що влаштовують з бітумомінеральних матеріалів на основі щебеню, піску і мінерального порошку, міцність, в основному, визначається зчепленням його складових зерен. В цьому випадку міцність в основному залежить від зчеплення, що визначається когезією тонкого шару бітуму, збільшеною під впливом активної поверхні високодисперсного мінерального матеріалу.

2.2 Вплив взаємодії мінерального матеріалу та бітуму на водостійкість асфальтобетону

Експлуатаційні характеристики та довговічність нежорстких дорожніх одягів в значній мірі обумовлені стійким зчепленням (адгезією) в'язучих з мінеральними матеріалами.

Практика експлуатації асфальтобетонних покриттів показує, що однією з причин їх руйнування є втрата зв'язку (контакту) між органічними і мінеральними матеріалами.

При недостатній адгезії плівка бітуму відшаровується від поверхні кам'яного матеріалу під дією води та транспортних навантажень. Незв'язаний мінеральний матеріал виноситься за колесами автомобіля, внаслідок чого відбувається лушення асфальтобетонних покриттів, утворення на них вибоїн та ям. Слабке зчеплення є однією з головних причин передчасного руйнування поверхневих обробок.

Зчеплення бітуму з поверхнею мінерального матеріалу визначається характером процесів, що відбуваються на поверхні розділу двох фаз «бітум — мінеральний матеріал», і залежить від хімічної природи обох компонентів та умов контакту.

Необхідною передумовою зчеплення є змочування бітумом поверхні мінерального матеріалу, або формування міжфазного контакту, яке визначається площею контакту двох фаз: фактичною S_n і максимальною (мономолекулярною) S_m . Досягненню S_m перешкоджає розвиненість мікрорельєфу кам'яної поверхні та опір граничних з нею шарів бітуму.

Змочування або швидкість встановлення міжфазного контакту характеризується так званим кутом змочування (θ).

Відомо, що поверхня змочується при $0^\circ < \theta < 90^\circ$ і не змочується при $90^\circ < \theta < 180^\circ$.

Величина кута змочування залежить від значень питомої вільної поверхневої енергії — поверхневого натягу трьох поверхонь розділу: бітум-повітря ($\sigma_{бп}$), бітум-мінеральний матеріал ($\sigma_{бм}$) та повітря-мінеральний матеріал ($\sigma_{пм}$).

Ця залежність підпорядковується закону Лапласа-Неймана:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{пм} - \sigma_{бм}}{\sigma_{бп}} \quad (2.1)$$

Зв'язок між кутом змочування α та поверхневим натягом бітуму $\sigma_{\text{бп}}$ можна описати рівнянням Юнга через так звану термодинамічну роботу адгезії W_A (вільну енергію рівноважного розподілу фаз на нескінченно великій відстані):

$$W_A = \sigma_{\text{бп}} (1 + \cos \alpha). \quad (2.2)$$

З формули (2.1) видно, що у випадку повного змочування S_m (при $\alpha = 0$) робота адгезії буде максимально можливою, $W_A = 2 \sigma_{\text{бп}}$. При відсутності змочування ($\alpha = 180^\circ$) адгезії бітуму до щебеню не спостерігається ($W_A = 0$).

Ступінь розтікання бітуму по поверхні, крім міжфазних властивостей, залежить також від його когезійних характеристик, в першу чергу від так званої роботи когезії $W_k = 2 \sigma_{\text{бп}}$. При $W_A - W_k \geq 0$ спостерігається повне змочування, в інших випадках $S_n < S_m$. [50].

За здатністю змочуватись водою речовини поділяються на гідрофільні — оксиди, карбонати, силікати, слюда, кварц та гідрофобні — сірка, графіт, тальк, сульфіди, жири, парафіни, бітуми.

Після змочування при контакті бітуму з мінеральною поверхнею відбуваються процеси електростатичної взаємодії (в тому числі утворення міжфазного подвійного електричного шару), а також адсорбції. Розрізняють фізичну (оборотну) та хімічну адсорбцію. Адсорбцією називається властивість поверхні твердого або рідкого тіла зв'язувати молекули рідкої або газоподібної речовини, дотичної з цією поверхнею. Фізична адсорбція обумовлена ван-дер-ваальсовими силами та силами міжмолекулярного притягання. На неї значним чином впливає геометрія (шорсткість) поверхні розділу. При протіканні на границі розділу хімічних реакцій обміну або приєднання має місце хімічна адсорбція або хемосорбція, характерною рисою якої є необоротність процесу.

Між цими двома різновидами адсорбції існує принципова відмінність. Фізична адсорбція, що відбувається під впливом фізичних сил тяжіння, приводить до утворення на кам'яній підкладці орієнтованих шарів бітуму.

При цьому жодних хімічних змін в адсорбованому бітумі не відбувається. При хемосорбції адсорбований бітум зазнає хімічної зміни. Проте хемосорбція відбувається лише в одному шарі молекул адсорбованої речовини. При фізичній адсорбції можуть утворюватися фізично адсорбовані шари товщиною в декілька молекул.

Практично за наявності хемосорбції, що зачіпає лише мономолекулярний шар, має місце і фізична адсорбція, що охоплює ряд наступних шарів. Абсолютно очевидно, що міцність прилипання (адгезія) бітуму до поверхні мінеральних часток у великій мірі залежить від характеру зв'язків, виникаючих між цими матеріалами. За наявності хімічних зв'язків (тобто при хемосорбції) досягається найміцніше зчеплення бітуму з мінеральним матеріалом.

Існують також проміжні види адсорбції, як, наприклад, у випадку утворення водневих зв'язків.

Молекулярно-кінетичною передумовою утворення адгезійного зв'язку є забезпечення достатньо високої рухомості молекул бітуму на границі розділу фаз. При наближенні значень поверхневої енергії міжфазної границі (поверхневого натягу) $\sigma_{\text{бп}}$ до 0 зростання рухливості макромолекул забезпечує сумісність обох фаз в зоні контакту, аж до граничного випадку, коли можлива взаємна дифузія з переміщенням окремих елементів через границю розділу фаз.

Характер та інтенсивність цих процесів, а тим самим і міцність зв'язку між бітумом та кам'яним матеріалом, залежить від таких факторів, як активність та в'язкість бітуму, хіміко-мінералогічний склад, шорсткість, вологість, чистота та розмір зерен мінерального матеріалу, а також температури нагріву бітуму та мінерального матеріалу.

Активність бітуму визначається ступенем ароматичності його складових, не насиченістю хімічних зв'язків та наявністю кисневих, сірчистих, азотовмісних сполук.

В'язкість бітуму гальмує відшарування плівки в'язучого від мінеральної поверхні під дією води, і чим більш в'язкий бітум, тим важче його відшарувати. З іншого боку, чим більша в'язкість бітуму, тим важче забезпечити адгезійний

контакт з кам'яним матеріалом при тих же температурних умовах в зв'язку з погіршенням змочування поверхні [50].

Вирішальне значення для адгезії має хіміко–мінералогічний склад кам'яних матеріалів.

Мінеральні матеріали, які використовуються в дорожньому будівництві, характеризуються різними адсорбційними та хемосорбційними властивостями в силу різноманіття мінералогічного складу, що визначає їх кислотно–лужні властивості.

Адгезійна активність мінерального матеріалу залежить від наявності на поверхні адсорбційних центрів певного заряду, через які здійснюється контактна взаємодія між бітумом і кам'яним матеріалом. На практиці поверхня кам'яних матеріалів має як позитивно так і негативно заряджені активні зони, кожна з яких адсорбує свій певний вид полярних груп. Загальний заряд поверхні вважається позитивним або негативним в залежності від того, які активні зони є переважаючими. Поверхня основних порід (вапняків, доломітів, мармуру), що вміщують оксиди лужноземельних і важких металів, має загальний позитивний заряд, а кислих з переважним вмістом кремнезему SiO_2 (гранітів, сієнітів, пісковиків, кварцитів та ін.) — негативний. Належність мінерального матеріалу до того чи іншого типу гірської породи визначається вмістом оксиду кремнію (SiO_2) [50].

Наявність у бітумі поверхнево–активних речовин (ПАР) переважно аніонного типу, забезпечує його міцне зчеплення з мінеральним матеріалом основних порід завдяки електростатичному притяганню та хімічній адсорбції між негативно зарядженими сполуками в'язучого та позитивно зарядженою поверхнею активних зон мінералів. В результаті хімічних реакцій в зоні контакту утворюються стійкі водонерозчинні сполуки.

При взаємодії бітуму з кислими породами, поверхня яких загалом має однаковий з ним заряд, спостерігається переважно фізична адсорбція, яка носить оборотний характер. У цьому випадку плівка бітуму легко відшаровується під дією води та транспортних навантажень.

В Україні для приготування асфальтобетонних та бітумомінеральних сумішей згідно з нормативними документами дозволено застосування різних за походженням кам'яних матеріалів. Переважну більшість таких матеріалів складають граніти, гранодіорити, пісковики, вапняки, кварцити тощо. Досвід експлуатації автомобільних доріг показує, що мінеральні матеріали різного походження забезпечують різний ступінь водостійкості, морозостійкості та тріщиностійкості покриттів, улаштованих з їх застосуванням. Найчастіше використовується мінеральний матеріал кислої гірської породи — граніт, який характеризується високою міцністю та стійкістю до стирання. Проте, асфальтобетонні покриття на основі гранітних кам'яних матеріалів у більшості випадків мають недостатню тривалу водостійкість та морозостійкість, порівняно з асфальтобетонними покриттями на основі вапняків. Слід зазначити, що за величиною показника зчеплення бітуму з мінеральною поверхнею (або показника водостійкості плівки бітуму на поверхні мінеральних матеріалів), кам'яні матеріали однієї природи, але з різних родовищ, або навіть різних горизонтів одного родовища, можуть суттєво відрізнятися. Причиною цього можуть бути різні мінералогічний та хімічний склади гірської породи і, відповідно, поверхнева активність кам'яного матеріалу.

Традиційно прийнято вважати, що матеріали з кислих порід погано взаємодіють з бітумом. Однак, поверхня мінеральних матеріалів, які застосовуються в дорожньому будівництві, мозаїчна, і кожна активна зона адсорбує певний вид полярних груп. Крім того, при взаємодії мінеральних матеріалів з органічними в'язучими, бітум контактує з поверхнево-адсорбційним шаром, склад якого може значно відрізнятися від складу самої породи і, за рахунок цього, впливати на зчеплення.

Фахівцями ХНАДУ були проведені дослідження щодо визначення впливу хімічного складу мінеральних матеріалів різного походження на показник зчеплення нафтових дорожніх бітумів з їх поверхнею. Результати експериментальних досліджень показали, що зі збільшенням у складі кам'яного матеріалу загальної кількості оксидів Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO і MgO показник

зчеплення з мінеральною поверхнею зростає. Зменшення показника зчеплення з мінеральною поверхнею спостерігається при зростанні у складі кам'яного матеріалу SiO_2 [50].

На формування адгезійного контакту впливає шорсткість твердої поверхні. Чим більша шорсткість, тим гірші умови змочування. Повітря та забруднення, що знаходяться в заглибленнях та порах щєбню, перешкоджають змочуванню та адгезії. Але якщо поверхня вже вкрита бітумом, то змістити плівку в'язучого з шорсткої поверхні важче, ніж з гладкої. Бітуми добре прилипають до шорсткої поверхні порід зернистокристалічної структури і погано до поверхні порід прихованокристалічної та склоподібної структури.

Для хемосорбційних процесів найбільш активними ділянками на поверхні є кути та ребра, для фізичної адсорбції – заглиблення, ями, щілини. Зі зменшенням розміру мінеральних частинок та збільшенням його питомої поверхні збільшується кількість активних зон, що підвищує і загальну адгезійну активність матеріалу.

Адгезія бітуму залежить від виду пилу, яким вкритий щєбінь. Якщо поверхня мінерального матеріалу вкрита вапняковим чи базальтовим пилом, або тонкими шарами оксидів заліза, алюмінію та оксидів інших металів то адгезія бітуму покращується, якщо глиною або гранітним пилом – погіршується.

У процесі приготування асфальтобетонної суміші можуть змінюватися умови взаємодії бітуму із зернами піску і щєбню. Якщо до об'єднання з бітумом буває сухе перемішування мінеральних матеріалів, то зерна піску і щєбню обволікаються дрібними частками мінерального порошку, який, як правило, отримують з карбонатних гірських порід. Внаслідок такої обробки відбувається свого роду модифікація (активація) поверхні зерен піску і щєбню, яка сприяє поліпшенню зчеплення з бітумом.

Бітум — термопластичний матеріал. Тому нагрівання підвищує зчеплення бітуму з мінеральними матеріалами завдяки зниженню його в'язкості, поліпшенню змочування, а також більш інтенсивному протіканню фізико-хімічних процесів в зоні контакту [50].

Нагрівання кам'яного матеріалу забезпечує обезводнення його поверхні, при якому відбувається втрата вільної та частково зв'язаної води, а також підтримування необхідної температури бітуму під час процесу обволікання.

В асфальтобетонних дорожніх сумішах бітумна плівка неоднорідна. Найменша товщина її в точках контакту між частинками мінерального наповнювача. У граничних шарах бітуму і мінерального матеріалу концентруються переважно компоненти, які містять гетероатоми, що супроводжується перебудовою надмолекулярної структури бітуму в об'ємі та підвищенням його жорсткості. Енергія взаємодії бітуму з поверхнею мінеральних матеріалів основного та кислотного типів майже однакова і досягає (30 – 35) Дж/м².

Активність бітумів по відношенню до мінеральних матеріалів визначають в основному аніоноактивні речовини — асфальтогенові та нафтеніві кислоти. Тому, сполуки, які сорбуються на поверхні порід, приблизно ідентичні. Краща адгезія до мінералів основного типу пояснюється додатковим вкладом іонних зв'язків за рахунок кислотних компонентів бітуму.

Підсумовуючи вище вказане слід зазначити, що однією з головних умов отримання асфальтобетону з високою водостійкістю є міцне зчеплення бітуму з мінеральним матеріалом, яке забезпечується перш за все гарним змочуванням та хімічною взаємодією активних компонентів бітуму і мінерального матеріалу. Одним з механізмів зчеплення є утворення подвійного електричного поля на поверхні розділу плівки бітуму та твердого мінерального матеріалу. Властивості тонкого шару бітуму, що адсорбційно зв'язаний з мінеральним матеріалом, залежать від хімічного, мінерального складу та структури поверхні мінерального матеріалу, структури та властивостей бітуму, а також умов взаємодії між ними на межі розділу фаз.

2.3 Дослідження хімічного складу золи-винесення та обґрунтування можливості використання як наповнювача в асфальтобетоні

Дослідники [51] виконали аналітичний огляд золи-винесення в різних країнах і прийшли до висновку, що в зола-винесення в різних країнах відрізняється одна від одної за хімічним та зерновим складом. Це пов'язане з тим, що різні країни використовують різні типи палива, а також метод їх спалювання. Велику роль відіграє метод збору золи-винесення. Тому доцільно дослідити вітчизняну золу-винесення з різних ТЕС.

Були досліджені та аналізовані фізико–хімічні характеристики та стан поверхні техногенної сировини, що є важливими додатковими аспектами для оцінки її використання.

Для вивчення можливості використання техногенної сировини як наповнювача для виробництва асфальтобетону, проведено дослідження відходів паливно–енергетичної промисловості у вигляді золи-винесення теплових електростанцій. У рамках цих досліджень були взяті до уваги золи-винесення вітчизняних виробників, зокрема Новотроїцької ТЕС, Дарницької та Бурштинської ТЕС. З метою порівняння якості досліджуваних відходів паливно–енергетичної промисловості було використано вапняковий мінеральний порошок виробництва ТОВ «Скало-Подільський спец кар'єр».

Один з важливих аспектів при використанні золи-винесення – це його радіоактивність. Тому на початковому етапі досліджень були проведені вимірювання безпеки досліджуваних відходів паливно–енергетичної промисловості. Вміст природних радіонуклідів у досліджуваних зразках золи-винесення було визначено відповідно до ДГН 6.6.1. – 6.5.061 [52]. Згідно з отриманими даними (таблиця 2.1), матеріали належать до I класу і можуть бути використані у будівництві всіх видів.

Для визначення фізико-механічних характеристик золи-винесення були використані вимоги ДСТУ Б В.2.7–121 [6]. Цей документ був обраний як норматив для вимірювання фізико-механічних властивостей золи-винесення як

наповнювачів через те, що процеси формування структури мінеральних наповнювачів з бітумом схожі за своєю природою на механізм взаємодії у бінарній системі «бітум – мінеральний порошок». Цей документ надає стандартизовані методи оцінки таких характеристик, як зерновий склад, набрякання, структурувальна здатність і т. д., які є важливими для оцінки якості золи-винесення у контексті її використання як наповнювача у складі асфальтобетонної суміші. Використання цього стандарту дозволяє забезпечити об'єктивні та порівняльні результати оцінки фізико-механічних властивостей золи-винесення, що є важливим для забезпечення якості та надійності асфальтобетону, виготовленого з її застосуванням.

Таблиця 2.1 – Вміст природних радіонуклідів

№ п/п	Виробник золи-винесення	Вміст СаО, %	Вміст природних радіонуклідів, Бк/кг
1	Бурштинська ТЕС	3,07	91,2574±24,1123
2	Трипільська ТЕС	3,33	93,4142±22,2461
3	Дарницька ТЕС	3,17	93,1274±21,1635

Розмір часток золи-винесення визначався через процес розсіювання на стандартному комплекті сит для інертних матеріалів. Після цього використовувався контрольні сита (№008) і додаткове сито (№004).

Згідно з результатами досліджень, можна зробити висновок, що понад 90 % часток золи-винесення, з Бурштинської та Дарницької ТЕС, має загальну питому поверхню 4380 см²/г (не розподілену на фракції) тоді як загальна питома поверхня Трипільської ТЕС становить 4390 см²/г, що відносить ці матеріали до дрібнодисперсної категорії (більше 4000 см²/г). Питома поверхня пилоподібної фракції, яка пройшла через сито з розміром отворів 0,04 мм для Бурштинської та Дарницької ТЕС склала 4830 см²/г, а для Трипільської ТЕС – 4830 см²/г. Результати наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Зерновий склад та питома поверхня золи-винесення

Зола-винесення Бурштинської ТЕС								
Загальна поверхня, см ² /г	Зерновий склад							Питома поверхня золи, що залишилась на піддоні
	Залишки на ситі	Розмір фракцій, мм						
		1,25	0,63	0,315	0,17	0,071	Піддон	
4380	Частковий, %	0	0,31	2,35	3,0	3,81	90,44	4830
	Повний, %	0	0,4	2,75	5,75	9,56	100,00	
Зола-винесення Трипільської ТЕС								
Загальна поверхня, см ² /г	Зерновий склад							Питома поверхня золи, що залишилась на піддоні
	Залишки на ситі	Розмір фракцій, мм						
		1,25	0,63	0,315	0,17	0,071	Піддон	
4390	Частковий, %	0	0,36	2,89	2,72	4,53	89,37	4820
	Повний, %	0	0,49	3,38	6,10	10,63	100,00	
Зола-винесення Дарницької ТЕС								
Загальна поверхня, см ² /г	Зерновий склад							Питома поверхня золи, що залишилась на піддоні
	Залишки на ситі	Розмір фракцій, мм						
		1,25	0,63	0,315	0,17	0,071	Піддон	
4380	Частковий, %	0	0,38	2,63	2,89	3,91	89,96	4830
	Повний, %	0	0,61	3,24	6,13	10,04	100,00	

За результатами аналізу оксидного складу золи-винесення (таблиця 2.3) проведена оцінка її якості розрахунковим методом з визначенням модуля основності (M_o), силікатного модуля (M_c) та коефіцієнта якості (K_y).

Згідно з оксидним складом у всіх досліджуваних зол-винесення, понад 70 % складають оксиди силіцію та алюмінію. За класифікацією, ці золи відносяться до кислої приховано активної золи. Основними складовими золи-винесення ТЕС є SiO_2 та Al_2O_3 , які знаходяться у склоподібній фазі. Значна частина SiO_2 знаходиться у формі кварцу, тоді як Al_2O_3 міститься у муліті.

Таблиця 2.3 – Оксидний склад золи-винесення

Оксид	МП Скала– Подільського спец кар'єру	Бурштинська ТЕС	Трипільська ТЕС	Дарницька ТЕС
		Концентрація, %		
Al ₂ O ₃	1,92±0,0069	30,48 ± 0,11	22,42± 0,09	31,54 ± 0,11
SiO ₂	15,91±0,0063	50,78 ± 0,14	54,20± 0,15	52,32 ± 0,12
SO ₂	–	0,31 ± 0,01	0,29± 0,01	0,25 ± 0,02
K ₂ O	2,20±0,0035	3,35 ± 0,18	2,90± 0,08	3,35 ± 0,18
CaO	35,25±0,051	3,07 ± 0,10	3,33± 0,11	3,17 ± 0,10
TiO ₂	–	1,24 ± 0,03	1,12± 0,09	1,22 ± 0,03
Cr ₂ O ₃	–	0,04 ± 0,01	0,04 ± 0,01	0,02 ± 0,01
MnO	–	0,07 ± 0,01	2,00± 0,06	1,32 ± 0,04
Fe ₂ O ₃	2,29±0,006	10,43 ± 0,03	12,32± 0,05	9,21 ± 0,03
NiO	–	0,02 ± 0,00	0,01 ± 0,00	0,02 ± 0,00
CuO	–	0,02 ± 0,00	0,01 ± 0,00	0,02 ± 0,00
ZnO	–	0,02 ± 0,00	0,03 ± 0,01	0,03 ± 0,01
As ₂ O ₃	–	0,02 ± 0,00	0,02 ± 0,01	0,02 ± 0,00
Rb ₂ O	–	0,02 ± 0,00	0,02 ± 0,00	0,02 ± 0,00
SrO	–	0,06 ± 0,00	0,07 ± 0,02	0,06 ± 0,01
ZrO ₂	–	0,05 ± 0,00	0,05 ± 0,01	0,04 ± 0,01
PbO	–	0,02 ± 0,0054,20	0,02 ± 0,00	0,01 ± 0,00
MgO	5,80±0,06	1,98± 0,03	1,92± 0,02	2,00± 0,03
Na ₂ O	1,60±0,0035	0,5± 0,00	0,7± 0,00	0,4± 0,00
Інші лужні та не індифіков.	–	2,13	3,73	2,92

Для золи-винесення з Бурштинської ТЕС, характеристики модулю основності складають $M_o=0,11$; силікатного модулю $M_c=1,24$; коефіцієнту якості $K_y=0,69$, для золи, яка виноситься з Трипільської ТЕС, характеристики модулю основності складають $M_o=0,12$; силікатного модулю $M_c = 1,58$; коефіцієнта якості $K_y=0,49$. А для золи-винесення з Дарницької ТЕС, характеристики модулю основності складають $M_o = 0,11$; силікатного модулю $M_c = 1,28$; коефіцієнта якості $K_y = 0,69$.

Золу-винесення по показнику основності відносять до понад кислих ($M_o < 0,6$). Силікатна активність проявляється через наявність у складі золи винесення силікатних мінералів, які підвищують температуру розплаву та впливають на реологічні властивості системи.

Гідравлічна активність оцінюється коефіцієнтом якості. У чисельнику формули розташовані оксиди, що підвищують гідравлічну активність, в знаменнику – що її знижують. Отже, чим вище коефіцієнт якості, тим вище гідравлічна активність. Для даної проби коефіцієнт якості всіх досліджуваних зол–винесення ($K_y < 1$), тобто зола має низьку гідравлічну активність. Тому ці золи-винесення можна віднести до приховано–активних.

До складу даних зол–винесення також входять K_2O , CaO , TiO_2 , Fe_2O_3 та MgO так як їх частка в складі золи-винесення менша ніж 25 % можна зробити висновок що їх цілком можливо використовувати у виробництві асфальтобетонної суміші.

2.4 Дослідження структуровальної здатності мінерального порошку за різних експлуатаційних температур

Метод «Кільця і Кулі» характеризує виключно вплив мінерального порошку на властивості бітуму за високих температур експлуатації, та не враховує можливу зміну властивостей бітуму за низької температури експлуатації та за технологічних температур. У зв'язку з цим, було проведене дослідження яке присвячено оцінюванню впливу мінерального порошку та золи-винесення на структурування бітуму за низької та високої температури експлуатації, а також за технологічних температур виробництва асфальтобетонних сумішей.

Для проведення досліджень було прийнято мінеральний порошок з вапняку, золи-винесення Трипільської ТЕС, золи-винесення Дарницької ТЕС та золи-винесення Бурштинської ТЕС.

Також для досліджень було прийнято базовий бітум марки БНД 70/100, що характеризується глибиною проникності голки за температури 25 °С $74 \times 0,1$ мм, температурою розм'якшеності 48 °С та температурою крихкості мінус 19 °С.

Досліджувану суміш мінерального порошку та бітуму (асфальтов'язуче) отримували шляхом змішування 60 % мінерального порошку з 40 % бітуму за температури близько 150 °С. Оскільки в роботі [53] було показано, що на структурувальну здатність мінерального порошку впливає розмір його частинок, то для більш точного порівняння було взято мінеральний порошок з розміром частинок менше ніж 0,071 мм.

Структурувальну здатність мінерального порошку за низьких експлуатаційних температур оцінювали за різницею температури крихкості асфальтов'язучого та бітуму. Структурувальну здатність мінерального порошку за високих експлуатаційних температур оцінювали за різницею температури розм'якшеності асфальтов'язучого та бітуму, а також за відношенням динамічної в'язкості асфальтов'язучого та бітуму за температури 70 °С. Структурувальну здатність мінерального порошку за технологічних температур оцінювали за відношенням динамічної в'язкості асфальтов'язучого та бітуму за температури 165 °С. В усіх випадках для забезпечення потрібної товщини плівки асфальтов'язучого або ж його обсягу, враховували його дійсну щільність.

Вимогами [6] встановлено, що структурувальна здатність мінерального порошку за зміною температури розм'якшеності повинна становити від 10 °С до 20 °С. Результати досліджень показали, що всі мінеральні порошки за структурувальною здатністю за високих експлуатаційних температур на основі зміни температури розм'якшеності відповідають вимогам [6] (таблиця 3.1 та рисунок 3.6).

Розглянемо структурувальну здатність мінерального порошку за високої температури експлуатації за відношенням динамічної в'язкості за температури 70 °С таблиця 2.4.

Таблиця 2.4 – Структурувальна здатність мінерального порошку за відношенням динамічної в'язкості (висока температура експлуатації)

Сировина для виробництва мінерального порошку	Вапняк	Зола-винесення Бурштинської ТЕС	Зола-винесення Дарницької ТЕС	Зола-винесення Трипільської ТЕС
Структурувальна здатність	4,30	4,70	5,00	4,70

Найбільшою структурувальною здатністю за відношенням динамічної в'язкості відзначається мінеральний порошок із золи винесення Дарницької ТЕС (5,00), а найменшою – з вапняку (4,3). Близькою до структурувальної здатності мінерального порошку з вапняку є структурувальна здатність зола винесення Бурштинської ТЕС та зола винесення Трипільської ТЕС (4,7).

Ще більш цікавими виявилися результати визначення структурувальної здатності вапнякового мінерального порошку за технологічних температур (таблиця 2.5). За температури 165 °С структурувальна здатність мінерального порошку з вапняку є більше ніж в два рази вищою за структурувальну здатність мінерального порошку за температури 70 °С, тому варто очікувати, що за низької температури експлуатації структурувальна здатність вапнякового мінерального порошку буде найнижчою. Також варто зазначити, що характер структурувальної здатності мінерального порошку за відношенням динамічної в'язкості за температури 70 °С та 165 °С є однаковим.

Таблиця 2.5 – Структурувальна здатність мінерального порошку за відношенням динамічної в'язкості (технологічна температура)

Сировина для виробництва мінерального порошку	Вапняк	Зола-винесення Бурштинської ТЕС	Зола-винесення Дарницької ТЕС	Зола-винесення Трипільської ТЕС
Структурувальна здатність	8,60	9,80	10,80	9,90

Результати визначення структурувальної здатності мінерального порошку за низької температури експлуатації (таблиця 2.6) засвідчили правдивість

висловленого припущення щодо можливої нижчої структурувальної здатності вапнякового мінерального порошку за низької температури експлуатації.

Якщо структурувальна здатність мінерального порошку за температурою розм'якшеності становить від 12,4 °С (з вапняку) до 13,5 °С (зола-винесення Трипільської ТЕС), то структурувальна здатність за температурою крихкості становить від 3,0 °С (з вапняку) до 4,2 °С (зола винесення Дарницької ТЕС).

Таблиця 2.6 – Структурувальна здатність мінерального порошку за зміною температури крихкості

Сировина для виробництва мінерального порошку	Вапняк	Зола-винесення Бурштинської ТЕС	Зола-винесення Дарницької ТЕС	Зола-винесення Трипільської ТЕС
Структурувальна здатність, °С	3,0	3,8	4,2	4,0

У процесі даного випробування було встановлено, що під час підготування пластин з асфальтов'язучим відбувається його розшарування, тобто можна стверджувати, що значною мірою має місце не структурування в'язучого, а його наповнення мінеральним порошком. Це, в свою чергу, може впливати на достовірність результатів випробування, зокрема, під час визначення структурувальної здатності за відношенням динамічної в'язкості в результаті осідання мінерального порошку, що може пояснити більшу структурувальну здатність мінерального порошку за технологічної температури. Крім того, під час використання відповідного мінерального порошку за технологічної температури можливе часткове відділення бітуму від асфальтов'язучого та сегрегація асфальтобетонної суміші за в'язучим.

У результаті об'єднання мінерального порошку з бітумом відбуваються позитивні зміни останнього, що проявляється в більшому зростанні температури розм'якшеності ніж температури крихкості, тобто асфальтов'язуче має більший інтервал пластичності ніж бітум (таблиця 2.7).

У цілому інтервал пластичності асфальтов'язучого є більшим в межах до 9,5 °С. Зважаючи на те, що найменше підвищення температури крихкості має місце у випадку асфальтов'язучого з мінеральним порошком з вапняку, то даний мінеральний порошок можна вважати найбільш привабливим до використання, принаймні для асфальтобетону шару покриття. Але доцільно звернути увагу на мінеральний порошок з золи-винесення Бурштинської ТЕС, золи-винесення Дарницької ТЕС та золи-винесення Трипільської ТЕС.

Таблиця 2.7 – Результати визначення інтервалу пластичності

Сировина для виробництва мінерального порошку	Вапняк	Зола-винесення Бурштинської ТЕС	Зола-винесення Дарницької ТЕС	Зола-винесення Трипільської ТЕС
Інтервал пластичності, °С	74,4	73,5	71,7	72,3
Різниця між інтервалом пластичності бітуму та асфальтов'язучого	9,4	9,5	9,2	6,1

Відомо [54], що під час виробництва асфальтобетонних сумішей під впливом температури та кисню відбувається старіння бітуму, тому дану особливість доцільно враховувати і під час оцінювання структуровальної здатності мінерального порошку, а також під час оцінювання впливу мінерального порошку на старіння асфальтобетону в цілому [55 – 56]. Це означає, що як підвищення температури крихкості, так і зростання температури розм'якшеності певною мірою може бути пов'язане з старінням бітуму.

Дослідження структуровальної здатності мінерального порошку за зміною температури розм'якшеності різного походження засвідчили можливість використання в дорожньому будівництві даного матеріалу та не великий діапазон розходжень результатів випробувань золи-винесення різного походження.

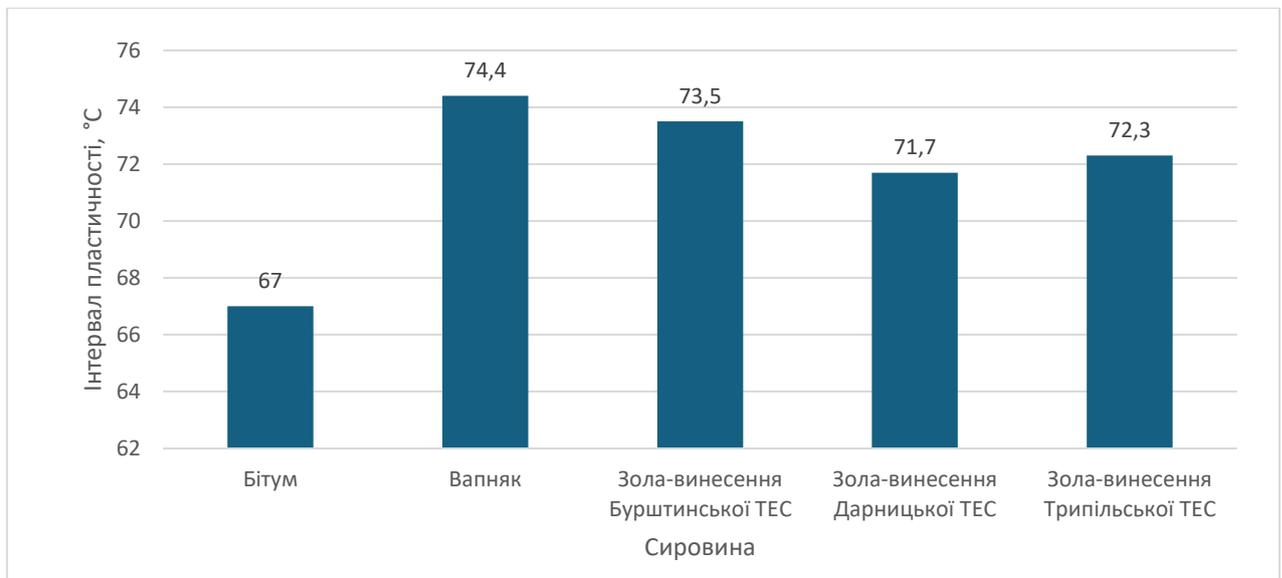


Рисунок 2.1 – Порівняння інтервалу пластичності бітуму та асфальтов'язучого

2.5 Визначення адгезії бітуму до наповнювача

Адгезійна властивість бітуму є дуже важливою його характеристикою, оскільки воно має вирішальне значення для забезпечення багатьох експлуатаційних властивостей композитних матеріалів на основі бітуму. Всім відомо, що взаємний зв'язок та зчеплення мінеральних частинок, що утворюють асфальтобетон, відбувається завдяки внутрішньому тертю між ними та внаслідок склеювання їх бітумом у місцях взаємного з'єднання. Призначення бітуму полягає, насамперед, у склеюванні мінеральних складових асфальтобетону. Крім того, бітум обволікає мінеральні частинки тонкою бітумною плівкою, і, заповнюючи порожнечі між ними, перешкоджає проникненню вологи в асфальтобетон, надаючи мінеральним частинкам гідрофобні властивості. Волога вибірково змочує відкриту поверхню мінерального матеріалу, прагне проникнути крізь плівку бітуму та витіснити її з поверхні мінерального матеріалу. При недостатній адгезії бітум відшаровується та оголює мінеральні частинки. Зміщення плівки полегшується під час руху води, наприклад в умовах струшування. У цьому випадку до впливу води приєднується механічне тертя бітумованих частинок між собою та воду. З підвищенням температури

зменшується в'язкість бітуму та полегшується відрив його від поверхні частинок. При температурі кипіння води в'язкість бітуму ще більше знижується, крім того, при русі полегшується проникнення води через дефектні місця плівки і дифузія її крізь плівку, а також посилюється механічне тертя частинок. Для оцінки зчеплення мінерального матеріалу та бітуму було визначено показники зчеплення методом визначення довготривалого водонасичення.

У роботах [57–64] описували метод визначення адгезійної активності суть якого полягає в оцінці ступеню зниження міцності при стиску зразків суміші мінеральних порошоків з сировини різного походження з бітумом після насичення водою. За величину коефіцієнта водостійкості приймали відношення показника міцності при стиску зразків після насичення їх водою в умовах вакууму і наступного витримування в гарячій воді до показника міцності при стиску не водонасичених зразків.

Для визначення необхідної кількості бітуму у співвідношенні до маси мінерального порошку при заданому показнику залишкової пористості послідовно проектували склади сумішей. Для проведення випробувань готували суміші різного складу, послідовно змінюючи вміст бітуму. З кожного запроектованого складу суміші мінерального порошку з різною кількістю бітуму формували по три зразки для кожного складу сумішей. Не раніше ніж через добу після виготовлення зразків визначали їх середню густину, водонасичення, залишкову пористість та встановлювали вміст бітуму за якого залишкова пористість становила від 5 % до 6 %. Після чого виготовляли шість зразків із запроектованим вмістом бітуму. Перші три зразки піддавали визначенню середньої густини, залишкової пористості та міцності за температури 20 °C на 15 день після виготовлення, наступні три зразки піддавали визначенню середньої густини, залишкової пористості, водонасичення, витримуванню у воді впродовж 14 днів та визначенню міцності за температури 20 °C. За отриманими результатами встановлювали коефіцієнт водостійкості.

Результати випробування наведено в таблицях 2.8 – 2.10.

Таблиця 2.8 – Результати визначення властивостей асфальтов'яжучого із наповнювачем з вапняку

Ч. ч.	Найменування показника	Результати випробування		
1	Очевидна густина мінерального порошку, г/см ³	2,631	2,631	2,631
2	Очевидна густина бітуму, г/см ³	1,016	1,016	1,016
3	Середня густина ущільненої суміші, г/см ³	2,053	2,064	2,068
4	Вміст наповнювача, %	100	100	100
5	Вміст бітуму (понад 100 %), %	13,0	15,0	18,0
6	Вміст бітуму (в 100 %), %	11,50	13,04	15,25
7	Дійсна густина мінеральної частини, г/см ³	2,631	2,631	2,631
8	Середня густина мінеральної частини, г/см ³	1,817	1,795	1,753
9	Дійсна густина суміші, г/см ³	2,224	2,179	2,118
10	Пористість мінеральної частини, % за об'ємом	30,95	31,78	33,39
11	Залишкова пористість, % об'ємом	7,70	5,29	2,34
12	Кількість пор, заповнених в'язучим, % за об'ємом	23,2	26,5	31,0
13	Кількість пор, заповнених в'язучим, %	75,1	83,4	93,0
14	Водонасичення, % об'ємом	6,90	4,40	1,10
15	Пористість мінеральної частини, % за об'ємом (ДСТУ EN)	30,95	31,78	33,39
16	Різниця між залишковою пористістю та водонасичення, %	0,80	0,89	1,24

Результати випробування показали, що тип наповнювача впливає на об'ємні властивості виготовлених зразків. Так, необхідне значення залишкової пористості під час використання наповнювача із вапняку досягається при вмісті бітуму 15,0 % та становить 5,29 % за об'ємом. У випадку використання наповнювача із золи-винесення Бурштинської ТЕС та золи-винесення Дарницької ТЕС необхідне значення залишкової пористості також досягається при вмісті бітуму 15,0 % однак вони є вищими та становлять відповідно 5,73 % та 5,94 % за об'ємом. За використання наповнювача з золи-винесення Трипільської ТЕС для досягнення необхідної залишкової пористості необхідно використовувати 18,0 % бітуму, при цьому значення залишкової пористості становить 5,07 % за об'ємом.

Таблиця 2.9 – Результати визначення властивостей асфальтов'яжучого із наповнювачем з Золи-винесення Бурштинської ТЕС

Ч. ч.	Найменування показника	Результати випробування		
1	Очевидна густина мінерального порошку, г/см ³	2,602	2,602	2,602
2	Очевидна густина бітуму, г/см ³	1,016	1,016	1,016
3	Середня густина ущільненої суміші, г/см ³	2,023	2,038	2,049
4	Вміст наповнювача, %	100	100	100
5	Вміст бітуму (понад 100 %), %	13,0	15,0	18,0
6	Вміст бітуму (в 100 %), %	11,50	13,04	15,25
7	Дійсна густина мінеральної частини, г/см ³	2,602	2,602	2,602
8	Середня густина мінеральної частини, г/см ³	1,790	1,772	1,736
9	Дійсна густина суміші, г/см ³	2,206	2,162	2,102
10	Пористість мінеральної частини, % за об'ємом	31,20	31,89	33,27
11	Залишкова пористість, % об'ємом	8,29	5,73	2,50
12	Кількість пор, заповнених в'язучим, % за об'ємом	22,9	26,2	30,8
13	Кількість пор, заповнених в'язучим, %	73,4	82,0	92,5
14	Водонасичення, % об'ємом	7,40	4,70	1,30
15	Пористість мінеральної частини, % за об'ємом (ДСТУ EN)	31,20	31,89	33,27
16	Різниця між залишковою пористістю та водонасичення, %	0,89	1,03	1,20

Таблиця 2.10 – Результати визначення властивостей асфальтов'яжучого із наповнювачем з золи-винесення Дарницької ТЕС

Ч. ч.	Найменування показника	Результати випробування		
1	Очевидна густина мінерального порошку, г/см ³	2,689	2,689	2,689
2	Очевидна густина бітуму, г/см ³	1,016	1,016	1,016
3	Середня густина ущільненої суміші, г/см ³	2,071	2,082	2,092
4	Вміст наповнювача, %	100	100	100
5	Вміст бітуму (понад 100 %), %	13,0	15,0	18,0
6	Вміст бітуму (в 100 %), %	11,50	13,04	15,25
7	Дійсна густина мінеральної частини, г/см ³	2,689	2,689	2,689
8	Середня густина мінеральної частини, г/см ³	1,833	1,810	1,773
9	Дійсна густина суміші, г/см ³	2,261	2,214	2,149
10	Пористість мінеральної частини, % за об'ємом	31,84	32,67	34,07
11	Залишкова пористість, % об'ємом	8,39	5,94	2,66
12	Кількість пор, заповнених в'язучим, % за об'ємом	23,5	26,7	31,4
13	Кількість пор, заповнених в'язучим, %	73,6	81,8	92,2
14	Водонасичення, % об'ємом	7,50	4,90	1,40
15	Пористість мінеральної частини, % за об'ємом (ДСТУ EN)	31,84	32,67	34,07
16	Різниця між залишковою пористістю та водонасичення, %	0,89	1,04	1,26

Таблиця 2.11 – Результати визначення властивостей асфальтов’яжучого із наповнювачем з золи-винесення Трипільської ТЕС

Ч. ч.	Найменування показника	Результати випробування		
1	Очевидна густина мінерального порошку, г/см ³	2,671	2,671	2,671
2	Очевидна густина бітуму, г/см ³	1,016	1,016	1,016
3	Середня густина ущільненої суміші, г/см ³	2,023	2,028	2,031
4	Вміст наповнювача, %	100	100	100
5	Вміст бітуму (понад 100 %), %	13,0	15,0	18,0
6	Вміст бітуму (в 100 %), %	11,50	13,04	15,25
7	Дійсна густина мінеральної частини, г/см ³	2,671	2,671	2,671
8	Середня густина мінеральної частини, г/см ³	1,790	1,763	1,721
9	Дійсна густина суміші, г/см ³	2,249	2,203	2,139
10	Пористість мінеральної частини, % за об’ємом	32,97	33,98	35,56
11	Залишкова пористість, % об’ємом	10,07	7,94	5,07
12	Кількість пор, заповнених в’яжучим, % за об’ємом	22,9	26,0	30,5
13	Кількість пор, заповнених в’яжучим, %	69,5	76,6	85,8
14	Водонасичення, % об’ємом	9,50	7,30	4,10
15	Пористість мінеральної частини, % за об’ємом (ДСТУ EN)	32,97	33,98	35,56
16	Різниця між залишковою пористістю та водонасичення, %	0,57	0,64	0,97

Таблиця 2.12 – Результати визначення водостійкості ущільнених сумішей

	Наповнювач			
	Вапняк	Зола-винесення Дарницької ТЕС	Зола-винесення Дарницької ТЕС	Зола-винесення Трипільської ТЕС
Водостійкість, %	0,96	0,95	0,93	0,94

За коефіцієнтом водостійкості наповнювачі можна розмістити в такому порядку – з вапняку, золи-винесення Бурштинської ТЕС, золи-винесення Дарницької ТЕС, золи-винесення Трипільської ТЕС. Відповідно значення коефіцієнта водостійкості становлять 0,96, 0,95, 0,93 та 0,94.

Проаналізувавши результати водостійкості зразків із суміші наповнювача та бітуму, можна оцінити адгезію бітуму до мінерального порошку за зміною коефіцієнта водостійкості.

2.6 Визначення експлуатаційного старіння асфальтов'язучої речовини з різними наповнювачами

Відомо, що негативні наслідки старіння бітуму, головним чином, обумовлені його окисленням та викликані високими температурами і дією кисню, за яких відбувається об'єднання бітуму з мінеральними матеріалами, умовами навколишнього середовища, в яких працює бітум у дорожньому шарі, впливами зумовленими транспортними навантаженнями. Під старінням розуміється вся сукупність незворотних змін структури, фізичних та механічних властивостей бітуму, що спостерігаються при зберіганні, технологічних процесах приготування асфальтобетонної суміші та експлуатації. Як правило, хімічні перетворення в бітумах призводять до утворення високомолекулярних конденсованих молекул. Окислення є домінуючою причиною старіння бітумів [65]. Від складу бітуму і, насамперед від наявності легко окислюючих груп і зв'язків у молекулах залежить його схильність до старіння [66].

Дослідження [65–68] показали, що незворотні зміни властивостей асфальтобетонних сумішей та асфальтобетонів у процесі старіння обумовлені як зовнішніми факторами (кисень, температура, ультрафіолетове та радіаційне випромінювання, вода), так і внутрішніми факторами (структурно–реологічний тип та консистенція бітуму) хіміко–мінералогічний склад мінеральних компонентів асфальтобетону (тип гранулометрії, ступінь ущільнення асфальтобетону).

Старіння починається в процесі виробництва асфальтобетонної суміші та продовжується при термостатуванні, транспортуванні до місця укладання суміші в конструктивні шари нежорстких дорожніх одягів та в умовах експлуатації. Зниження показників асфальтобетону відбувається за рахунок зміни структури бітуму, а отже, і його властивостей на покритті з'являються деформації у вигляді тріщин. Процеси, які відбуваються на молекулярному рівні в бітумі, призводять до макроскопічних змін в асфальтобетоні, що виражаються у підвищенні крихкості, зниженні пластичності та ін. Багаторічні спостереження, а також

лабораторні дослідження [68] за службою дорожніх покриттів показали, що однією з основних причин виникнення деформацій на автомобільних дорогах з часом є атмосферні фактори. Відомо, що якщо величина внутрішньої напруги, що виникає в покритті під дією автомобільного руху, не перевищує існуючу міцність покриття, вона не зменшує довговічність асфальтобетону, а сприяє навіть додатковому зміцненню, що виражається в перші роки служби його доущільнення. Значно впливає зміна властивостей асфальтобетону спільна дія навантажень і температури, залежно, від яких асфальтобетон може перебувати у різних реологічних станах. Процесами, що викликають незворотні зміни складу та властивостей бітумів є:

- випаровування легких складових (масла), що відбувається в поверхневому шарі бітуму незначної товщини і залежить від в'язкості бітуму і температури;

- окисполімерізація компонентів бітуму, що відбувається головним чином на зовнішній поверхні в'язучого, що піддається безпосередньої дії світла або ультрафіолетових променів;

- поліконденсація, що відбувається під впливом кисню, і є основним процесом, що змінює склад і структуру бітуму при старінні [69].

В асфальтобетоні процеси старіння бітумів йдуть за тим самим механізмом, як і у вільному бітумі, хоча є деякі особливості, обумовлені присутністю мінеральних матеріалів. Дослідники у своїх роботах [65,67,68] зазначає, що адсорбційні шари в порівнянні з вільним бітумом мають одну важливу перевагу: молекули бітуму в адсорбованих шарах мають набагато меншу рухливість, ніж у вільному бітумі, що знижує їхню реакційну здатність. Це спостерігається в тому, що суміш бітуму з мінеральним наповнювачем при підвищеному вмісті мінерального порошку (наприклад, при виробництві литих асфальтобетонних сумішей) перемішують при високих температурах 215–230°C, при цьому не спостерігається значного окислення бітумів, що обумовлено тим, що у таких сумішах органічне в'язуче в основному знаходиться в адсорбційно–сольватному стані на поверхні мінерального порошку, питома поверхня якого

набагато вища, ніж у звичайних бітумомінеральних композиціях. Продовженням індукційного періоду ланцюгових реакцій, що відбуваються в бітумі, можна досягти збільшення строку служби асфальтобетонного покриття [69]. Це вирішується підбором мінеральних матеріалів, що уповільнюють процеси окислення, та введенням у бітум інгібіторів.

У попередніх дослідженнях [11, 22, 70,] було встановлено, що фізико-механічні показники асфальтобетону із золою-винесення практично не відрізняються від показників асфальтобетону зі стандартним наповнювачем, а водо– та морозостійкість в деяких випадках є вищою. Оскільки деякі дослідники [71] вважають, що кислі мінеральні матеріали прискорюють процеси старіння бітуму, тому доцільно вивчення старіння асфальтов'язучого із золою-винесення.

Старіння бітуму проводили згідно з ДСТУ EN 12607–1 [72] методом RTFOT так як стандартна методика випробування бітумів на старіння (ГОСТ 18180 [73]) не відтворює реальної картини старіння в'язучого, тому що на поверхні випробуваних зразків утворюється полімерна оксидна плівка, яка перешкоджає доступу кисню повітря в об'єм в'язучого. Відбуваються тільки процеси полімеризації в поверхневому шарі, як це має місце в асфальтобетонному покритті при його експлуатації. При цьому чим більша схильність в'язучого до старіння, тим швидше утворюється захисна плівка і тим менш адекватний кінцевий результат. Більш точні результати дозволяє отримати метод RTFOT, за яким схильність в'язучих до старіння оцінюють за кордоном. На відміну від ГОСТ 18180 [73] прогрівання в'язучих виконується в скляних стаканах з постійним перемішуванням, що забезпечує оновлення поверхні в'язучого та контакт з повітрям, яке безперервно подається в термошафу. Таким чином можна зазначити, що метод RTFOT більш точно моделює старіння бітуму в процесі приготування асфальтобетонної суміші [67].

При виконанні випробувань за методом RTFOT застосовують термокамеру з електричним підігрівом.

У камері забезпечується циркуляція гарячого повітря у внутрішньому просторі. Циркуляція забезпечується наявністю отворів для забору повітря і

випускних отворів для випуску гарячого повітря. Схему термокамери наведено на рисунку 2.10. В термокамері встановлено алюмінієвий барабан діаметром (300 ± 10) мм (рисунок 2.2).

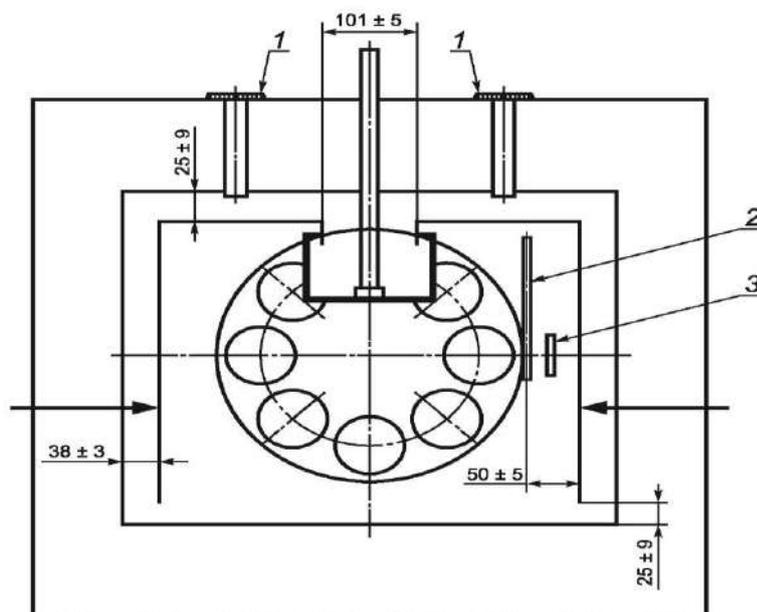
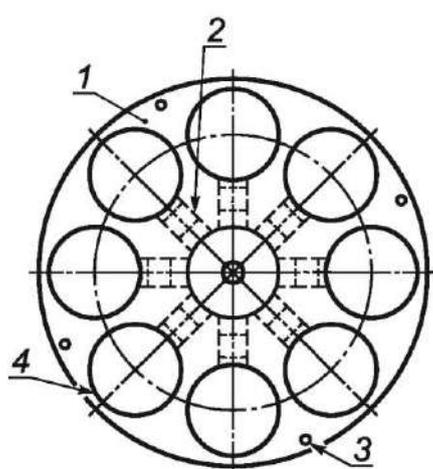
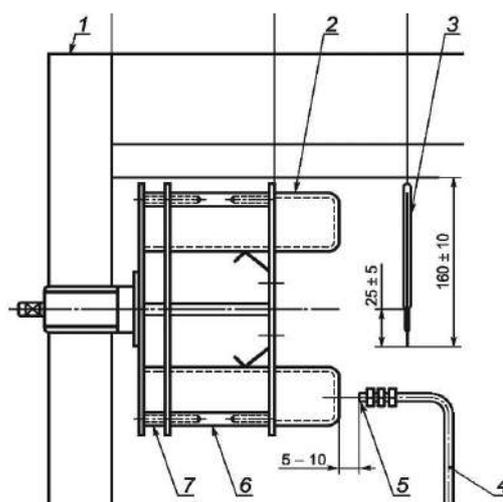


Рисунок 2.2 – Сушильна шафа (вигляд спереду)

Барабан має вісім отворів для закріплення восьми скляних контейнерів у горизонтальному положенні (рисунок 2.3). Швидкість обертання барабана становить $(15,0 \pm 0,2) \text{ хв}^{-1}$.



(вигляд спереду)



(вигляд збоку)

Рисунок 2.3 – Барабан

Вентиляція здійснюється таким чином, що потік повітря проходив через дно термокамери, потім уздовж стінок і виходить через випускні отвори.

У термокамері забезпечується постійна температура внутрішнього простору з допуском не більше $\pm 0,5$ °С. Термокамера обладнана форсункою з вихідним отвором $(1,0 \pm 0,1)$ мм, через форсунку подається гаряче повітря зі швидкістю $(4,0 \pm 0,2)$ л/хв в кожен контейнер в нижній точці обертання.

Для зразків бітуму використовують скляний контейнер (рисунок 2.4) виготовлений з жаростійкого скла.

Зразок бітуму доводять до рухомого стану і зневоднюють, спочатку нагріваючи в сушильній шафі до температури (105 ± 5) °С, а потім, не допускаючи локальних перегрівів, доводять температуру бітуму при постійному перемішуванні до температури на (15 ± 5) °С нижче температури випробування. Час нагрівання бітуму при зазначених умовах не повинен перевищувати 50 хв.

Індекс старіння визначали як відношення динамічної в'язкості асфальтов'язучого після процедури старіння до динамічної в'язкості не зістареного асфальтов'язучого.

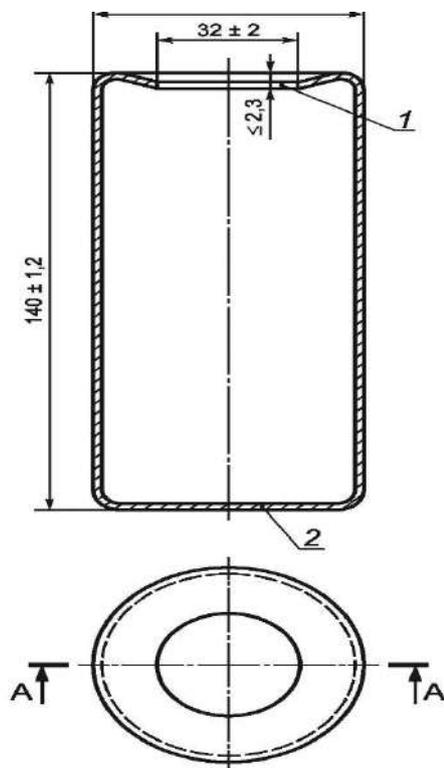


Рисунок 2.4 – Скляний контейнер

Динамічну в'язкість визначали як відношення прикладеного напруження зсуву до швидкості зсуву відповідно до ДСТУ EN 13302 [67].

Загально визнано, що для в'язкопружних систем, якими є бітуми в області температур розм'якшення і вище, фундаментальною їх реологічною характеристикою є динамічна в'язкість.

Динамічну в'язкість всіх досліджуваних об'єктів визначали за температури їх розм'якшеності та температурах 70 °С, 90 °С, 135 °С та 165 °С та 180°С.

Таблиця 2.13 – Визначення зміни температури розм'якшеності (структуровальної здатності) після прогріття

Тип наповнювача	До прогрівання	Після прогрівання	Зміна температури розм'якшеності, °С
Бітум марки 70/100	47,5	52,7	5,2
Вапняковий МП	59,9	61,4	1,5
Зола-винесення з Бурштинської ТЕС	60,9	61,5	1
Зола-винесення з Дарницької ТЕС	60,4	61,8	1,4
Зола-винесення з Трипільської ТЕС	61,0	62,3	1,3
Кварцитний пил	62,0	63,5	1,5
Гранітний пил	61,5	63,6	2,1

Зразки асфальтов'язучого підготовлювали за ДСТУ EN 13179–1 [75] який відрізняється від вітчизняного тим, що складники асфальтов'язучого дозують за об'ємом, а не за масою. Це дає змогу більш точно охарактеризувати структуровальну здатність наповнювачів.

Зміну температури розм'якшеності після прогрівання визначали як різницю температур розм'якшеності, визначених згідно з ДСТУ EN 1427 [76] до та після випробування на прогрівання згідно з ДСТУ EN 12607-1 [72].

Результати випробувань в таблиці 2.13 показують, що асфальтов'язуче із золою-винесення є більш стійким до старіння ніж з вапняковим наповнювачем, найгіршою стійкістю до старіння виявився гранітний пил. Дані результати засвідчили, що оксиди які знаходяться в золі-винесення та в кварцитному пилу

не впливають на погіршення стійкості до старіння бітуму. Згідно з оксидним складом у всіх досліджуваних зол–винесення, понад 70 % складають оксиди силіцію та алюмінію. За класифікацією, ці золи відносяться до кислої приховано активної золи [77]. Тобто основними складовими золи винесення ТЕС є SiO_2 та Al_2O_3 , які знаходяться у склоподібній фазі. Значна частина SiO_2 знаходиться у формі кварцу, тоді як Al_2O_3 міститься у муліті.

Були проведені дослідження впливу експлуатаційного старіння на реологічні властивості асфальтов'язучого, результати наведені в таблиці 2.14

Таблиця 2.14 – Результати визначення впливу експлуатаційного старіння на реологічні властивості асфальтов'язучого

		70 °C	90 °C	135 °C	165 °C	180 °C
1	2	3	4	5	6	7
Вапняковий МП до прогрівання	Швидкість обертання шпинделя, об/хв	0,25	2	50	150	200
	Динамічна в'язкість $\text{Па}\times\text{с}$	860	90	3,7	0,86	0,42
Вапняковий МП після прогрівання	Швидкість обертання шпинделя, об/хв	0,08	1	25	100	200
	Динамічна в'язкість $\text{Па}\times\text{с}$	1425	145	5,1	1,04	0,46
	Індекс старіння	1,66	1,61	1,38	1,21	1,10
Зола-винесення з Бурштинської ТЕС до прогрівання	Швидкість обертання шпинделя, об/хв	0,15	1	30	100	200
	Динамічна в'язкість $\text{Па}\times\text{с}$	1000	120	4,8	1,23	0,57
Зола-винесення з Бурштинської ТЕС після прогрівання	Швидкість обертання шпинделя, об/хв	0,06	0,6	25	100	250
	Динамічна в'язкість $\text{Па}\times\text{с}$	1920	189	6,3	1,4	0,58
	Індекс старіння	1,92	1,58	1,31	1,14	1,02
Кварцитний пил до прогрівання	Швидкість обертання шпинделя, об/хв	0,2	0,8	20	100	250
	Динамічна в'язкість $\text{Па}\times\text{с}$	1350	163	6,4	1,46	0,62
Кварцитний пил після прогрівання	Швидкість обертання шпинделя, об/хв	0,05	0,6	25	100	250
	Динамічна в'язкість $\text{Па}\times\text{с}$	2250	213	7,1	1,51	0,63
	Індекс старіння	1,67	1,31	1,11	1,03	1,02
Зола-винесення з Дарницької ТЕС до прогрівання	Швидкість обертання шпинделя, об/хв	0,2	0,8	20	100	250
	Динамічна в'язкість $\text{Па}\times\text{с}$	1275	151	5,8	1,36	0,58
Зола-винесення з Дарницької ТЕС після прогрівання	Швидкість обертання шпинделя, об/хв	0,05	0,6	25	100	250
	Динамічна в'язкість $\text{Па}\times\text{с}$	2360	225	7,7	1,66	0,65

Кінець таблиці 2.14

1	2	3	4	5	6	7
	Індекс старіння	1,85	1,49	1,33	1,22	1,12
Зола-винесення з Трипільської ТЕС до прогрівання	Швидкість обертання шпинделя, об/хв	0,15	1	30	100	200
	Динамічна в'язкість Па×с	1365	164	6,3	1,53	0,67
Зола-винесення з Трипільської ТЕС після прогрівання	Швидкість обертання шпинделя, об/хв	0,06	0,6	25	100	250
	Динамічна в'язкість Па×с	2650	289	9,3	1,95	0,77
	Індекс старіння	1,94	1,76	1,48	1,27	1,15
Гранітний піл до прогрівання	Швидкість обертання шпинделя, об/хв	0,15	1	30	100	200
	Динамічна в'язкість Па×с	1360	151	6	1,43	0,62
Гранітний піл після прогрівання	Швидкість обертання шпинделя, об/хв	0,06	0,6	25	100	250
	Динамічна в'язкість Па×с	4330	428	13,9	2,96	1,22
	Індекс старіння	3,18	2,83	2,32	2,07	1,97

Аналіз результатів випробування показав, що під час експлуатаційного старіння має місце зростання динамічної в'язкості асфальтов'язучого. Найбільше зростання динамічної в'язкості асфальтов'язучого відбувається за температури 70 °С, відповідно за цієї температури отримано найвищі індекси старіння за зміною динамічної в'язкості (рисунок 2.5).

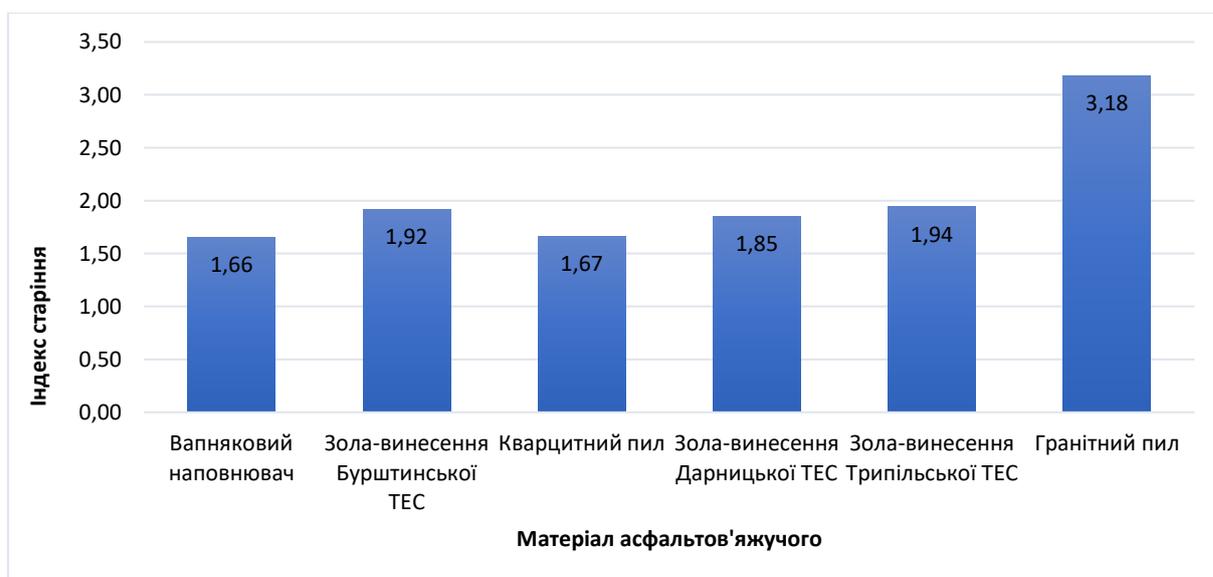


Рисунок 2.5 – Індекс старіння за температури 70 °С залежно від матеріалу асфальтов'язучого

Найменшим індексом старіння характеризується асфальтов'яжуче з вапняком та кварцитом, а саме 1,66 та 1,67 відповідно. Найбільшим індексом старіння характеризується асфальтов'яжуче з гранітом. Для асфальтов'яжучих із золю-винесення характерними є проміжні значення індексу старіння, які становлять від 1,85 до 1,94.

З підвищенням температури індекс старіння всіх асфальтов'яжучих зменшується (рисунок 2.6). При цьому для асфальтов'яжучого з вапняком зменшення індексу старіння є найнижчим і становить 0,05. Найбільше зменшення індексу старіння є характерним для асфальтов'яжучого з кварцитом, гранітом та золю-винесення Бурштинської ТЕС і Дарницької ТЕС, а саме на 0,36, 0,35 та 0,34 і 0,36 відповідно. Проміжне зменшення індексу старіння характерне для асфальтов'яжучого із золю-винесення Трипільської ТЕС, а саме на 0,22.

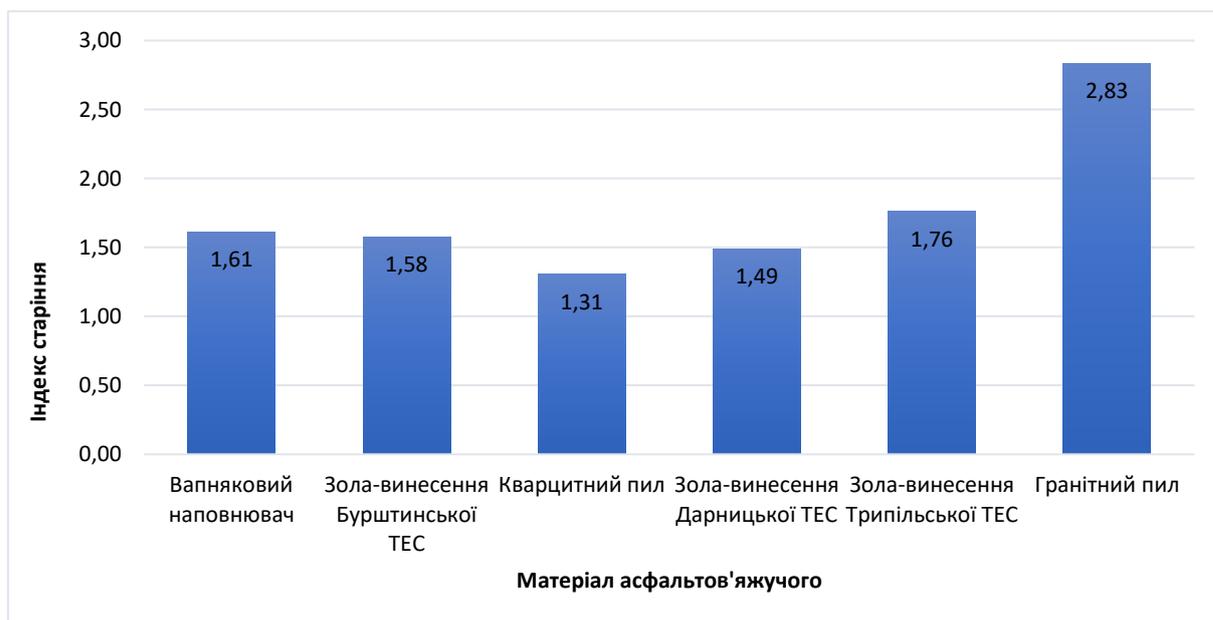


Рисунок 2.6 – Індекс старіння за температури 90 °С залежно від матеріалу асфальтов'яжучого

Із підвищенням температури випробування індекс старіння асфальтов'яжучих стає дедалі меншим (рисунки 2.7 – 2.8) і за температури 180 °С в деяких випадках старіння практично не відбувається (рисунок 2.9).

Найменшим індексом старіння характеризується асфальтов'яжуче з кварцитом та золою-винесення Бурштинської ТЕС (1,02), найбільшим – асфальтов'яжуче з гранітом (1,97).

Аналізуючи результати досліджень впливу експлуатаційного старіння на асфальтов'яжучу речовину, можемо зробити висновок, що показники індексу старіння із золою-винесення показують проміжні значення між вапняковим мінеральним порошком та гранітним пилом. Ці значення також наближаються до вмісту асфальтов'яжучого з використанням вапнякового мінерального порошку.

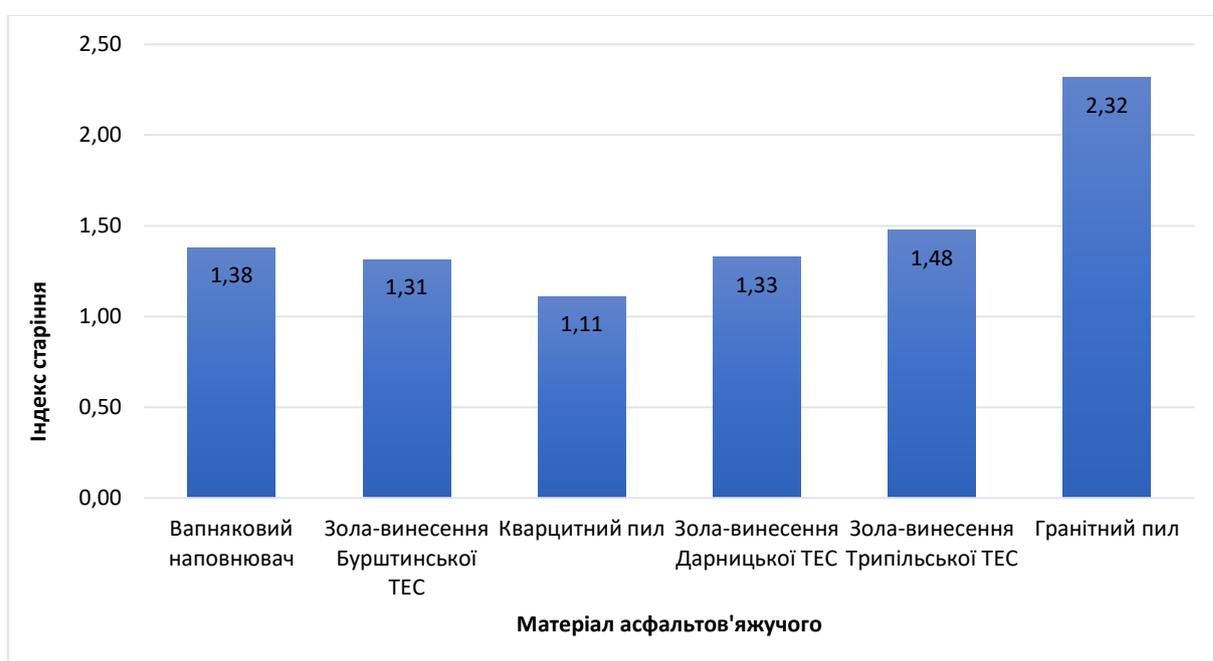


Рисунок 2.7 – Індекс старіння за температури 135 °С залежно від матеріалу асфальтов'яжучого

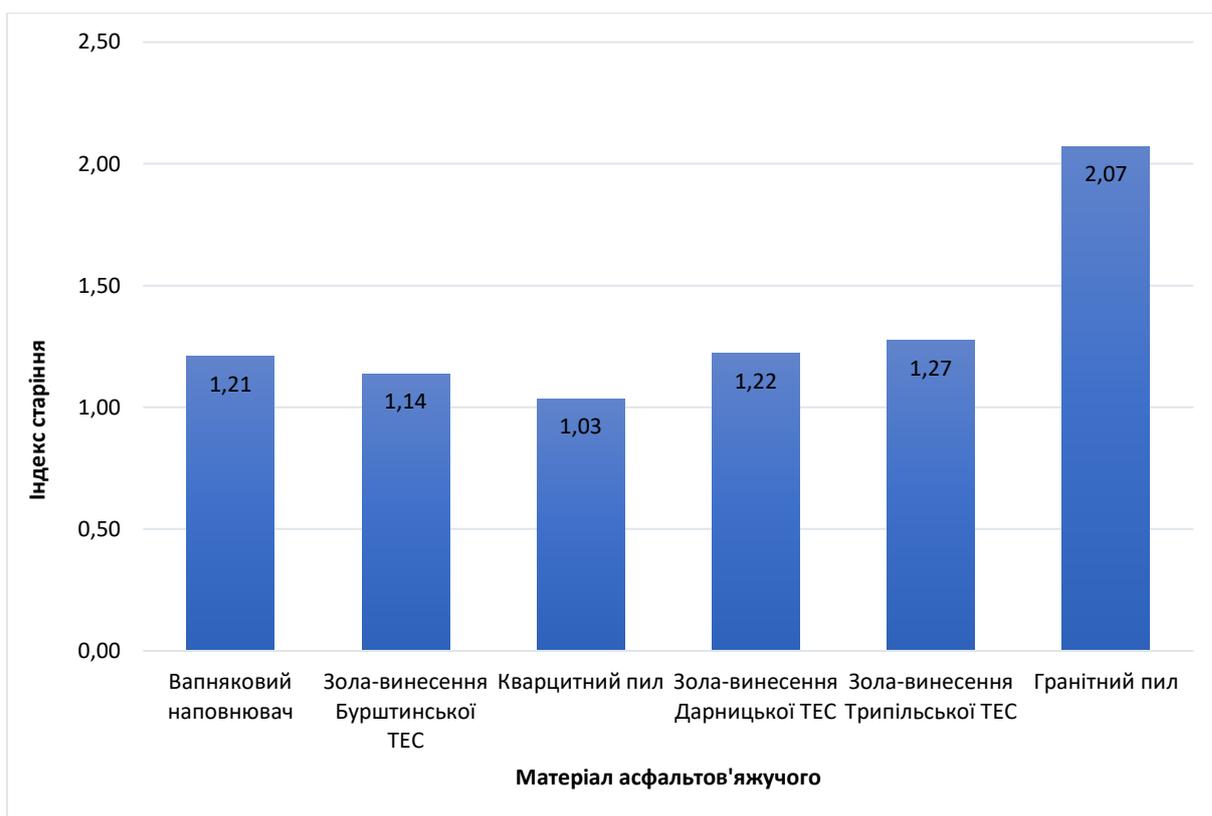


Рисунок 2.8 – Індекс старіння за температури 165 °С залежно від матеріалу асфальтов'язучого

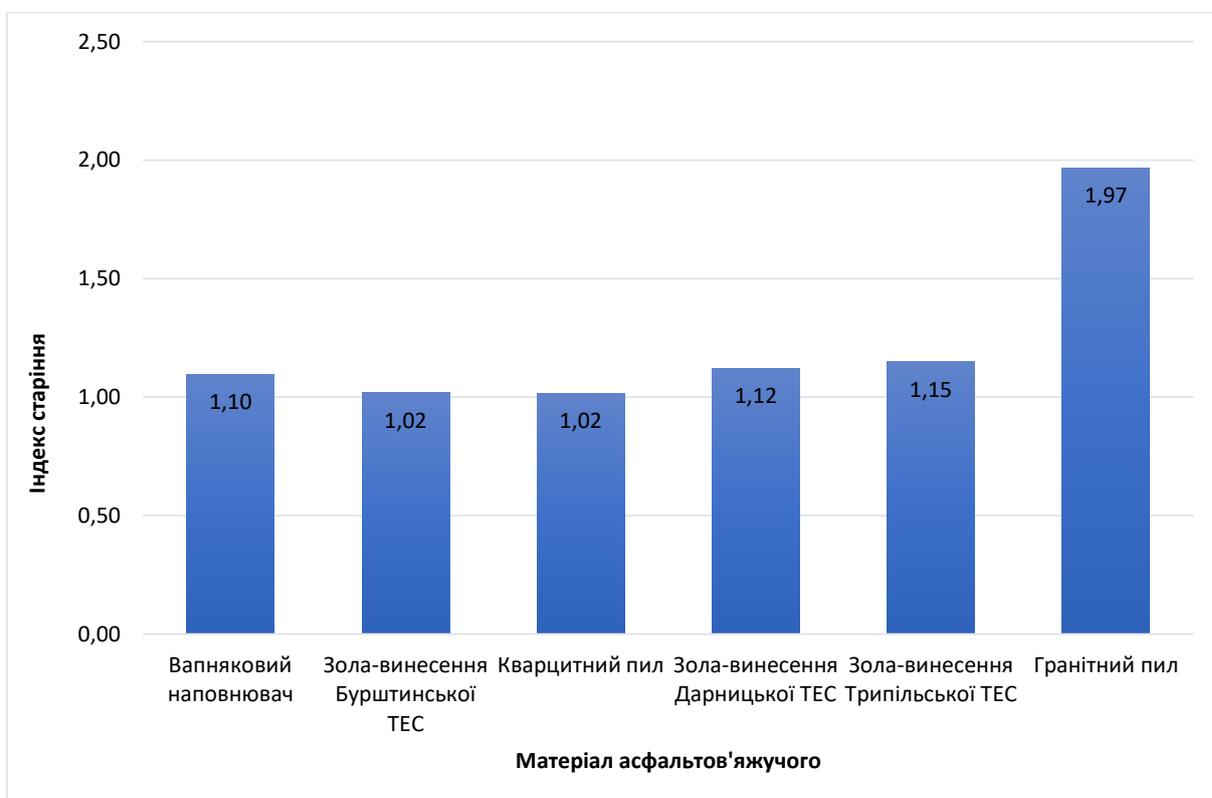


Рисунок 2.9 – Індекс старіння за температури 180 °С залежно від матеріалу асфальтов'язучого

Це може вказувати на те, що зола-винесення, як матеріал є придатним для будівництва асфальтобетонних шарів дорожнього одягу. Помірні значення індексу старіння асфальтов'язучого із золою-винесення свідчать про те, що матеріал зберігає свої властивості на прийнятному рівні під час експлуатаційного старіння, що робить його ефективним для використання у конструкціях дорожнього покриття.

2.7 Розроблення коефіцієнта якості наповнювача та критерію придатності золи-винесення як наповнювача асфальтобетонних сумішей

Мета роботи полягає у розробленні теоретично та експериментально обґрунтованих критеріїв застосування золи-винесення при виробництві асфальтобетонних сумішей. Кінцевим результатом роботи є обґрунтоване застосування асфальтобетонних сумішей із золою-винесення в дорожньому будівництві, тобто їх широке застосування. Усі роботи і вимоги до фізико-механічних характеристик будівельних матеріалів і виробів, конструкцій тощо у будівництві і в дорожній галузі, зокрема, регламентовані державними будівельними нормами, нормативними і технічними документами. Тобто потрібні критерії, за допомогою яких можна однозначно встановити придатність любого наповнювача для використання їх в асфальтобетонній суміші, при цьому отриманий із неї асфальтобетон повинен відповідати вимогам державних стандартів [5].

З метою розроблення і обґрунтування критеріїв придатності застосування золи-винесення при виробництві асфальтобетонних сумішей у дисертаційній роботі було проведено теоретичний аналіз і узагальнення зокрема наукових праць [78–81] та велику кількість лабораторних досліджень і випробувань як самих наповнювачів (див. пункти 2.1–2.6), так і фізико-механічних властивостей асфальтобетону на їх основі (розділ 3).

У результаті зазначених досліджень розроблено коефіцієнт якості наповнювача (Кя). Суть цього коефіцієнта полягає в тому, що за його допомогою

можна оцінити якість наповнювача відповідно до вимог національних стандартів. А при порівнянні декількох матеріалів і встановленні, який із наповнювачів кращий для конкретного матеріалу і складових асфальтобетонної суміші є його максимальне значення.

Під час проєктування складу асфальтобетонної суміші, встановленні необхідної кількості мінерального порошку і бітуму, визначенні фізико-механічних характеристик асфальтобетону використовують низку показників, які характеризують властивості асфальтобетону або взаємодію матеріалів. Зокрема, це показники: пористість, набрякання, бітумоемність, структурувальна здатність, які визначають згідно з ДСТУ 8772 [83].

З метою використання цих показників, приведемо їх величини у неявну форму і назвемо відповідно: $K_{\text{пор}}$ – коефіцієнт за пористістю; $K_{\text{біт}}$ – коефіцієнт бітумоемності; $K_{\text{наб}}$ – коефіцієнт набрякання; $K_{\text{стр}}$ – коефіцієнт структурувальної здатності.

Коефіцієнти K за пористістю, набрякання, бітумоемності визначають за формулою:

$$K = \frac{|x-u|}{u}, \quad (2.3)$$

де x – фактичний показник вибраного значення пористості, набрякання або бітумоемності;

u – верхня межа показника пористості, набрякання або бітумоемності.

Данна формула приймається тільки в тому випадку, коли не встановлено нижньої межі показника.

Коефіцієнт структурувальної здатності обчислюють за формулами: середнє арифметичне значення меж

$$a = b + \frac{1}{2}(u - b), u \geq b, b \geq 0, \quad (2.4)$$

показник структурувальної здатності

$$K_{\text{стр}} = \frac{a-|x-a|}{a}, x \geq 0, \quad (2.5)$$

де a – верхня межа показника структурувальної здатності;
 b – нижня межа показника структурувальної здатності;
 x – фактичне значення показника структурувальної здатності.

Середнє арифметичне значення запропонованих чотирьох коефіцієнтів і буде коефіцієнтом якості наповнювача $K_{\text{я}}$, який буде відповідати всім вимогам національних стандартів:

$$K_{\text{я}} = \frac{K_{\text{пор}} + K_{\text{біт}} + K_{\text{наб}} + K_{\text{стр}}}{4} \Rightarrow \text{max}, \quad (2.6)$$

де $K_{\text{пор}}$ – коефіцієнт за пористістю;
 $K_{\text{біт}}$ – коефіцієнт бітумоємності;
 $K_{\text{наб}}$ – коефіцієнт набрякання;
 $K_{\text{стр}}$ – коефіцієнт структурувальної здатності.

За допомогою розроблених залежностей (2.3) – (2.6) можемо встановити коефіцієнт якості наповнювача $K_{\text{я}}$, що дає змогу оцінити данні матеріали та провести їх аналіз. У таблиці 2.15 наведені результати лабораторних досліджень і розрахунків коефіцієнта якості

Відповідно до аналізу даних таблиці 2.15 і (2.6) можна стверджувати, що для кам'яних матеріалів, бітуму і відповідних наповнювачів, найкращим буде використання вапнякового мінерального порошку у якого $K_{\text{я}} = 0,54$, наступними є зола-винесення Бурштинської ТЕС і кварцитний пил. Використання золи-винесення Дарницької ТЕС і золи з гідровідвалу для приготування асфальтобетонної суміші залишається під питанням.

Таблиця 2.15 – Значення коефіцієнта якості наповнювача

Матеріал	$K_{пор}$	$K_{біт}$	$K_{наб}$	$K_{стр}$	$K_{я}$
Вапняковий МП	0,150	0,33	0,84	0,84	0,54
Зола-винесення Бурштинської ТЕС	0,050	0,44	0,50	0,89	0,47
Зола-винесення Дарницької ТЕС	0,005	0,38	0,25	0,86	0,38
Зола-винесення Трипільської ТЕС	0,080	0,40	0,33	0,9	0,42
Кварцитний пил	0,008	0,20	0,90	0,78	0,47
Гранітний пил	0,010	0,06	0,90	0,83	0,45
Зола з гідровідвалу	0,000	0,01	0,08	0,73	0,21

Так як вапняковий наповнювач є стандартним мінеральним порошком, з метою прийняття однозначного рішення щодо придатності наповнювача, у дисертаційні роботі розроблено критерій придатності золи-винесення як наповнювача асфальтобетонних сумішей, КТР_{пя}:

$$КТР_{пя} = \frac{КТР_{б} + КТР_{пор}}{КТР_{ст} + КТР_{дг}}, \quad (2.7)$$

де $КТР_{б}$ – критерій бітумоємності який розраховується за формулою $B'_{іт}/B_{іт}$, $B'_{іт}$ – це бітумоємність порівнюваного наповнювача, $B_{іт}$ – бітумоємність стандартного вапнякового наповнювача;

$КТР_{пор}$ – критерій показника пористості, розраховується за наступною формулою $КТР_{пор} = Пор'/Пор$, де $Пор'$ – показник пористості порівнюваного наповнювача, $Пор$ – показник пористості стандартного вапнякового наповнювача;

$КТР_{ст}$ – критерій показника структурувальної здатності, який визначається за формулою $КТР_{ст} = Ст'/Ст$, де $Ст'$ – показник структурувальної здатності порівнюваного наповнювача, $Ст$ – показник структурувальної здатності стандартного вапнякового наповнювача;

$КТР_{дг}$ – критерій показника дійсної густини, який визначається за формулою $КТР_{дг} = \rho'/\rho$, де ρ' – показник дійсної густини порівнюваного наповнювача,

ρ – показник дійсної густини стандартного вапнякового наповнювача.

На основі розрахунків і аналізу результатів лабораторних досліджень фізико-механічних показників асфальтобетону встановлено межі критерію:

$$0,90 \leq K_{\text{пя}} \leq 1,10. \quad (2.8)$$

Встановлено, якщо значення критерію варіюється в межах (2.8), то слід вважати, що досліджуваний наповнювач наближається до стандартного вапнякового мінерального порошку тобто він може бути використаним при виготовленні асфальтобетонної суміші, якщо $KTR_{\text{пя}}$ виходить за дані рамки, то даний наповнювач слід вважати не ефективним, тобто фізико-механічні показники дослідного наповнювача кардинально відрізняються від стандартного, що зможе призвести до погіршення фізико-механічних властивостей асфальтобетону.

Використавши ті ж результати лабораторних досліджень, що і для розрахунку коефіцієнта якості наповнювача, отримаємо значення критерію придатності золи-винесення як наповнювача асфальтобетонних сумішей (табл. 2.16).

Відповідно до аналізу даних таблиці 2.16 і (2.8) можна уточнити дані, таблиці 2.15 і стверджувати, що тільки зола з гідровідвалу не придатна для приготування асфальтобетонної суміші.

Таблиця 2.16 – Значення критерію придатності золи-винесення як наповнювача асфальтобетонних сумішей

Матеріал	$KTR_{\text{пор}}$	$KTR_{\text{б}}$	$KTR_{\text{дг}}$	$KTR_{\text{ст}}$	$KTR_{\text{пя}}$
Вапняковий МП	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Зола-винесення Бурштинської ТЕС	1,10	0,84	0,99	1,08	0,94
Зола-винесення Дарницької ТЕС	1,10	0,93	0,98	1,04	1,00
Зола-винесення Трипільської ТЕС	1,07	0,89	0,98	1,08	0,95
Кварцитний пил	1,07	1,10	1,10	0,95	1,10
Гранітний пил	1,10	1,40	1,01	1,00	1,20
Зола з гідровідвалу	1,10	1,50	0,96	0,88	1,40

2.8 Розроблення математичної моделі оптимізації підбору зернового складу асфальтобетонної суміші

Композиція зернового складу мінеральної частини асфальтобетонної суміші суттєво впливає на властивості дорожнього асфальтобетону, а саме на його міцність, шорсткість, довговічність, стійкість, надійність, якість тощо, особливо при застосуванні вторинних відходів промисловості. Підбір зернового складу асфальтобетонної суміші (далі – АС) передбачає розрахунок таких його параметрів, які, у тому числі, задовольняють вимогам табл. 6 і табл. 7 [5].

Вибір складу заповнювача та вмісту в'язучого АС, яка відповідає вимогам специфікації, є тривалою процедурою спроб і помилок, а успіх у проектуванні АС значною мірою залежить від досвіду проектувальника. Подоланню цього утруднення може сприяти розроблення та впровадження комп'ютерних програм проектування оптимальних параметрів АС для отримання бажаних їх властивостей та управління ними.

З метою оптимізації відсоткового складу мінеральної частини гарячої асфальтобетонної суміші у відповідності до технічних вимог національного стандарту була розроблена математична модель.

В основу розробленої математичної моделі покладені алгоритми нелінійної оптимізації з використанням методу узагальненого зведеного градієнта (generalized reduced gradient method, далі – GRG) [82]. GRG – це алгоритми для розв'язування нелінійних задач загальної структури.

Основні ідеї GRG полягають у тому, що нелінійна задача, яку потрібно розв'язати, має вигляд:

$$\text{мінімізувати } f(X) \quad (2.9)$$

$$\text{за умови, що } g_i(X) = 0, i = 1, \dots, m, \quad (2.10)$$

$$l_i \leq X_i \leq u_i, i = 1, \dots, n, \quad (2.11)$$

де X – n -вектор, а u_i та l_i – верхня та нижня границі $u_i > l_i$.

Вважається, що $m < n$, оскільки в більшості випадків $m \geq n$ означає нездійсненну задачу або задачу з єдиним розв'язком, Форма (2.9) – (2.11) є повністю генерованою, оскільки нерівності граничних умов завжди можна перетворити на рівності виду (2.10) додаванням так званих слабких змінних. Вектор X містить як компоненти «природні» змінні задачі, так і ці слабкі змінні.

Фундаментальна ідея GRG полягає у використанні рівностей (2.10) для вираження m змінних, які називаються базисними, через решту $n - m$ небазисних змінних. Так само працює симплекс–метод лінійного програмування. Нехай \bar{X} – допустима точка в області рішень, а y – вектор базисних змінних, x – вектор небазисних змінних в точці \bar{X} , так що X розбивається на множину \bar{X} як:

$$X = (y, x), \bar{X} = (\bar{y}, \bar{x}) \quad (2.12)$$

і рівності (2.11) можна записати у вигляді

$$g(y, x) = 0, \quad (2.13)$$

де

$$g = (g_1, \dots, g_m). \quad (2.14)$$

Припускають, що цільова функція f та функції обмежень g_i є диференційованими. Тоді, за неявною теоремою про функції (загальна назва для теорем, що гарантують локальне існування і описують властивості неявної функції), для того, щоб рівняння (2.13) мали розв'язок $y(x)$ для всіх x в деякому околі \bar{x} , достатньо, щоб матриця $m \times m$ базисної матриці $\partial g / \partial y$, оціненої в \bar{X} , була несингулярною (неособливою). Якщо це так, тоді ціль може бути виражена як функція тільки від x : Якщо це так, тоді ціль може бути виражена як функція тільки від x :

$$F(x) = f(y(x), x) \quad (2.15)$$

і нелінійну програму перетворюють, принаймні для x , близького до \bar{x} , до зведеної задачі лише з верхньою та нижньою межами:

$$\text{мінімізувати } F(x) \quad (2.16)$$

за умови

$$l_{NB} \leq x \leq u_{NB}, \quad (2.17)$$

де l_{NB} та u_{NB} – нижній та верхній вектори обмежень для x .

За допомогою методу узагальненого зведеного градієнта розв'яжемо вихідну задачу (2.9) – (2.11) шляхом розв'язування послідовності задач виду (2.16) – (2.17). Ці задачі розв'яжемо простими модифікаціями алгоритмів необмеженої мінімізації.

Для того, щоб зведена задача (2.16) – (2.17) давала релевантні результати, необхідно, щоб x вільно змінювався відносно поточної точки \bar{x} .

Ураховуючи граничні умови (2.17) можна легко переміщувати x у напрямках, які їх задовольняють.

Щоб задовільнити граничні умови на основні змінні, потрібно врахувати, що деякі компоненти y^- знаходяться на їхніх межах, тому навіть незначна зміна x від \bar{x} може призвести до порушення граничних умов.

З метою забезпечення існування функції $y(x)$, припускаємо, що виконується умова про невиродженість.

У будь-якій точці X , яка задовольняє (2.10) – (2.11), існує розбиття X на m базисних змінних y та $n-m$ небазисних змінних x таке, що

$$l_B < y < u_B, \quad (2.18)$$

де l_B та u_B – вектор обмежень на y та

$$B = dg/dy \text{ є несингулярною.} \quad (2.19)$$

Починаючи з допустимої точки \bar{X} з базисними змінними y та небазисними змінними x , пробують розв'язати зведену задачу (2.16) – (2.17). Згідно з (2.15), щоб оцінити цільову функцію $F(x)$, ми повинні знати значення основних змінних $y(x)$. Звичайно, за винятком лінійних та деяких нелінійних випадків, функція $y(x)$ не може бути визначена в замкненому вигляді. Однак $y(x)$ можна обчислити для будь-якого значення x за допомогою ітераційного методу, який розв'язує рівності (2.13). Отже, процедура розв'язування зведеної задачі, починаючи з $X_0 \equiv \bar{X}$, включає наступні кроки:

0) покладемо $i = 0$;

1) підставимо x_i в (5) і визначимо відповідні значення для y , y_i ітераційним методом розв'язання нелінійних рівнянь;

2) визначимо напрямок руху d_i для небазисних змінних x ;

3) виберемо крок α_i таким чином, щоб

$$x_{i+1} = x_i + \alpha_i d_i.$$

Часто це робиться шляхом розв'язання одновимірної задачі пошуку

$$\text{мінімізувати } F(x_i + \alpha_i d_i)$$

з обмеженням α_i таким, що $x_i + \alpha_i d_i$ задовольняє обмеженням на x . Цей одновимірний пошук вимагатиме повторного застосування кроку 1) для оцінки F при різних значеннях α ;

4) перевіряємо поточну точку $X_i = (y_i, x_i)$ на оптимальність. Якщо не оптимальна, покладемо $i = i + 1$ і повернемося до кроку 1).

Згідно Додатку Б ДСТУ Б В.2.7–119 [5], п. Б.1 на основі визначеного зернового складу, передбаченого для застосування мінеральних матеріалів, встановлюють таке співвідношення між компонентами, щоб гранулометричний склад відповідав значенням вимог таблиць 6 цього стандарту для призначеного складу асфальтобетонної суміші (*орієнтовно наближаючись до їх середніх значень*).

Для конкретизації математичної моделі задачі вибору оптимальної композиції зернового складу мінеральної частини гарячих асфальтобетонних сумішей (далі – АСГ) позначимо змінні:

x_1 – щебінь фракції 20–40, відсотків за масою;

x_2 – щебінь фракції 10–20, відсотків за масою;

x_3 – щебінь фракції 5–10, відсотків за масою;

x_4 – пісок, відсотків за масою;

x_5 – порошок мінеральний, відсотків за масою.

Прийmemo, що $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \in [0, 100]$ і є дійсними числами.

Граничні умови:

$$\sum_{i=1}^{i=5} x_i = 100 \%, \quad (2.20)$$

$$x_i \geq x_i^{\min \overline{1, \dots, 5}} \quad (2.21)$$

$$x_i \leq x_i^{\max \overline{1, \dots, 5}} \quad (2.22)$$

де $x_i^{\min \overline{1, \dots, 5}}$ та $x_i^{\max \overline{1, \dots, 5}}$ нижня та верхня границі відсотка i -ї складової суміші.

Цільова функція:

$$F(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = \sqrt[2]{\sum_{j=1}^{j=N} [\sum_{i=1}^{i=5} s_{ji} - (l_j + \frac{u_j - l_j}{2})]^2} \Rightarrow \min, \quad (2.23)$$

$$u_j > l_j, j = \overline{1, \dots, N}, \quad (2.24)$$

де N – кількість сит;

s_{ji} – % проходження i -го компонента через j -те сито;

u_j – верхня межа % проходження допустимої області суміші на j -му ситі;

l_j – нижня межа % проходження допустимої області суміші на j -му ситі.

Таким чином, значенням цільової функції є корінь квадратний із суми квадратів відхилень графіку шуканої лінії досліджуваної суміші від графіку середньої лінії суміші $l_j + (u_j - l_j)/2$, яку вважаємо лінією максимальної щільності.

Критерієм оптимальності є мінімальне значення цільової функції (2.23).

У додатку А наведено приклад реалізації математичної моделі.

Висновки до розділу 2

1. Мінеральний порошок є активною структуроутворюючою складовою асфальтобетонів і забезпечує високу сорбційну й енергетичну активність поверхні до органічного в'язучого. Це обумовлено високою питомою поверхнею, хімічним і мінералогічним складом, кількістю активних центрів на поверхні мінерального порошку, мікрорельєфом і чистотою поверхні.

2. Визначено узагальнені передумови найбільш вагомих параметрів, які впливають на використання золи-винесення як наповнювача в асфальтобетоні. Такі як хімічний та оксидний склад, які можуть впливати на адсорбційні процеси у системі асфальтов'язучого.

3. Визначено структурувальну здатність золи-винесення та встановлено індекс пластичності асфальтов'язучого на її основі за різних технологічних та експлуатаційних температур. Ці дослідження засвідчили можливість використання в дорожньому будівництві даного матеріалу та не великий діапазон розходжень результатів випробувань золи-винесення різного походження.

4. Встановлено адгезійну активність золи-винесення з бітумом. Для оцінки зчеплення мінерального матеріалу та бітуму було визначено показники зчеплення методом визначення довготривалого водонасичення. Проаналізувавши результати водостійкості зразків із суміші наповнювача та бітуму, можна оцінити адгезію бітуму до мінерального порошку за зміною коефіцієнта водостійкості. Розбіжність результатів випробувань золи-винесення та вапнякового наповнювача знаходяться в межах похибки, що свідчить про можливість використання золи-винесення як наповнювача в асфальтобетоні.

5. Встановлено стійкість асфальтов'язучого до технологічного старіння. За результатами досліджень впливу технологічного старіння на асфальтов'язучу речовину можемо стверджувати, що показники індексу старіння, асфальтов'язучого із золю-винесення є проміжними між вапняковим

мінеральним порошком та гранітним пилом та наближаються до асфальтов'язучого з вапняковим мінеральним порошком.

6. На основі теоретичного аналізу, узагальнення наукових праць і виконаних експериментальних досліджень було розроблено коефіцієнт якості наповнювача та критерій придатності золи-винесення як наповнювача асфальтобетонних сумішей. Ці показники дозволяють швидко визначити придатність наповнювачів різного походження і мінерального складу, не тільки золи-винесення, для подальшого їх використання при приготуванні асфальтобетонної суміші.

7. Розроблена математична модель оптимізації підбору зернового складу асфальтобетонної суміші, яка дозволяє вийти на найщільнішу можливу градацію зернового складу мінеральної частини асфальтобетонної суміші – максимальну градацію щільності або криву максимальної щільності Фуллера (W.B. Fuller).

Результати досліджень розділу викладено у наступних публікаціях: [22, 53, 69, 70].

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АСФАЛЬТОБЕТОНУ ІЗ ЗОЛОЮ-ВИНЕСЕННЯ ДЛЯ УЛАШТУВАННЯ ШАРІВ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ

3.1 Дослідження наповнювачів різного походження

3.1.1 Методи випробування наповнювача (мінерального порошку)

Дисертаційне дослідження направлене на практичну реалізацію його результатів, тобто методи випробувань і отримані значення повинні відповідати чинним нормативним документам.

Зерновий склад визначали згідно з пунктом 4.2 ДСТУ 8772 [83]. Дане випробування полягає в розділенні матеріалу на фракції за крупністю, використовуючи набір різних сит в порядку зменшення розмірів їх отворів. За результатами випробування встановлювали відповідність зернового складу вимогам таблиці 5 ДСТУ Б В.2.7–121 [6].

Дійсну густину визначали згідно з пунктом 4.3 ДСТУ 8772 [83]. Дане випробування полягає у встановленні густини матеріалу в одиниці об'єму без урахування пор, що містить цей матеріал.

Середню густину визначали згідно з пунктом 4.4 ДСТУ 8772 [83]. Дане випробування полягає у визначенні густини мінерального порошку після ущільнення його у формі об'ємом 100 см^3 під навантаженням 40 МПа (400 кгс/см^2).

Пористість при ущільненні 40 МПа визначали згідно з пунктом 4.5 ДСТУ 8772 [83]. Дане випробування полягає у визначенні пористості, яку розраховують на основі попередньо встановлених показників дійсної густини та середньої густини зразків мінерального порошку, що сформовані при ущільнюючому навантаженні 40 МПа.

Набрякання зразків із суміші мінерального порошку з бітумом визначали згідно з пунктом 4.6 ДСТУ 8772 [83]. Дане випробування полягає у визначенні приросту об'єму зразка із суміші мінерального порошку з бітумом після насичення його водою.

Структурувальна здатність визначали згідно з пунктом 4.9 ДСТУ 8772 [83]. Дане випробування полягає у визначенні зростання температури розм'якшеності бітуму після його змішування з мінеральним порошком. Додатково структурувальну здатність визначали за зміною динамічної в'язкості та температури крихкості бітуму.

Вплив типу мінерального порошку на старіння асфальтов'язучого визначали за зміною його температури розм'якшеності, температури крихкості та динамічної в'язкості після випробування згідно з ДСТУ EN 12607–2 [84]. Дане випробування полягає у витримуванні асфальтов'язучого у тонкій плівці за температури 163 °С впродовж 5,0 год, наступному визначенні властивостей асфальтов'язучого та оцінюванні їх зміни.

3.1.2 Результати випробування наповнювачів

Результати випробування наповнювачів наведено в таблиці 3.1.

Результати випробування показали, що за зерновим складом досліджуваний вапняковий мінеральний порошок, зола-винесення Бурштинської ТЕС, зола-винесення Дарницької ТЕС та зола-винесення Трипільської ТЕС відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.7–121 [6] відповідно до неактивованого мінерального порошку марки І (рисунок 3.1). При цьому, через сито з розміром отворів 0,071 мм проходить 87,6 % вапнякового мінерального порошку, 86,3 % золи-винесення Бурштинської ТЕС, 85,7 % золи-винесення Дарницької ТЕС та 83,1 % золи-винесення Трипільської ТЕС.

Найбільша дійсна густина характерна для мінерального порошку і становить 2,63 г/см³, найменша — у золи-винесення Дарницької ТЕС (рисунок 3.2).

Таблиця 3.1 – Результати випробування наповнювачів

Ч.ч.	Найменування показників, одиниця вимірювання	Вимоги ДСТУ Б В.2.7–121	Результати випробування			
			Вапнякового МП	Золи-винесення Бурштинської ТЕС	Золи-винесення Дарницької ТЕС	Золи-винесення Трипільської ТЕС
1	Зерновий склад — вміст часток, відсоток за масою:					
	— дрібніше ніж 0,071 мм	80, не менше	87,6	86,3	85,7	83,1
	— дрібніше ніж 0,315 мм	90, не менше	99,7	99,8	99,9	99,9
	— дрібніше ніж 1,25 мм	100, не менше	100	100	100	100
2	Дійсна густина, г/см ³	–	2,63	2,61	2,59	2,60
3	Середня густина, г/см ³	–	1,85	1,78	1,73	1,78
4	Пористість у разі ущільнення 40 МПа, відсоток за об'ємом	35, не більше	29,7	33,2	34,8	31,8
5	Набрякання зразків із суміші порошку з бітумом, відсоток за об'ємом	2,5, не більше	0,4	1,2	1,8	1,6
6	Структурувальна здатність, °С	від 10 до 20 включно	12,4	13,4	12,9	13,5
7	Бітумоємність, г		49	41,3	45,8	43,8

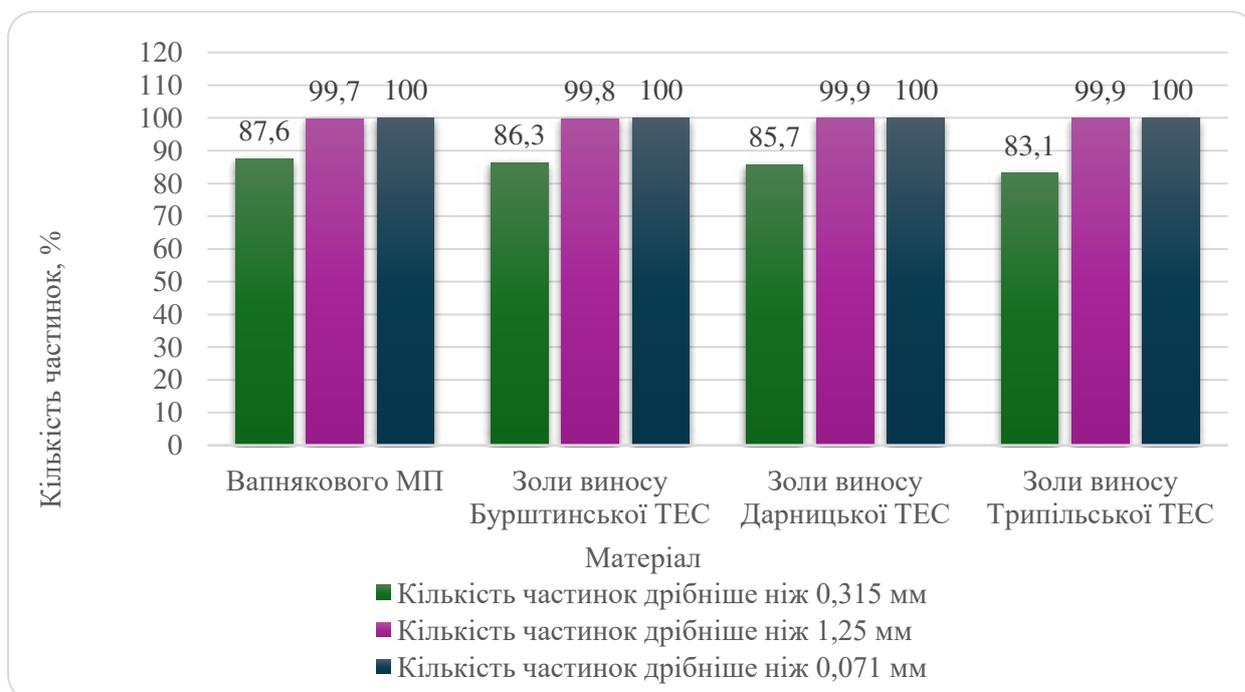


Рисунок 3.1 – Результати визначення зернового складу досліджуваних матеріалів

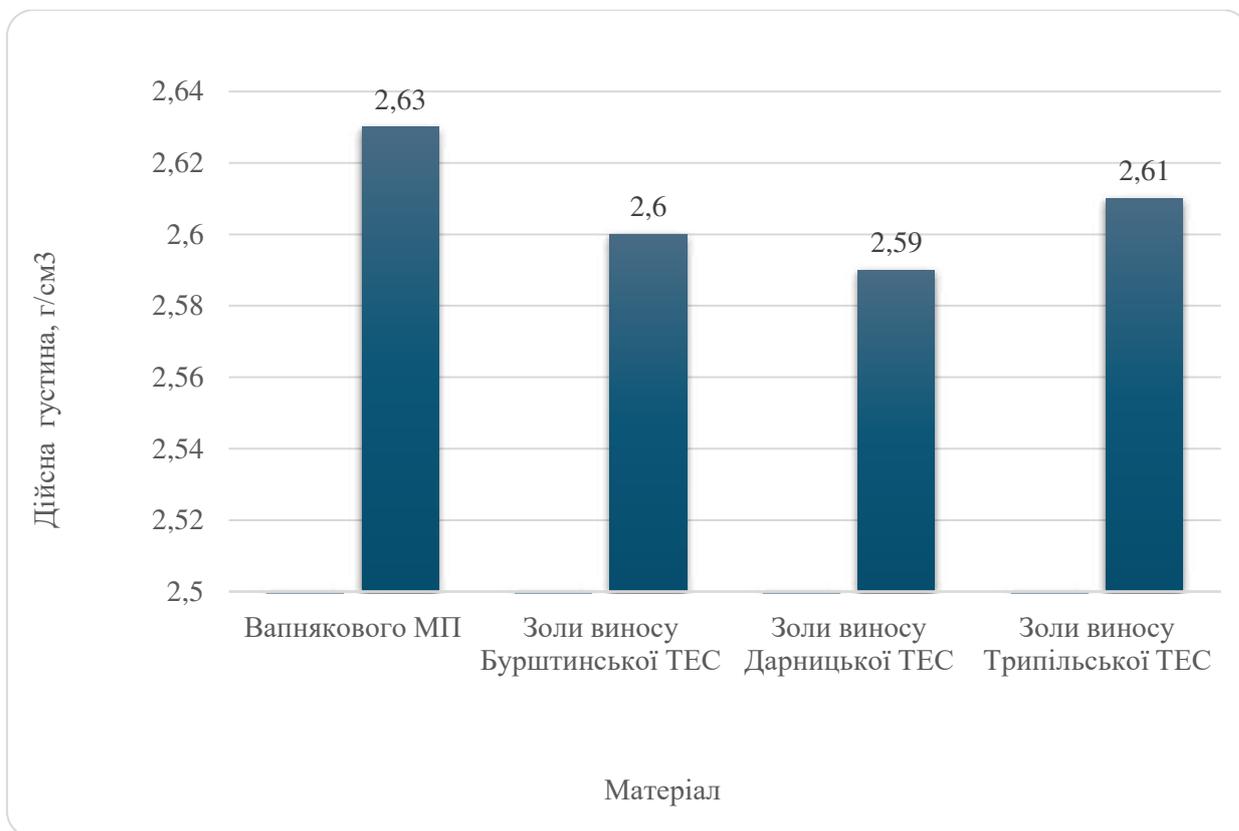


Рисунок 3.2 – Результати визначення дійсної густини досліджуваних матеріалів

Найбільша середня густина також характерна для вапнякового мінерального порошку і становить $1,85 \text{ г/см}^3$, найменша — для золи-винесення Дарницької ТЕС (рисунок 3.3). Середня густина зола-винесення Бурштинської ТЕС та зола-винесення Трипільської ТЕС становить $1,78 \text{ г/см}^3$ та наближається до середньої густини вапнякового мінерального порошку.

Суттєві відмінності в значеннях середньої та дійсної густини досліджуваних матеріалів відображається на їх пористості при ущільненні 40 МПа (рисунок 3.4).

Пористість, разом з вивченими фізико-механічними характеристиками золи-винесення, має вирішальне значення в процесах взаємодії з бітумом і суттєво впливає на його споживання. Пористість золи-винесення є близькою до максимального нормованого значення, але всі матеріали знаходяться в нормативних мажах.

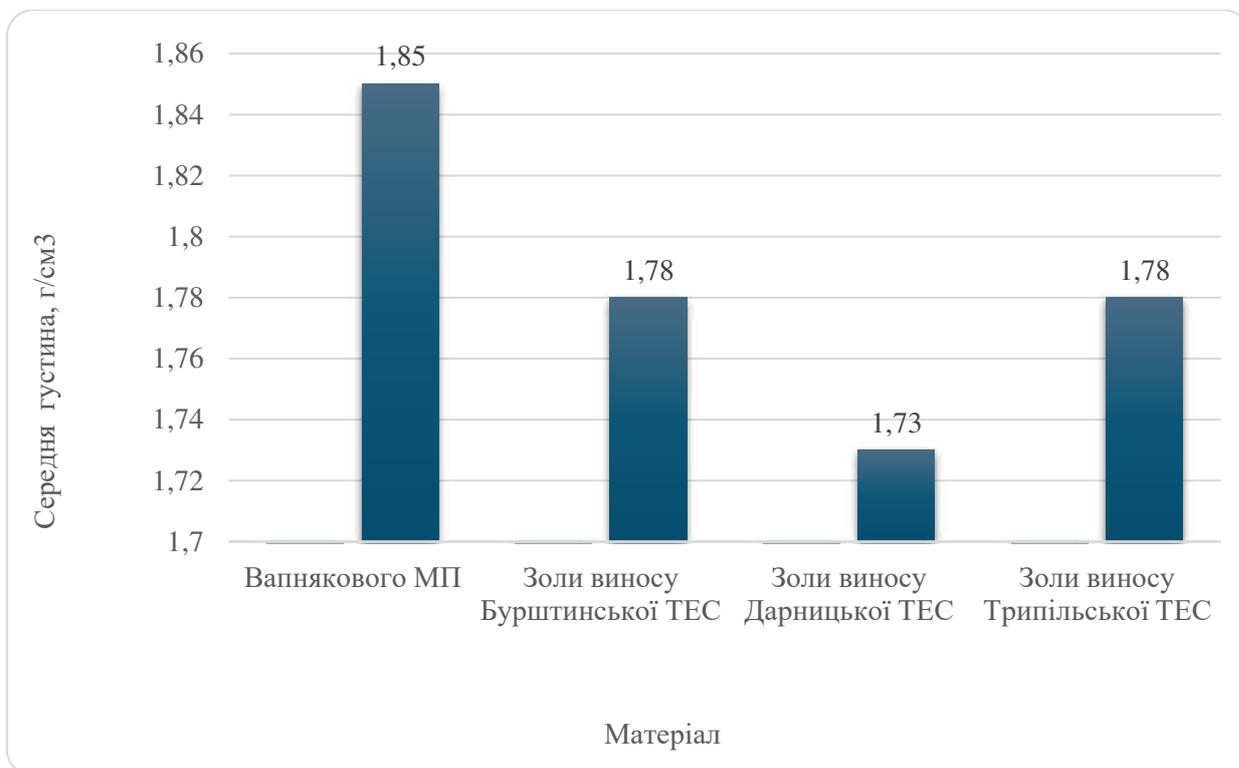


Рисунок 3.3 – Результати визначення середньої густини досліджуваних матеріалів

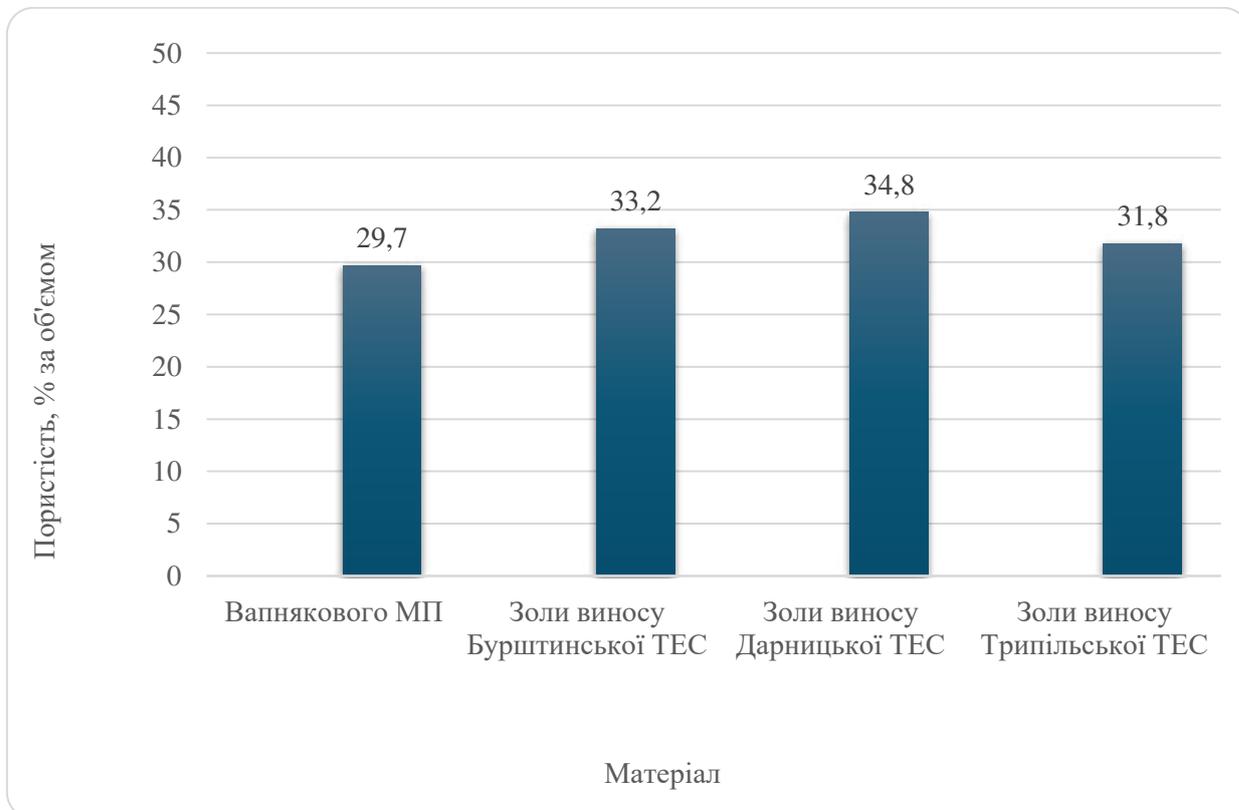


Рисунок 3.4 – Результати визначення пористості досліджуваних матеріалів

Найбільш вид наповнювача впливає на набрякання зразків із суміші порошку з бітумом (рисунок 3.5). Якщо набрякання для вапнякового мінерального порошку становить всього 0,4 % за об'ємом, то для золи-винесення Бурштинської ТЕС цей показник становить 1,2 % за об'ємом, а золи-винесення Дарницької ТЕС та золи-винесення Трипільської ТЕС відповідно 1,8 % за об'ємом та 1,6 % за об'ємом. Тобто показник набрякання золи винесення знаходиться в межах норми.

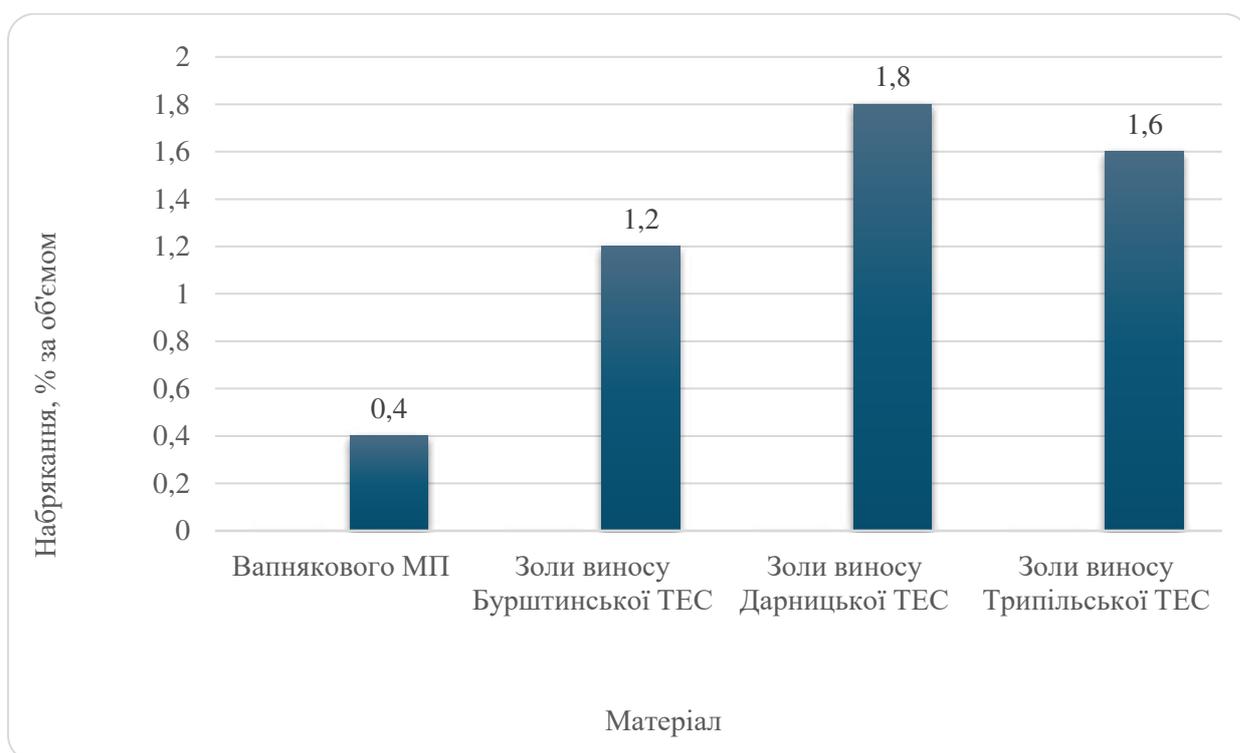


Рисунок 3.5 – Результати визначення набрякання зразків суміші досліджуваних матеріалів з бітумом

Найбільшою структурувальною здатністю, що характеризується приростом температури розм'якшеності бітуму під час змішування його із наповнювачем, відзначається зола-винесення Трипільської ТЕС та зола-винесення Бурштинської ТЕС (рисунок 3.6), а інші досліджувані матеріали мають на 1 °С нижчу структурувальну здатність. При цьому, найнижча структурувальна здатність зафіксована для вапнякового мінерального порошку.

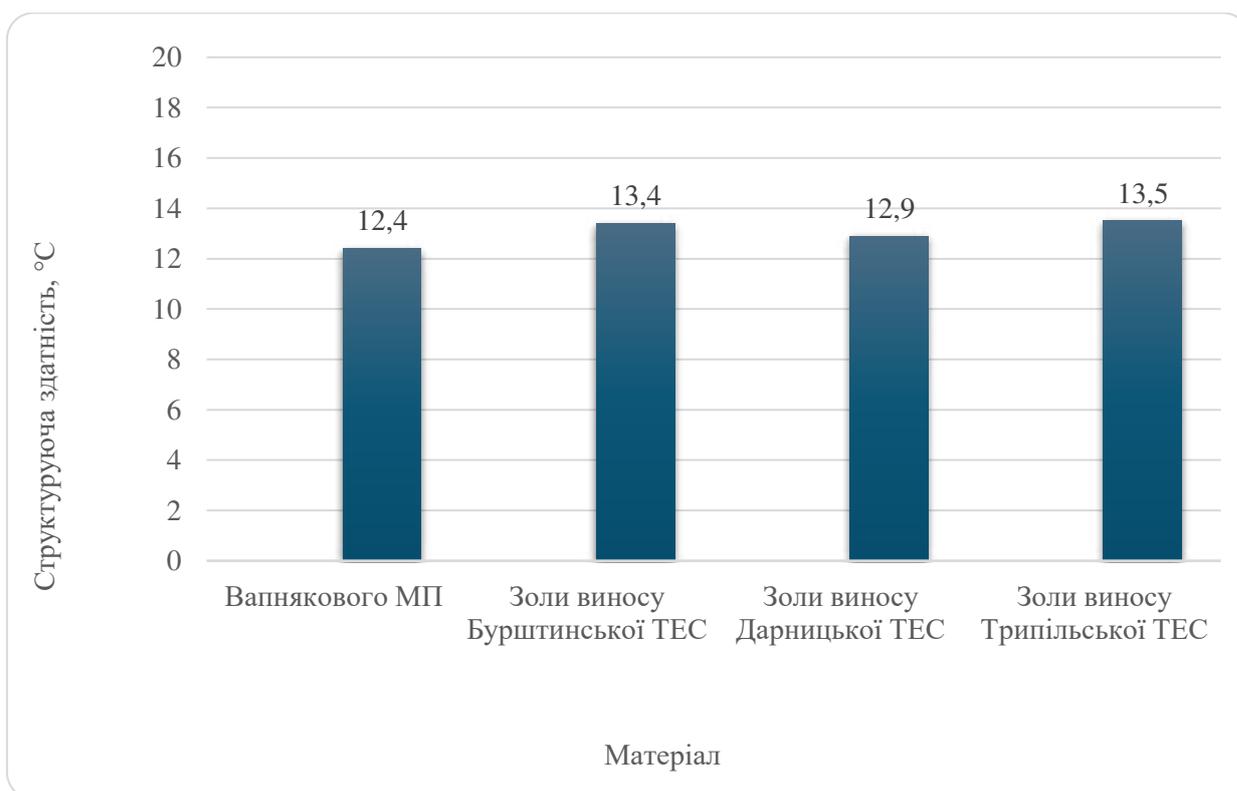


Рисунок 3.6 – Результати визначення структуровальної здатності досліджуваних матеріалів

Таким чином встановлено, що дані матеріали за всіма визначеними показниками відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.7–121 [6] відповідно до неактивованого мінерального порошку марки І.

Оскільки одним із призначень мінерального порошку є структурування бітуму, то значну увагу під час дослідження альтернативної сировини доцільно приділяти структуровальній здатності отриманого мінерального порошку, оскільки недостатня структуровальна здатність мінерального порошку може стати причиною утворення пластичних деформацій, а надто велика структуровальна здатність – причиною зростання жорсткості асфальтобетону та зниження його низькотемпературної тріщиностійкості.

3.2 Визначення впливу наповнювачів на атмосферостійкість асфальтобетону

Водостійкість та морозостійкість асфальтобетону багато в чому залежать від властивостей бітуму, а також характеру його взаємодії з наповнювачем. Важливо враховувати, що стандартні методики не завжди висвітлюють повний спектр взаємодій бітуму з наповнювачем в асфальтобетоні.

Тому для більш досконалого вивчення впливу золи-винесення на властивості асфальтобетону було взято за основу метод, описаний в додатку А ДСТУ EN 1744–4 [85]. Цей метод дозволяє більш детально дослідити взаємодію асфальтов'язучої речовини з заповнювачем, зокрема із золою-винесення.

Зерновий склад, який описаний в цьому методі, є найбільш чутливим до зміни наповнювача. Такий підхід дозволяє більш точно визначити вплив зміни наповнювача на фізико-механічні властивості асфальтобетону.

Методи випробування асфальтобетону, використані для оцінки його характеристик, були взяті з ДСТУ Б В.2.7–319 [76]. Ці методи дозволяють провести комплексне дослідження асфальтобетону з урахуванням різних фізико-механічних параметрів, які впливають на його якість і властивості.

3.2.1 Вихідні матеріали

Під час проведення досліджень використовували:

- бітум нафтовий дорожній, марки БНД 70/100, що відповідає вимогам ДСТУ 4044 [87];
- щебінь фракції 0,125 – 2,5 мм та 2,5 — 5,0 мм виробництва ТОВ «Малинський спецкар'єр», що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7–75 [3];
- пісок із відсівів подрібнення гірських порід виробництва ТОВ «Малинський спецкар'єр», що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7–210 [4];

– вапняковий мінеральний порошок виробництва ТОВ «Скала–подільський спецкар'єр», що відповідає вимогам ДСТУ Б В 2.7–121 [6], результати випробувань наведені в таблиці 3.1;

– зола-винесення виробництва Бурштинської ТЕС, що відповідає вимогам ДСТУ Б В 2.7–121 [6], результати випробувань наведені в таблиці 3.1;

– зола-винесення виробництва Дарницької ТЕС, що відповідає вимогам ДСТУ Б В 2.7–121 [6], результати випробувань наведені в таблиці 3.1;

– зола-винесення виробництва Трипільської ТЕС, що відповідає вимогам ДСТУ Б В 2.7–121 [6], результати випробувань наведені в таблиці 3.1;

Результати випробування основних вихідних матеріалів наведено в таблицях 3.2 – 3.4.

Таблиця 3.2 – Результати випробування бітуму марки БНД 70/100

Ч.ч.	Найменування показника, одиниця вимірювання	Результати випробування	Вимоги ДСТУ 4044
1	Пенетрація за температури 25 °С, 0,1 мм	78	від 70 до 100
2	Температура розм'якшеності за кільцем і кулею, °С	47	від 45 до 51
3	Температура крихкості, °С	мінус 23	не вище ніж мінус 13
4	Розтяжність за температури 25 °С, см	95	не менше ніж 60
5	Інтервал пластичності, °С	70	–
6	Зміна маси після прогрівання, % за масою	0,12	не більше ніж 0,9
7	Залишкова пенетрація, %	65	не більше ніж 59
8	Зміна температури розм'якшеності, °С	3,5	не більше ніж 6,0
9	Індекс пенетрації	мінус 0,91	від мінус 2,0 до 1,0

Таблиця 3.3 – Результати випробування дрібного заповнювача фракції 2,5–5 мм

Ч.ч.	Найменування показників	Фактичні значення показників
1	Очевидна густина зерен, г/см ³	2,691
2	Густина зерен, висушених у сушильній шафі, г/см ³	2,672
3	Густина насичених та поверхнево-осушених зерен, г/см ³	2,679
4	Водопоглинання, % за масою	0,27

Таблиця 3.4 – Результати випробування дрібного заповнювача фракції 0,125 – 2,5 мм

Ч.ч.	Найменування показників	Фактичні значення показників
1	Очевидна густина зерен, г/см ³	2,676
2	Густина зерен, висушених у сушильній шафі, г/см ³	2,652
3	Густина насичених та поверхнево–осушених зерен, г/см ³	2,661
4	Водопоглинання, % за масою	0,35

3.2.2 Результати дослідження впливу наповнювачів на атмосферостійкість асфальтобетонів

На основі визначеного зернового складу заповнювачів було встановлено таке співвідношення між компонентами, щоб зерновий склад суміші відповідав вимогам таблиці 7 ДСТУ Б В.2.7–119[5] для призначеного складу асфальтобетонної суміші.

Результати підбору зернового складу асфальтобетонних сумішей з використанням різних типів наповнювачів наведено на рисунках 3.7 – 3.10.

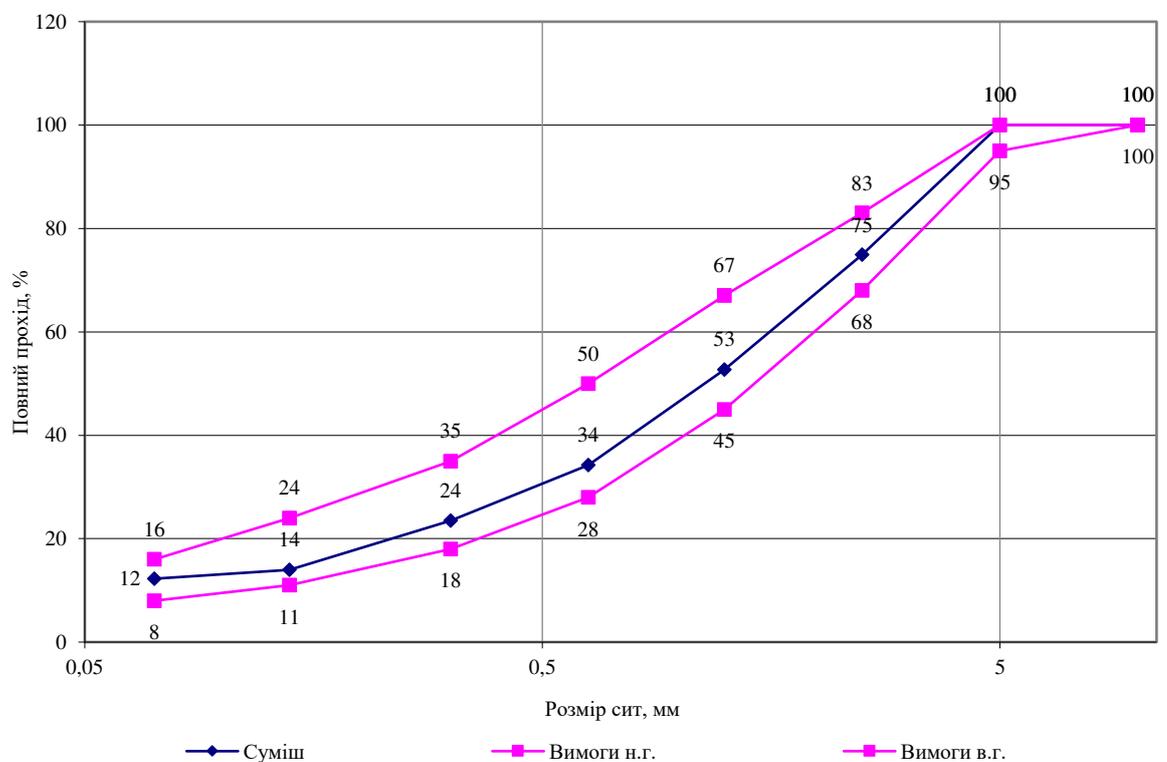


Рисунок 3.7 – Графічне зображення зернового складу асфальтобетонної суміші з наповнювачем із вапняку

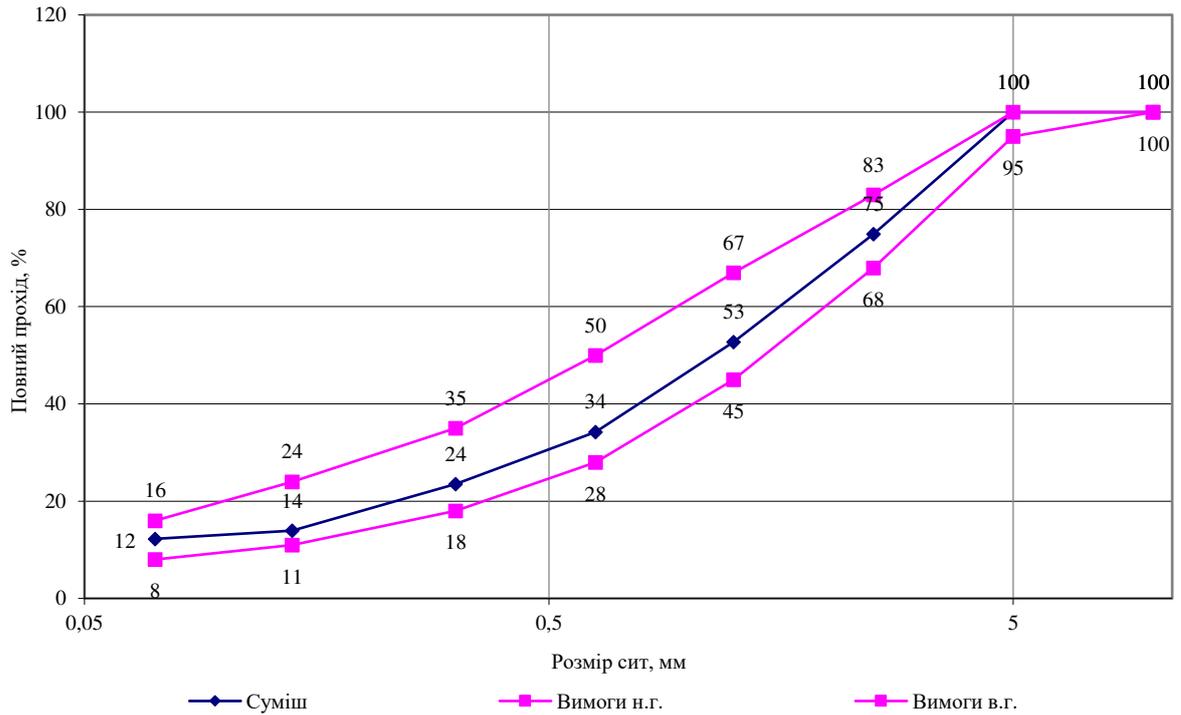


Рисунок 3.8 – Графічне зображення зернового складу асфальтобетонної суміші з наповнювачем із золи-винесення Бурштинської ТЕС

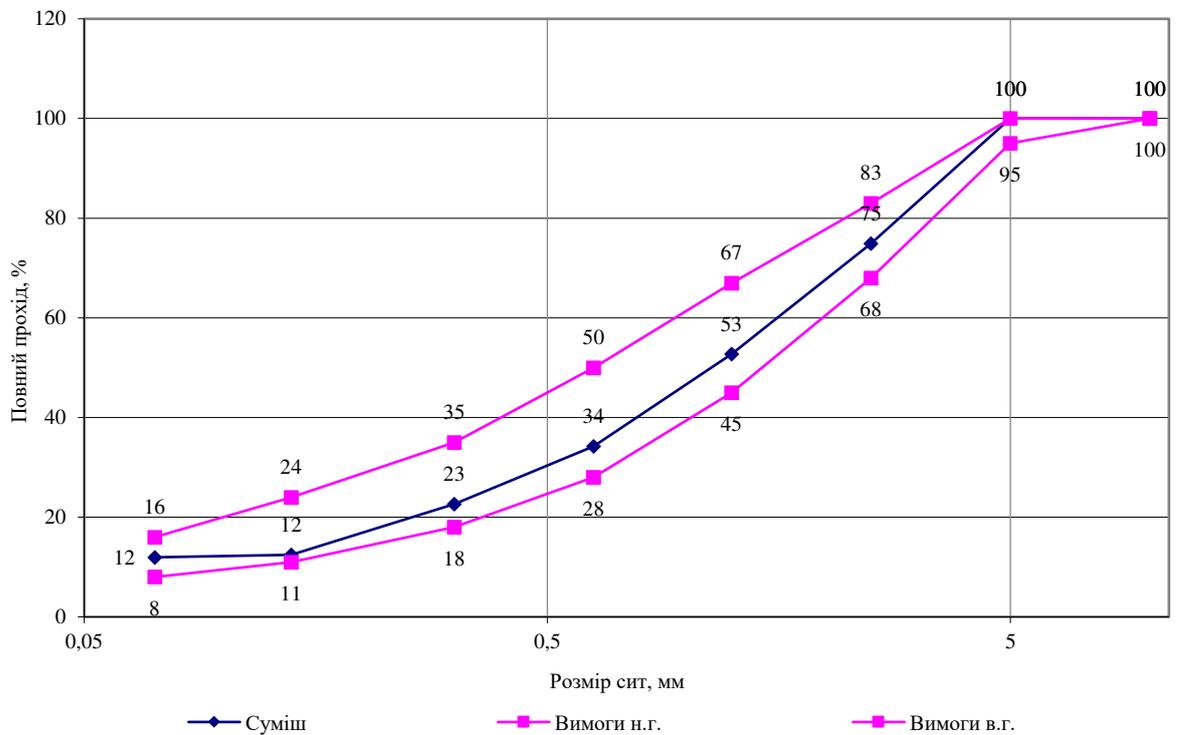


Рисунок 3.9 – Графічне зображення зернового складу асфальтобетонної суміші з наповнювачем із золи-винесення Дарницької ТЕС

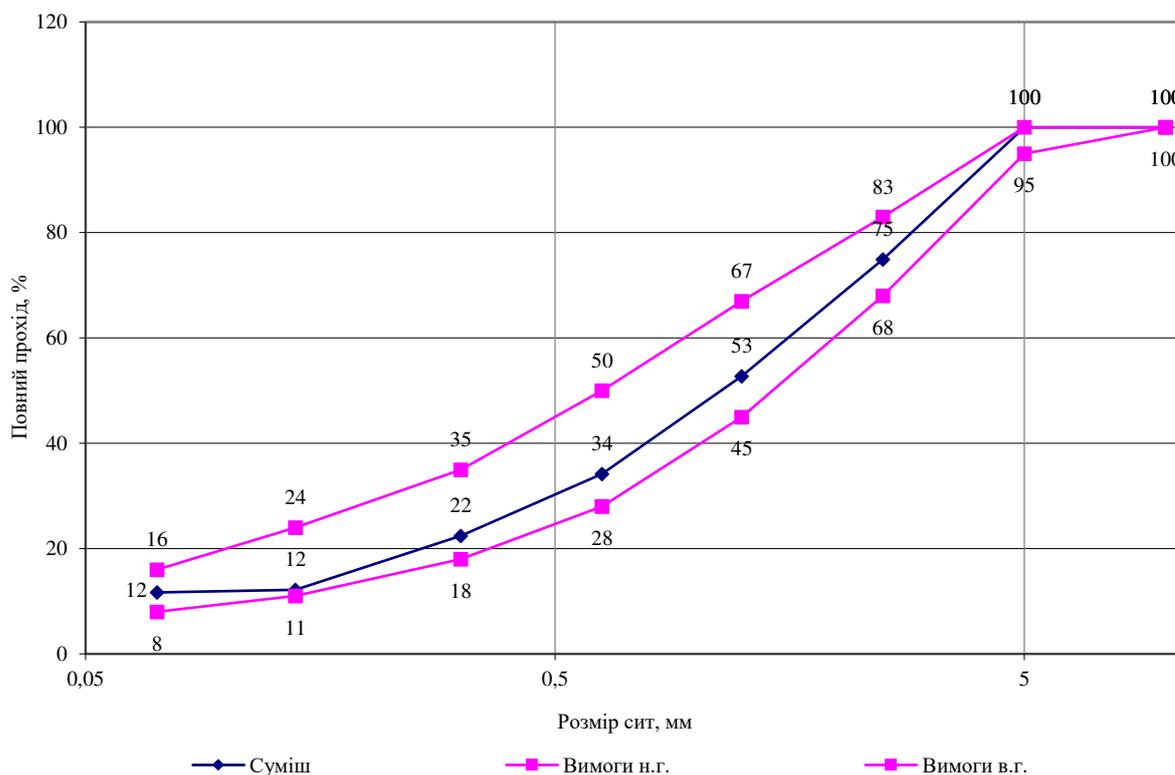


Рисунок 3.10 – Графічне зображення зернового складу асфальтобетонної суміші з наповнювачем із золи-винесення Трипільської ТЕС

Для отримання якісних асфальтобетонних сумішей бітум треба перевести в такий стан, за якого він легко та рівномірно обволікає мінеральний матеріал. Для цього бітум та інші складники асфальтобетонної суміші нагрівають до певної температури, що залежить від марки використовуваного бітуму. В даних дослідженнях температуру нагрівання бітуму під час змішування з мінеральним матеріалом та температури асфальтобетонної суміші на початку ущільнення було встановлено на основі температурно-в'язкісної залежності (рисунок 3.11). Технологічні властивості бітумів характеризують за значенням їх динамічної в'язкості. Так, згідно з [10] за температуру змішування бітуму з мінеральним матеріалом приймають температуру, за якої динамічна в'язкість бітуму становить $(0,17 \pm 0,02)$ Па·с, а за температуру початку ущільнення – температуру, за якої динамічна в'язкість бітуму становить $(0,28 \pm 0,03)$ Па·с. Установлені на основі температурно-в'язкісної залежності температури виробництва та початку ущільнення асфальтобетонних сумішей становили відповідно від $148\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $152,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ та від $139\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $143\text{ }^{\circ}\text{C}$.

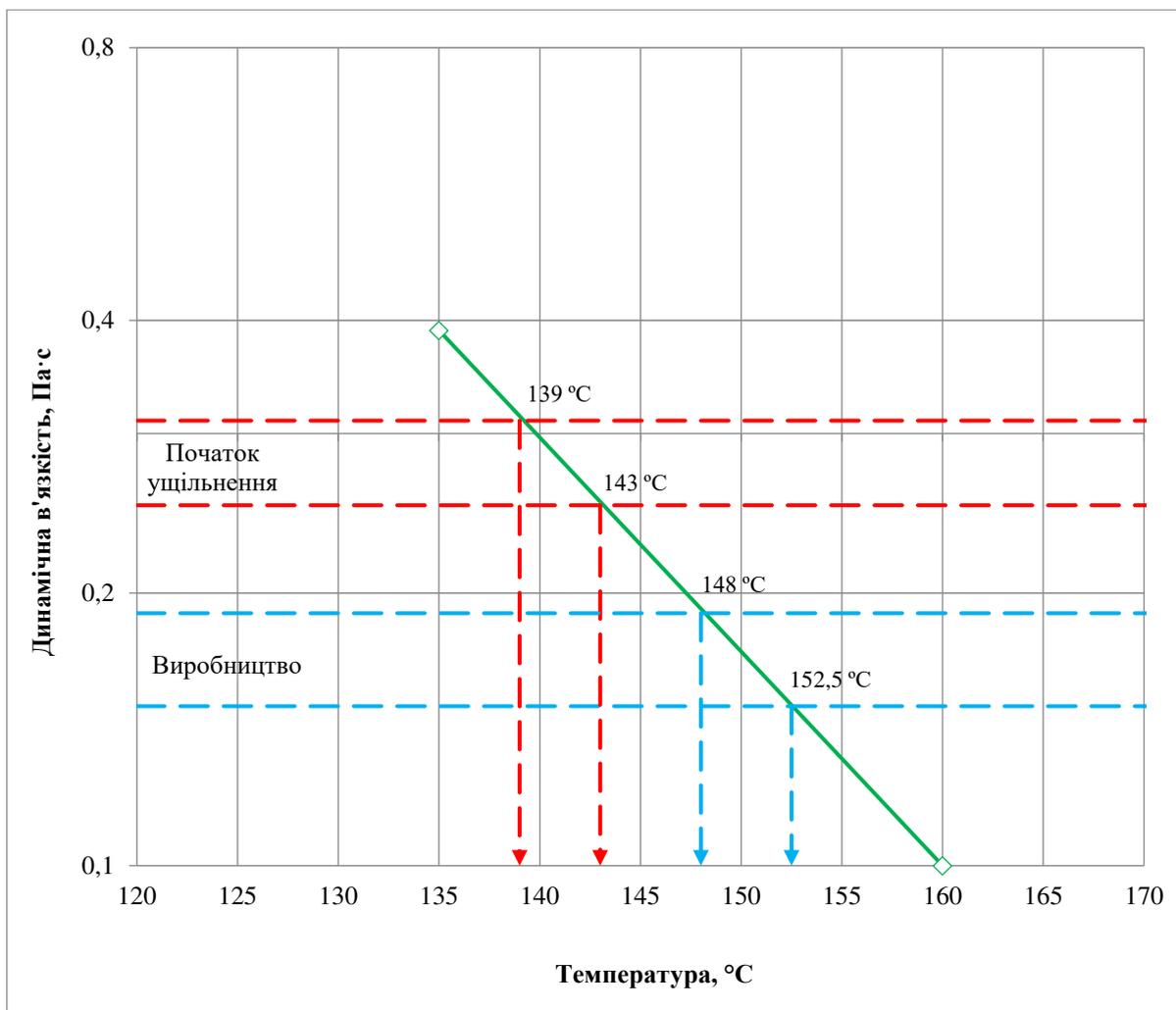


Рисунок 3.11 – Залежність в'язкості бітуму марки БНД 70/100 від температури

Було виготовлено асфальтобетонні суміші з вмістом бітуму 7,0 %, 7,5 % та 8,0 % за масою мінеральних матеріалів із запроєктованим зерновим складом.

Процес виробництва асфальтобетонних сумішей в лабораторії здійснювався з дотриманням стандартної послідовності та змісту технологічних операцій згідно з ДСТУ Б В.2.7–319 [86]. Це включало в себе ряд етапів, таких як підготовка мінеральних матеріалів, нагрівання та додавання бітуму, змішування компонентів, формування суміші та її охолодження.

Важливою частиною процесу було забезпечення точності вмісту бітуму у суміші, щоб забезпечити відповідні характеристики асфальтобетону. Тому кожен етап виробництва контролювався згідно встановлених нормативних вимог.

Результати випробування асфальтобетонів з різними наповнювачами наведено в таблиці 3.5 — 3.8 та на рисунках 3.12 — 3.29.

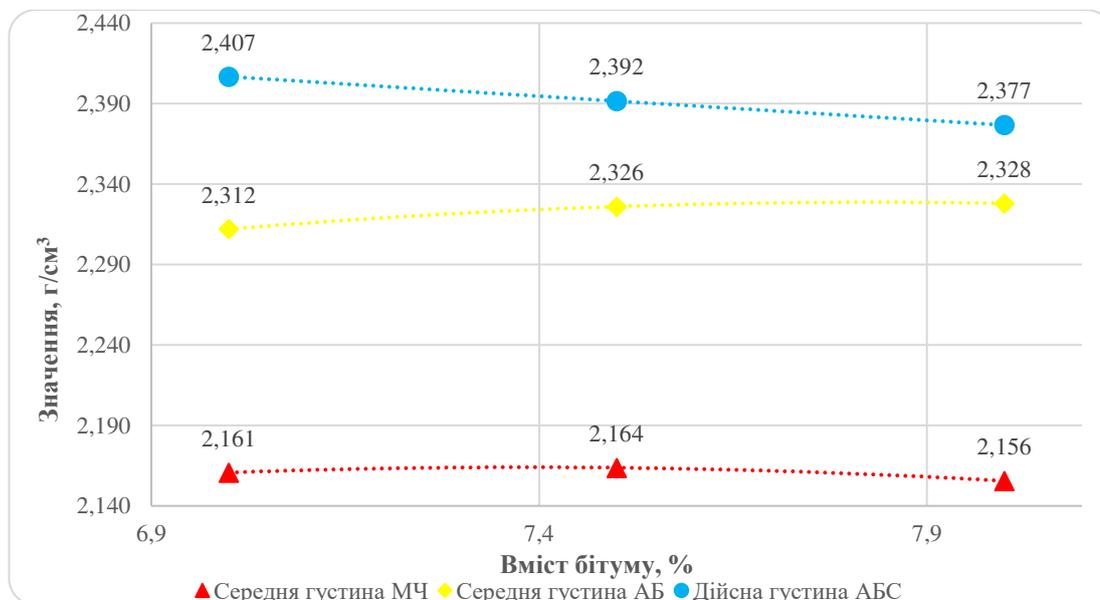


Рисунок 3.12 – Залежність значень густини від вмісту бітуму

Таблиця 3.5 – Результати випробування асфальтобетонів з наповнювачем із вапняку

Ч.ч.	Найменування показника	Результати випробування		
1	Середня густина дрібного заповнювача фракції 2 – 5 мм, г/см ³	2,679	2,679	2,679
2	Середня густина дрібного заповнювача фракції 0,071 – 2 мм, г/см ³	2,661	2,661	2,661
3	Очевидна густина мінерального порошку, г/см ³	2,631	2,631	2,631
4	Очевидна густина бітуму, г/см ³	1,016	1,016	1,016
5	Середня густина асфальтобетону, г/см ³	2,312	2,326	2,328
6	Вміст дрібного заповнювача фракції 2 – 5 мм, %	25	25	25
7	Вміст дрібного заповнювача фракції 0,071 – 2 мм, %	63	63	63
8	Вміст наповнювача, %	12	12	12
9	Вміст бітуму (понад 100 %), %	7,0	7,5	8,0
10	Вміст бітуму (в 100 %), %	6,54	6,98	7,41
11	Дійсна густина мінеральної частини, г/см ³	2,662	2,662	2,662
12	Середня густина мінеральної частини, г/см ³	2,161	2,164	2,156
13	Дійсна густина суміші, г/см ³	2,407	2,392	2,377
14	Пористість мінеральної частини, % за об'ємом	18,825	18,713	19,020
15	Залишкова пористість, % об'ємом	3,94	2,74	2,05
16	Кількість пор, заповнених в'язучим, % за об'ємом	14,887	15,972	16,973

Кінець таблиці 3.5

Ч.ч.	Найменування показника	Результати випробування		
17	Кількість пор, заповнених в'язучим, %	79,08	85,35	89,24
18	Водонасичення, % об'ємом	2,57	1,25	0,50
19	Пористість мінеральної частини, % за об'ємом (ДСТУ EN)	18,825	18,713	19,020
20	Різниця між залишковою пористістю та водонасичення, %	1,37	1,49	1,55
21	Міцність за температури 20 °С, МПа	4,22	4,50	4,40
22	Міцність за температури 50 °С, МПа	1,52	1,68	1,62
23	Міцність за температури 20 °С, МПа, (після водонасичення)	3,86	4,19	4,18
24	Коефіцієнт довготривалої водостійкості	0,91	0,93	0,95
25	Коефіцієнт морозостійкості	0,85	0,86	0,86

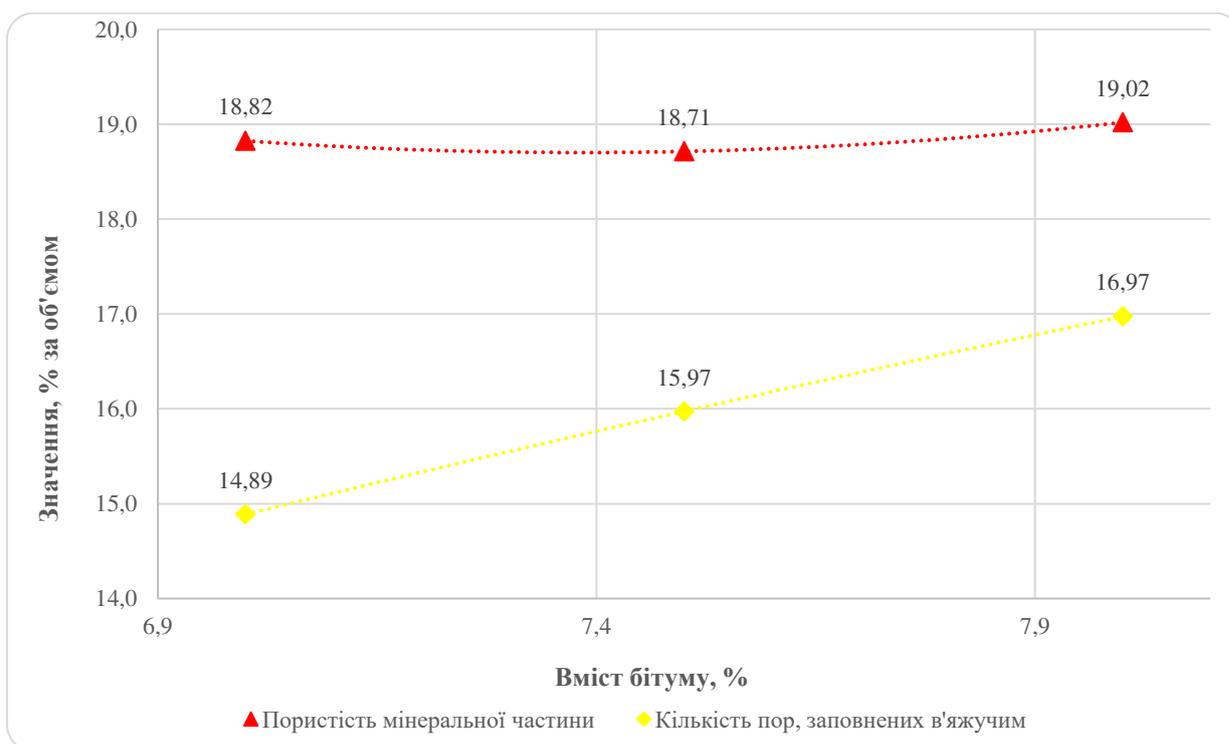


Рисунок 3.13 – Залежність значень пористості від вмісту бітуму

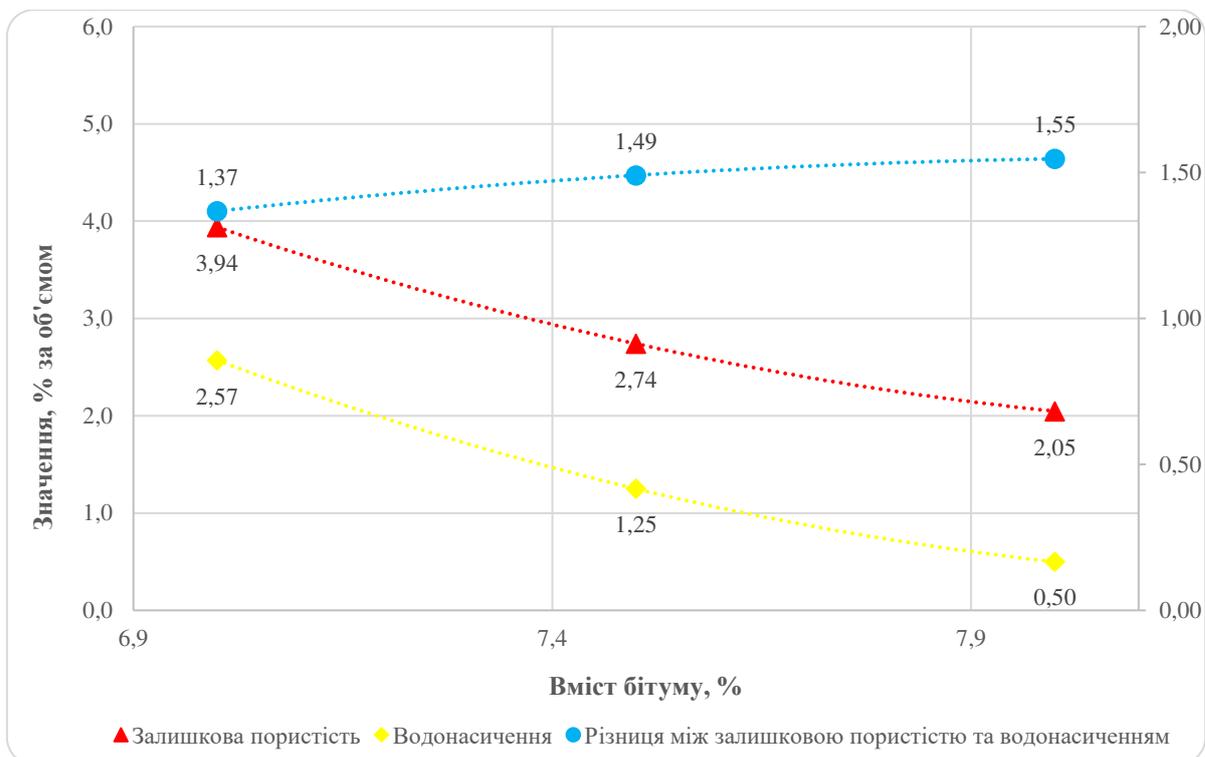


Рисунок 3.14 – Залежність об'ємних властивостей від вмісту бітуму

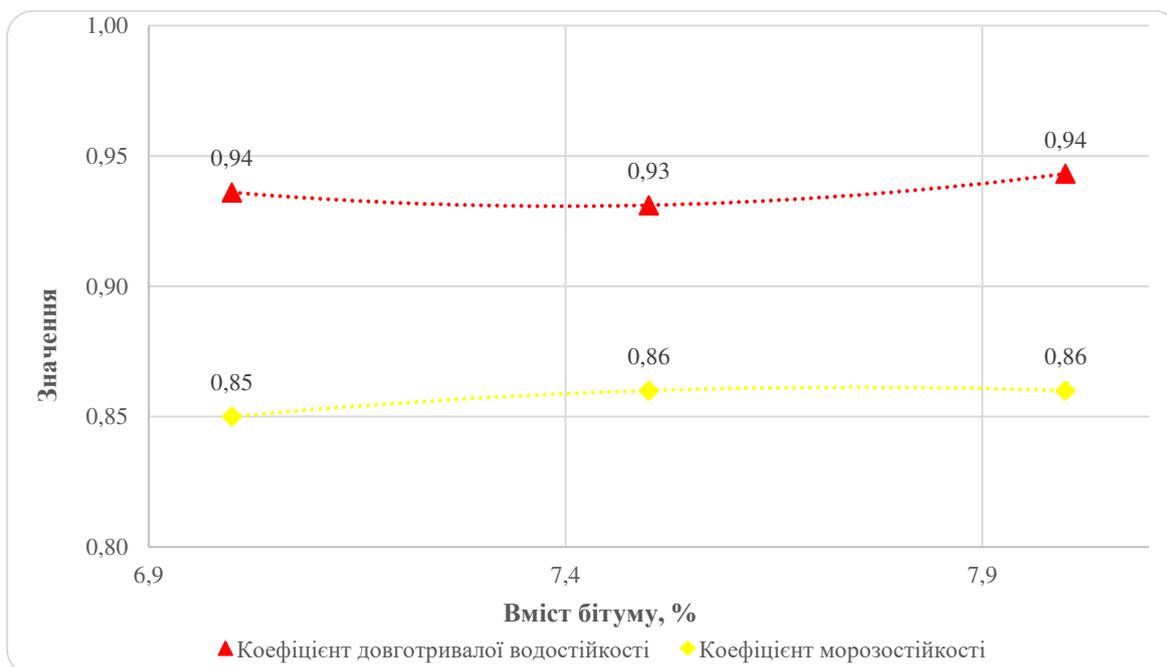


Рисунок 3.15 – Залежність атмосферостійкості від вмісту бітуму

Результати випробування показали, що із збільшенням вмісту бітуму відбувається поступове зменшення дійсної густини асфальтобетонної суміші та зростання середньої густини асфальтобетону. При цьому, нема чіткої залежності

зміни середньої густини мінеральної частини та її пористості від вмісту бітуму, однак існує взаємозв'язок між цими двома показниками. У той же час поступове збільшення вмісту бітуму призводить до збільшення кількості пор, заповнених в'язучим.

Залишкова пористість та водонасичення зменшуються у міру збільшення вмісту бітуму. При цьому існує чітка залежність між даними показниками. Варто зазначити, що при зменшенні кількості залишкових пор в асфальтобетоні, різниця між залишковою пористістю та водонасиченням збільшується, що свідчить про більшу кількість замкнутих пор у щільнішому асфальтобетоні.

Вміст бітуму не суттєво впливає на міцність асфальтобетону, його водо— та морозостійкість. У всіх випадках результати випробування знаходяться в межах похибки випробування. При цьому найбільшою міцністю відзначається асфальтобетон з 7,5 % бітуму.

Таблиця 3.6 – Результати випробування асфальтобетонів з наповнювачем із золи-винесення Бурштинської ТЕС

Ч. ч.	Найменування показника	Результати випробування		
1	Середня густина дрібного заповнювача фракції 2 — 5 мм, г/см ³	2,679	2,679	2,679
2	Середня густина дрібного заповнювача фракції 0,071 — 2 мм, г/см ³	2,661	2,661	2,661
3	Очевидна густина мінерального порошку, г/см ³	2,602	2,602	2,602
4	Очевидна густина бітуму, г/см ³	1,016	1,016	1,016
5	Середня густина асфальтобетону, г/см ³	2,301	2,319	2,325
6	Вміст дрібного заповнювача фракції 2 — 5 мм, %	25	25	25
7	Вміст дрібного заповнювача фракції 0,071 — 2 мм, %	63	63	63
8	Вміст наповнювача, %	12	12	12
9	Вміст бітуму (понад 100 %), %	7	7,5	8
10	Вміст бітуму (в 100 %), %	6,54	6,98	7,41
11	Дійсна густина мінеральної частини, г/см ³	2,658	2,658	2,658
12	Середня густина мінеральної частини, г/см ³	2,150	2,157	2,153

Кінець таблиці 3.6

Ч. ч.	Найменування показника	Результати випробування		
13	Дійсна густина суміші, г/см ³	2,404	2,389	2,374
14	Пористість мінеральної частини, % за об'ємом	19,102	18,848	19,015
15	Залишкова пористість, % об'ємом	4,29	2,92	2,06
16	Кількість пор, заповнених в'язучим, % за об'ємом	14,816	15,924	16,951
17	Кількість пор, заповнених в'язучим, %	77,57	84,49	89,15
18	Водонасичення, % об'ємом	2,82	1,41	0,54
19	Пористість мінеральної частини, % за об'ємом (ДСТУ EN)	19,102	18,848	19,015
20	Різниця між залишковою пористістю та водонасичення, %	1,47	1,51	1,52
21	Міцність за температури 20 °С, МПа	3,90	4,12	4,16
22	Міцність за температури 50 °С, МПа	1,33	1,39	1,51
23	Міцність за температури 20 °С, МПа, (після водонасичення)	3,47	3,69	3,84
24	Коефіцієнт довготривалої водостійкості	0,89	0,90	0,92
25	Коефіцієнт морозостійкості	0,81	0,83	0,87

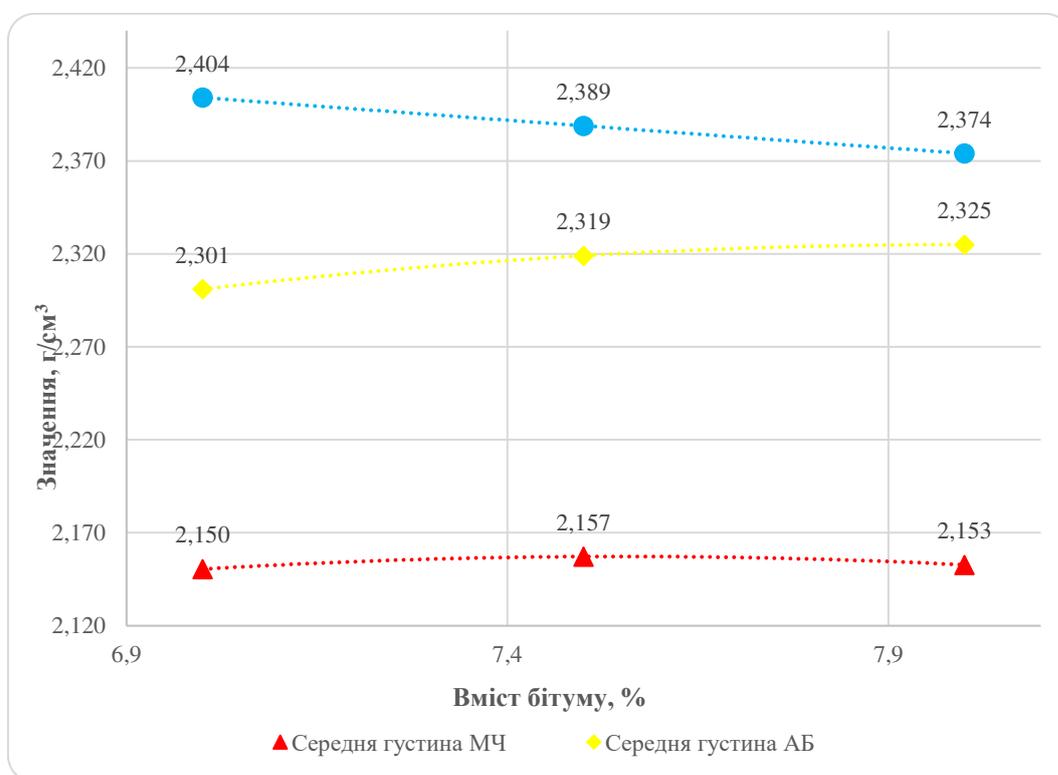


Рисунок 3.16 – Залежність значень густини від вмісту бітуму

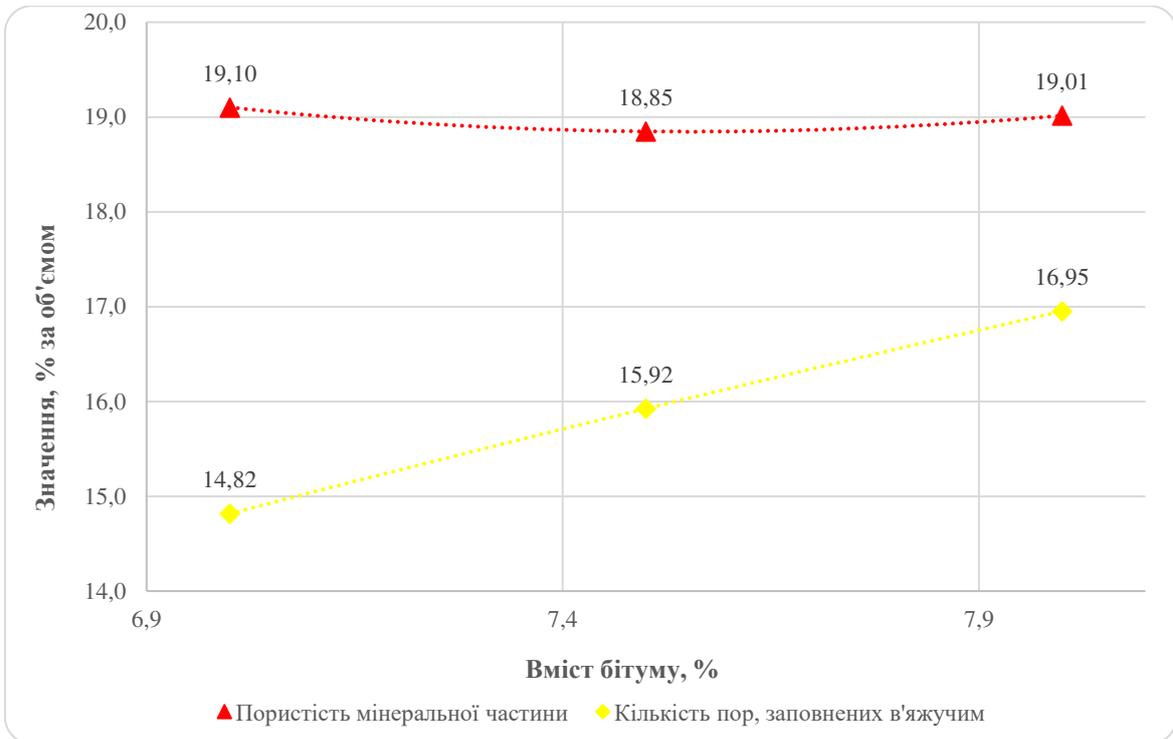


Рисунок 3.17 – Залежність значень пористості від вмісту бітуму

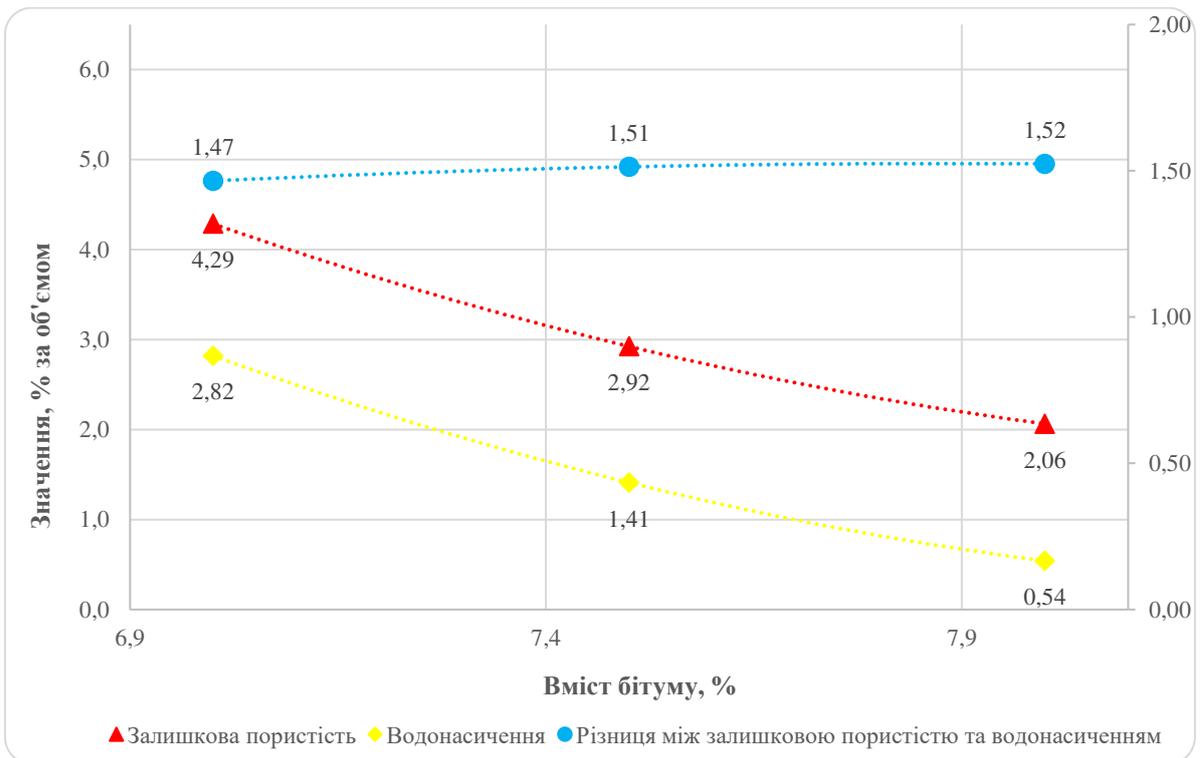


Рисунок 3.18 – Залежність об'ємних властивостей від вмісту бітуму

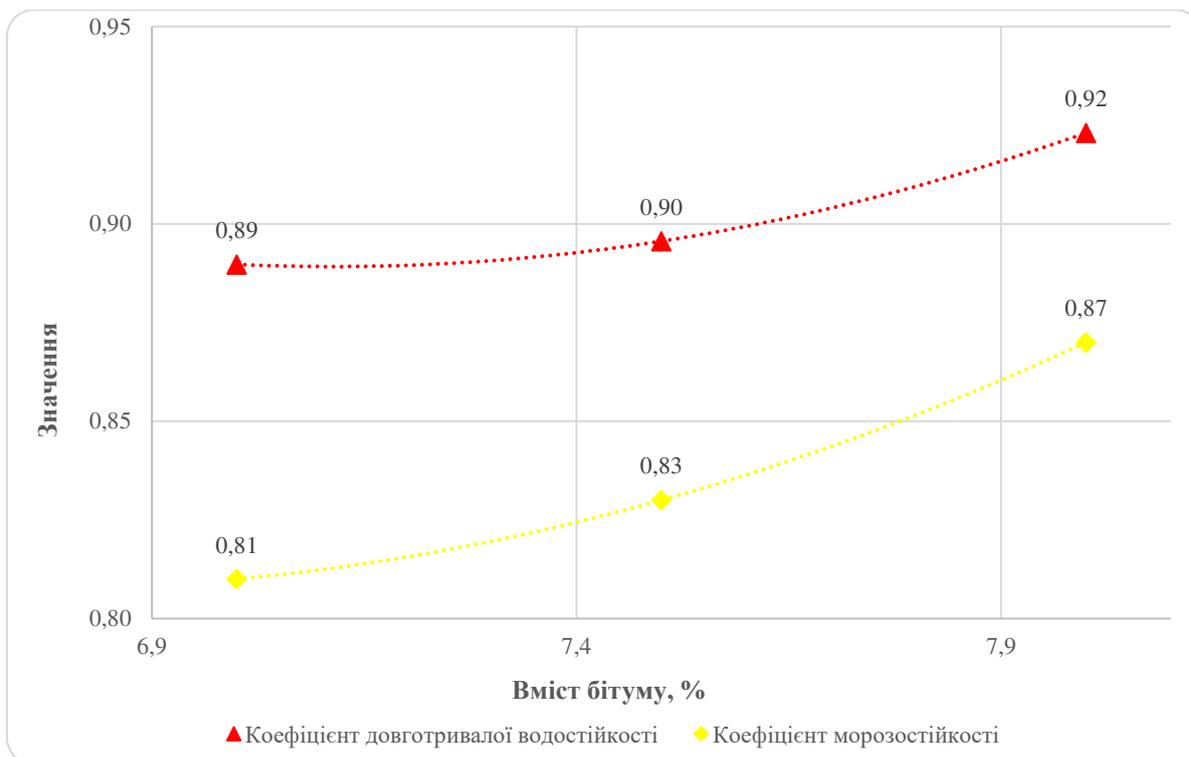


Рисунок 3.19 – Залежність атмосферостійкості від вмісту бітуму

Результати випробування показали, що із збільшенням вмісту бітуму відбувається поступове зменшення дійсної густини асфальтобетонної суміші та зростання середньої густини асфальтобетону. При цьому, нема чіткої залежності зміни середньої густини мінеральної частини та її пористості від вмісту бітуму, однак існує взаємозв'язок між цими двома показниками. У той же час поступове збільшення вмісту бітуму призводить до збільшення кількості пор, заповнених в'язучим.

Залишкова пористість та водонасичення зменшуються у міру збільшення вмісту бітуму. При цьому існує чітка залежність між даними показниками. Варто зазначити, що при зменшенні кількості залишкових пор в асфальтобетоні, різниця між залишковою пористістю та водонасиченням збільшується, що свідчить про більшу кількість замкнутих пор у щільнішому асфальтобетоні.

Вміст бітуму не суттєво впливає на міцність асфальтобетону, його водо— та морозостійкість. У всіх випадках результати випробування знаходяться в

межах похибки випробування. При цьому найбільшою міцністю відзначається асфальтобетон з 8,0 % бітуму.

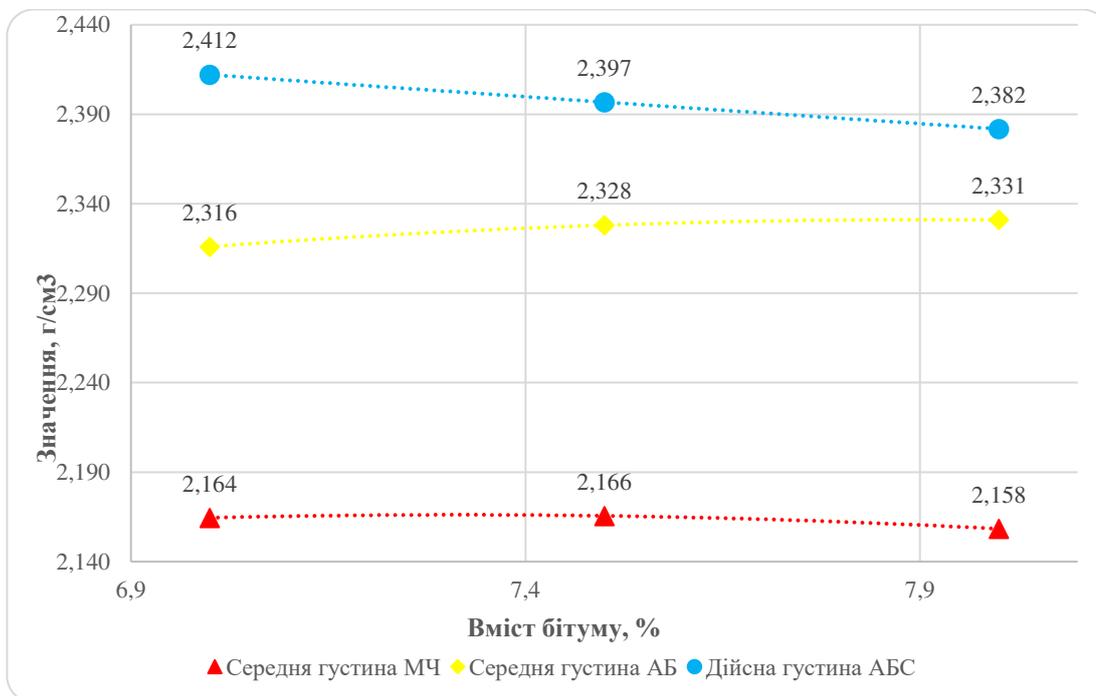


Рисунок 3.20 – Залежність значень густини від вмісту бітуму

Таблиця 3.7 – Результати випробування асфальтобетонів з наповнювачем із кварцитного пилю

Ч.ч.	Найменування показника	Результати випробування		
1	Середня густина дрібного заповнювача фракції 2 — 5 мм, г/см ³	2,679	2,679	2,679
2	Середня густина дрібного заповнювача фракції 0,071 — 2 мм, г/см ³	2,661	2,661	2,661
3	Очевидна густина мінерального порошку, г/см ³	2,689	2,689	2,689
4	Очевидна густина бітуму, г/см ³	1,016	1,016	1,016
5	Середня густина асфальтобетону, г/см ³	2,316	2,328	2,331
6	Вміст дрібного заповнювача фракції 2 — 5 мм, %	25	25	25
7	Вміст дрібного заповнювача фракції 0,071 — 2 мм, %	63	63	63
8	Вміст наповнювача, %	12	12	12
9	Вміст бітуму (понад 100 %), %	7	7,5	8
10	Вміст бітуму (в 100 %), %	6,54	6,98	7,41

Кінець таблиці 3.7

Ч.ч.	Найменування показника	Результати випробування		
11	Дійсна густина мінеральної частини, г/см ³	2,669	2,669	2,669
12	Середня густина мінеральної частини, г/см ³	2,164	2,166	2,158
13	Дійсна густина суміші, г/см ³	2,412	2,397	2,382
14	Пористість мінеральної частини, % за об'ємом	18,897	18,856	19,128
15	Залишкова пористість, % об'ємом	3,98	2,87	2,13
16	Кількість пор, заповнених в'язучим, % за об'ємом	14,913	15,986	16,995
17	Кількість пор, заповнених в'язучим, %	78,92	84,78	88,85
18	Водонасичення, % об'ємом	2,61	1,45	0,63
19	Пористість мінеральної частини, % за об'ємом (ДСТУ EN)	18,897	18,856	19,128
20	Різниця між залишковою пористістю та водонасичення, %	1,37	1,42	1,50
21	Міцність за температури 20 °С, МПа	4,08	4,22	4,14
22	Міцність за температури 50 °С, МПа	1,35	1,46	1,49
23	Міцність за температури 20 °С, МПа, (після водонасичення)	3,73	3,84	3,79
24	Коефіцієнт довготривалої водостійкості	0,91	0,91	0,92
25	Коефіцієнт морозостійкості	0,82	0,84	0,85

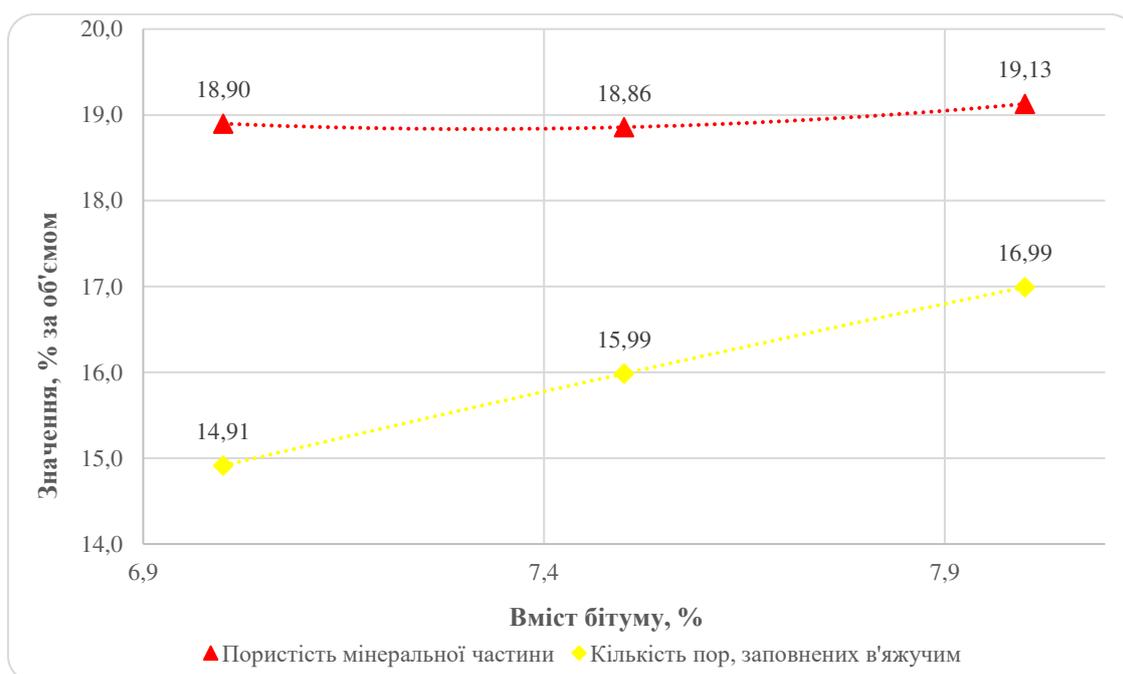


Рисунок 3.21 – Залежність значень пористості від вмісту бітуму

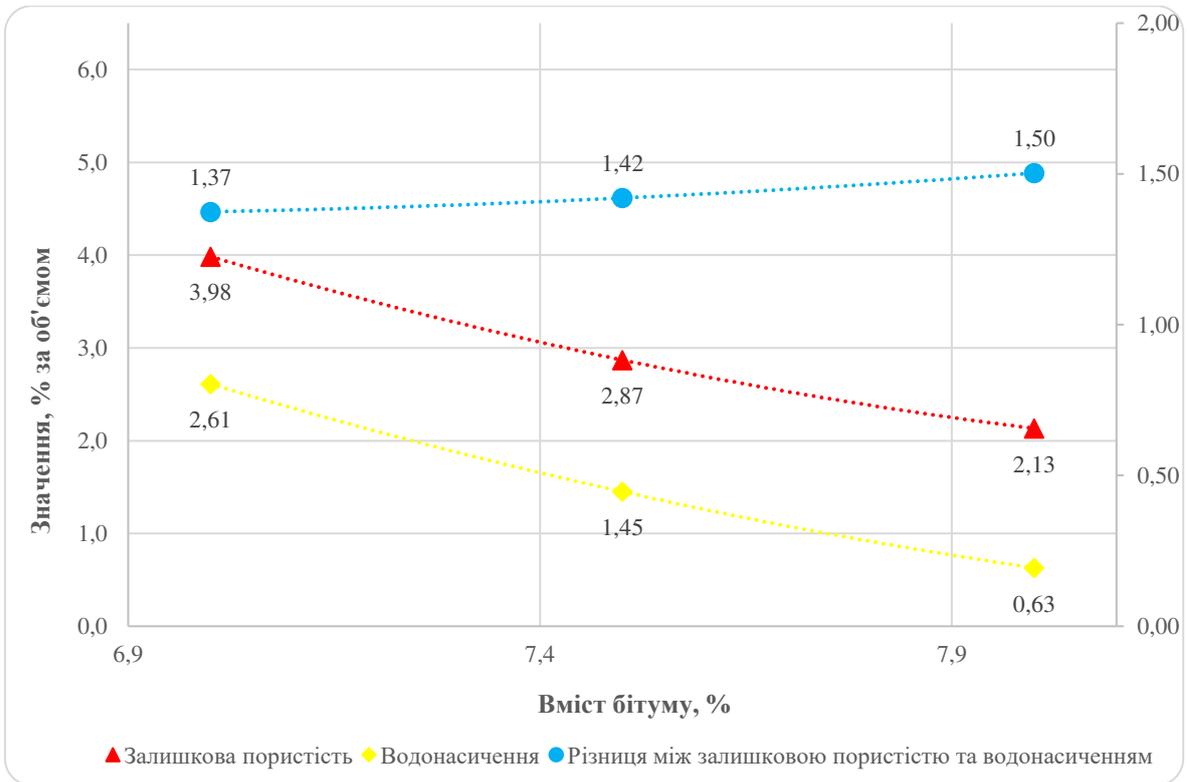


Рисунок 3.22 – Залежність об'ємних властивостей від вмісту бітуму

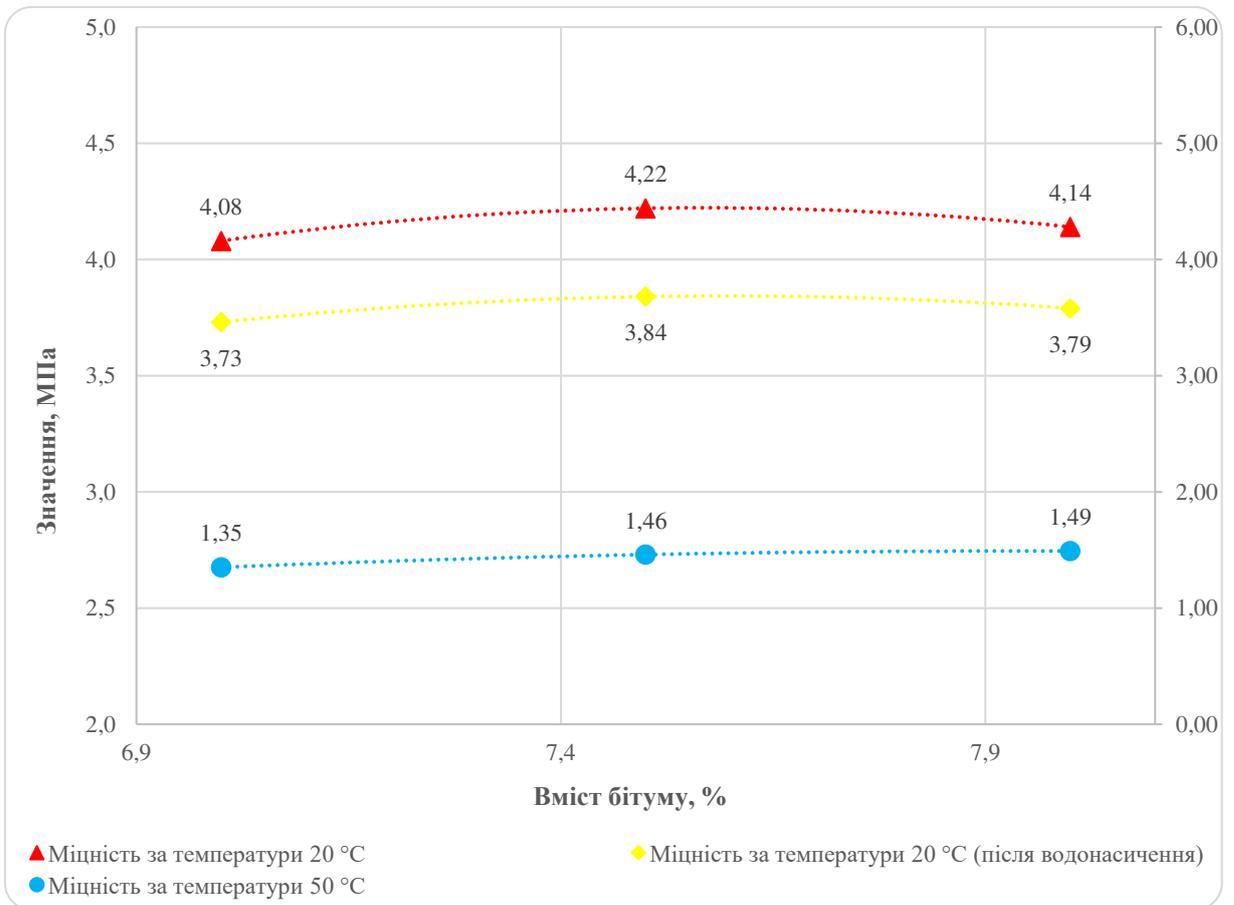


Рисунок 3.23 – Залежність міцності від вмісту бітуму

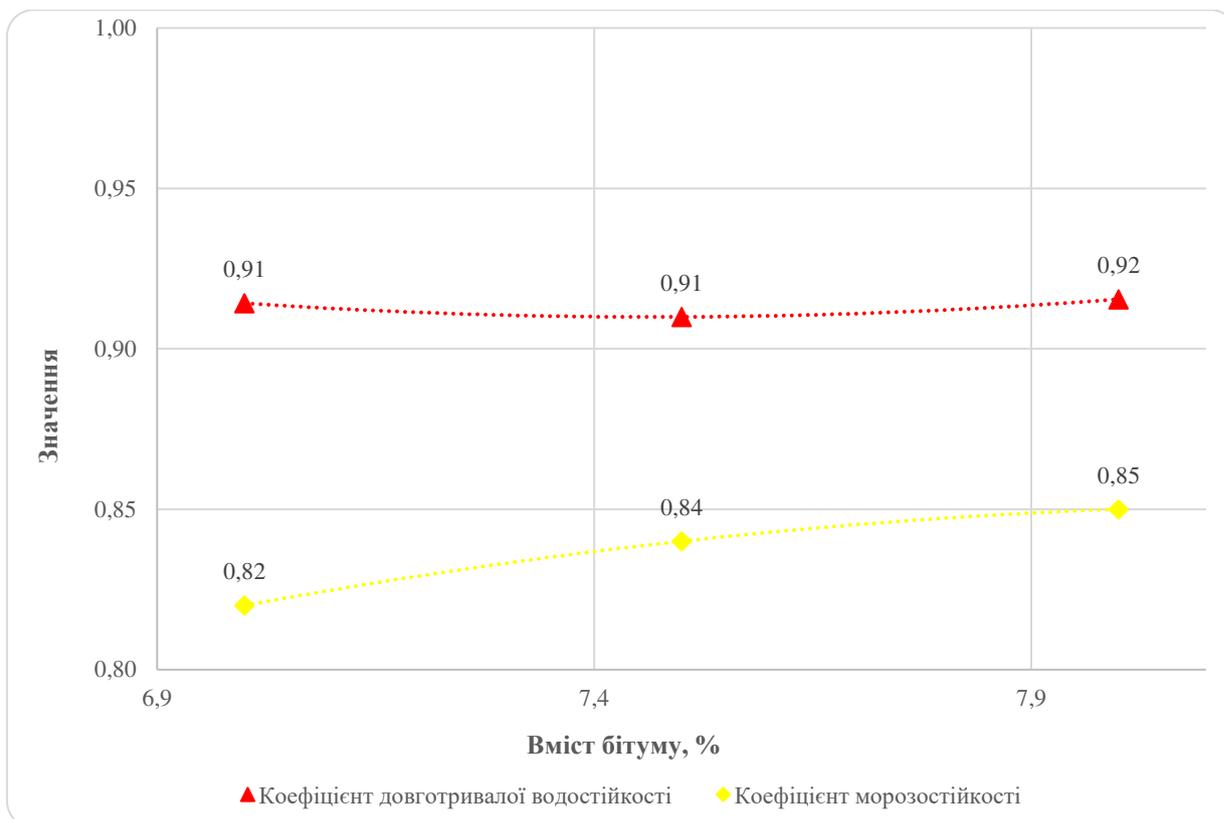


Рисунок 3.24 – Залежність атмосферостійкості від вмісту бітуму

Результати випробування показали, що із збільшенням вмісту бітуму відбувається поступове зменшення дійсної густини асфальтобетонної суміші та зростання середньої густини асфальтобетону. При цьому, нема чіткої залежності зміни середньої густини мінеральної частини та її пористості від вмісту бітуму, однак існує взаємозв'язок між цими двома показниками. У той же час поступове збільшення вмісту бітуму призводить до збільшення кількості пор, заповнених в'язучим.

Залишкова пористість та водонасичення зменшуються у міру збільшення вмісту бітуму. При цьому існує чітка залежність між даними показниками. Варто зазначити, що при зменшенні кількості залишкових пор в асфальтобетоні, різниця між залишковою пористістю та водонасиченням збільшується, що свідчить про більшу кількість замкнутих пор у щільнішому асфальтобетоні.

Вміст бітуму не суттєво впливає на міцність асфальтобетону, його водо- та морозостійкість. У всіх випадках результати випробування знаходяться в межах похибки випробування. При цьому найбільшою міцністю за температури 20 °С відзначається асфальтобетон з 7,5 % бітуму, а за температури 20 °С – 8,0 %.

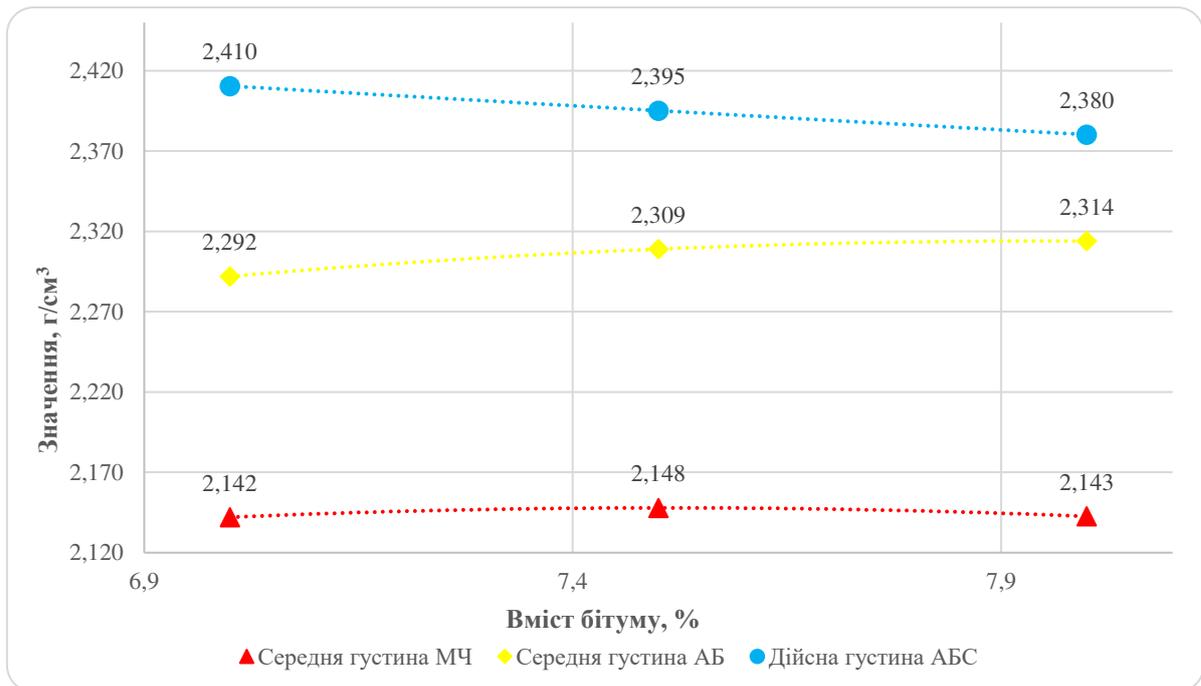


Рисунок 3.25 – Залежність значень густини від вмісту бітуму

Таблиця 3.8 – Результати випробування асфальтобетонів з наповнювачем із гранітного пилю

Ч. ч.	Найменування показника	Результати випробування		
1	Середня густина дрібного заповнювача фракції 2 — 5 мм, г/см ³	2,679	2,679	2,679
2	Середня густина дрібного заповнювача фракції 0,071 — 2 мм, г/см ³	2,661	2,661	2,661
3	Очевидна густина мінерального порошку, г/см ³	2,671	2,671	2,671
4	Очевидна густина бітуму, г/см ³	1,016	1,016	1,016
5	Середня густина асфальтобетону, г/см ³	2,292	2,309	2,314
6	Вміст дрібного заповнювача фракції 2 — 5 мм, %	25	25	25
7	Вміст дрібного заповнювача фракції 0,071 — 2 мм, %	63	63	63
8	Вміст наповнювача, %	12	12	12
9	Вміст бітуму (понад 100 %), %	7	7,5	8
10	Вміст бітуму (в 100 %), %	6,54	6,98	7,41
11	Дійсна густина мінеральної частини, г/см ³	2,667	2,667	2,667

Кінець таблиці 3.8

Ч.ч.	Найменування показника	Результати випробування		
12	Середня густина мінеральної частини, г/см ³	2,142	2,148	2,143
13	Дійсна густина суміші, г/см ³	2,410	2,395	2,380
14	Пористість мінеральної частини, % за об'ємом	19,673	19,454	19,653
15	Залишкова пористість, % об'ємом	4,91	3,60	2,78
16	Кількість пор, заповнених в'язучим, % за об'ємом	14,758	15,856	16,871
17	Кількість пор, заповнених в'язучим, %	75,02	81,50	85,84
18	Водонасичення, % об'ємом	3,62	2,06	1,12
19	Пористість мінеральної частини, % за об'ємом (ДСТУ EN)	19,673	19,454	19,653
20	Різниця між залишковою пористістю та водонасичення, %	1,29	1,54	1,66
21	Міцність за температури 20 °С, МПа	3,62	3,81	3,86
22	Міцність за температури 50 °С, МПа	1,25	1,29	1,31
23	Міцність за температури 20 °С, МПа, (після водонасичення)	3,01	3,19	3,26
24	Коефіцієнт довготривалої водостійкості	0,83	0,84	0,84
25	Коефіцієнт морозостійкості	0,69	0,74	0,78

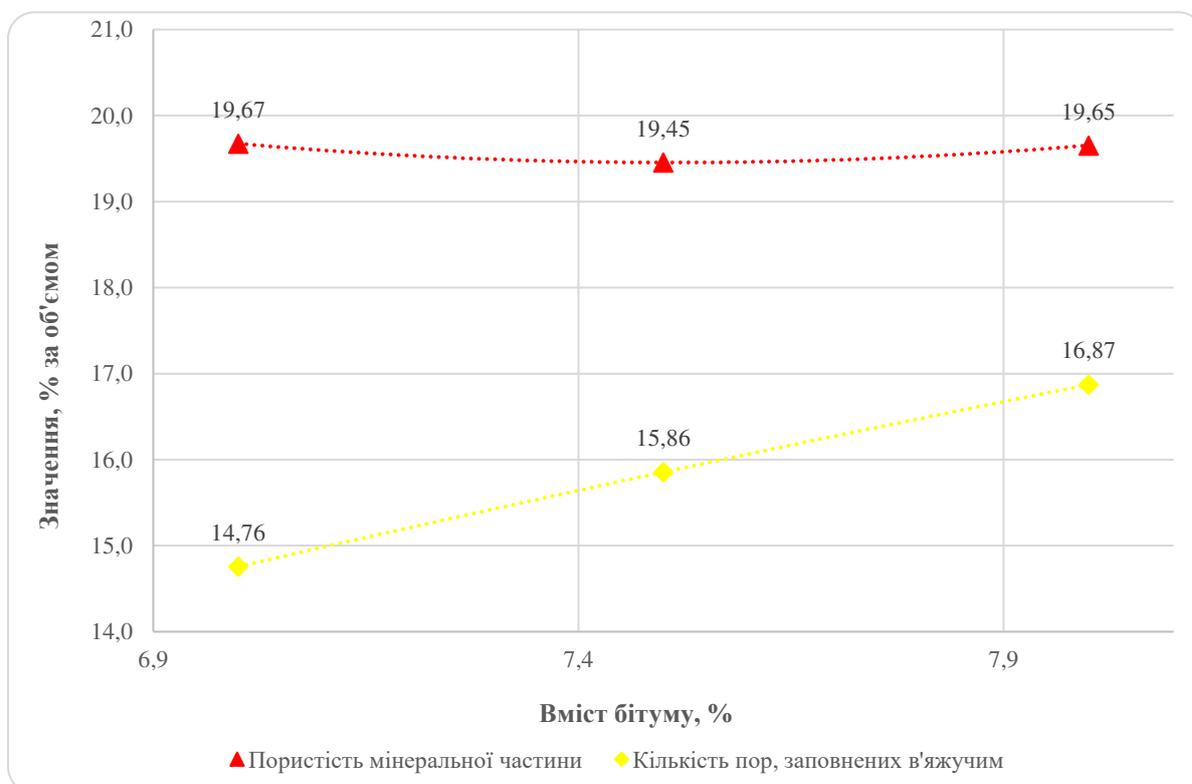


Рисунок 3.26 – Залежність значень пористості від вмісту бітуму

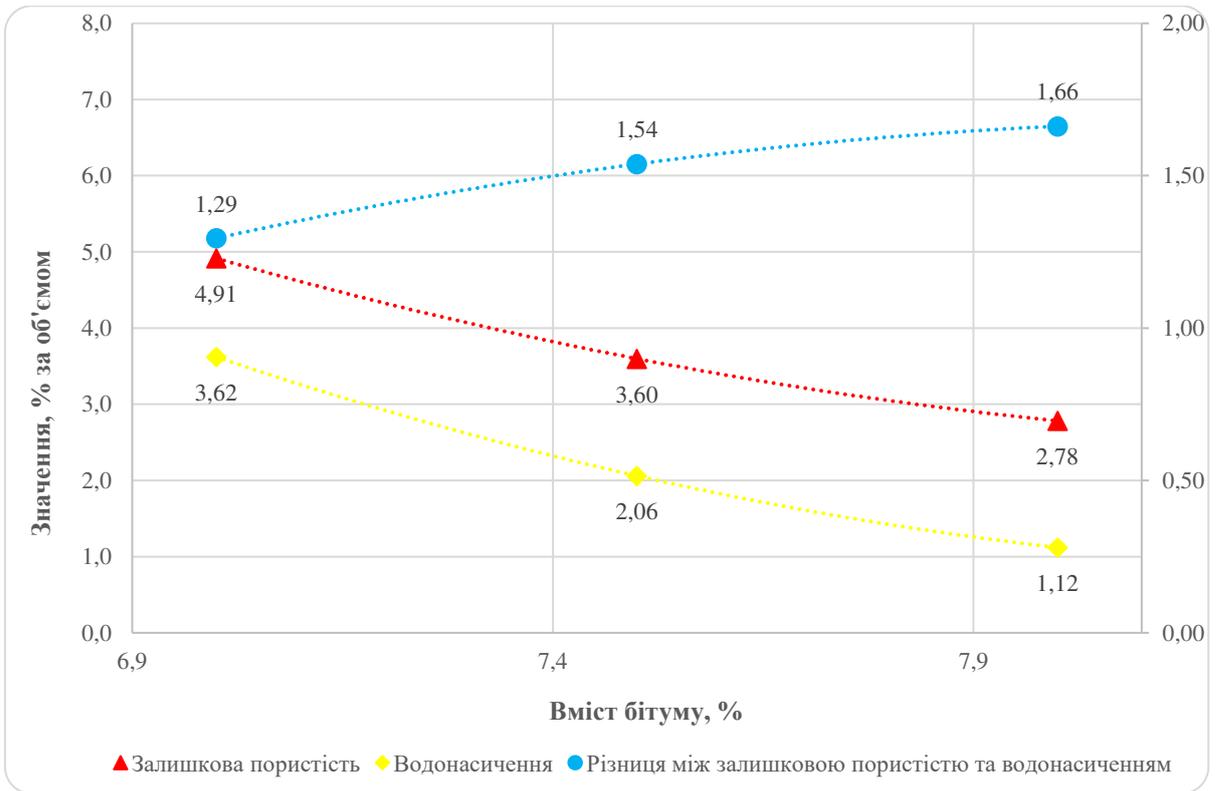


Рисунок 3.27 – Залежність об'ємних властивостей від вмісту бітуму

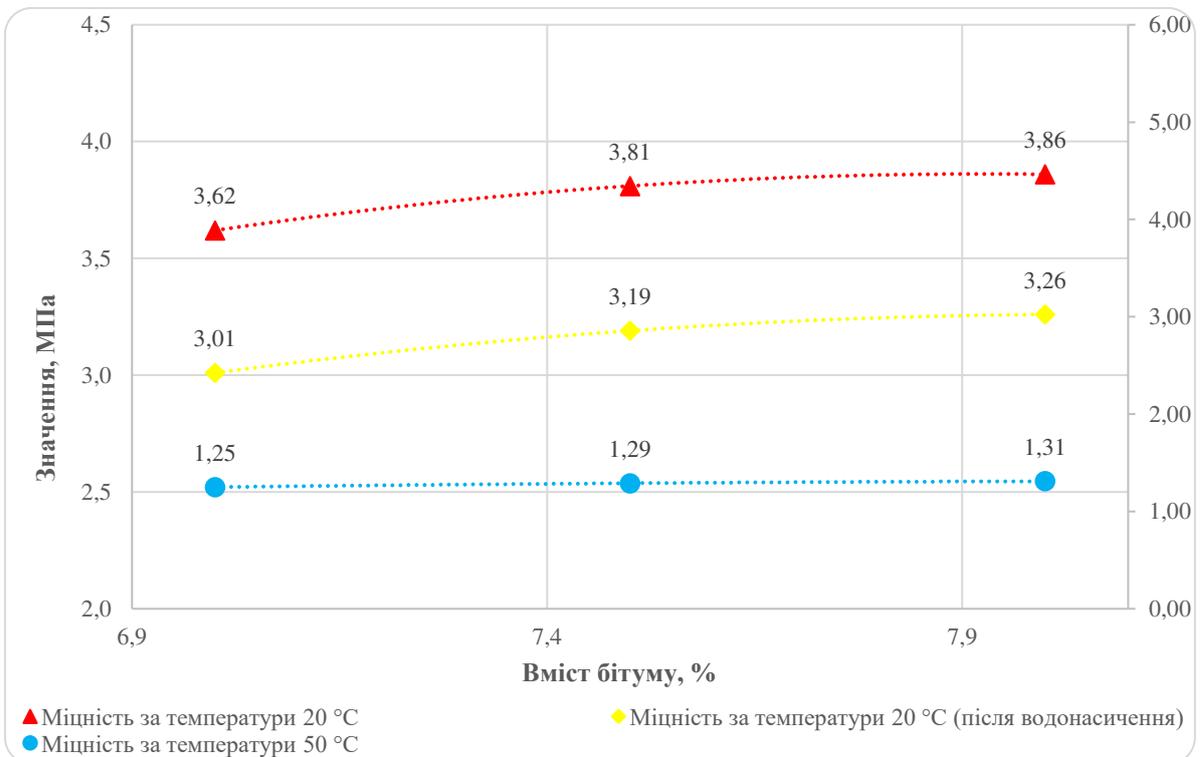


Рисунок 3.28 – Залежність міцності від вмісту бітуму

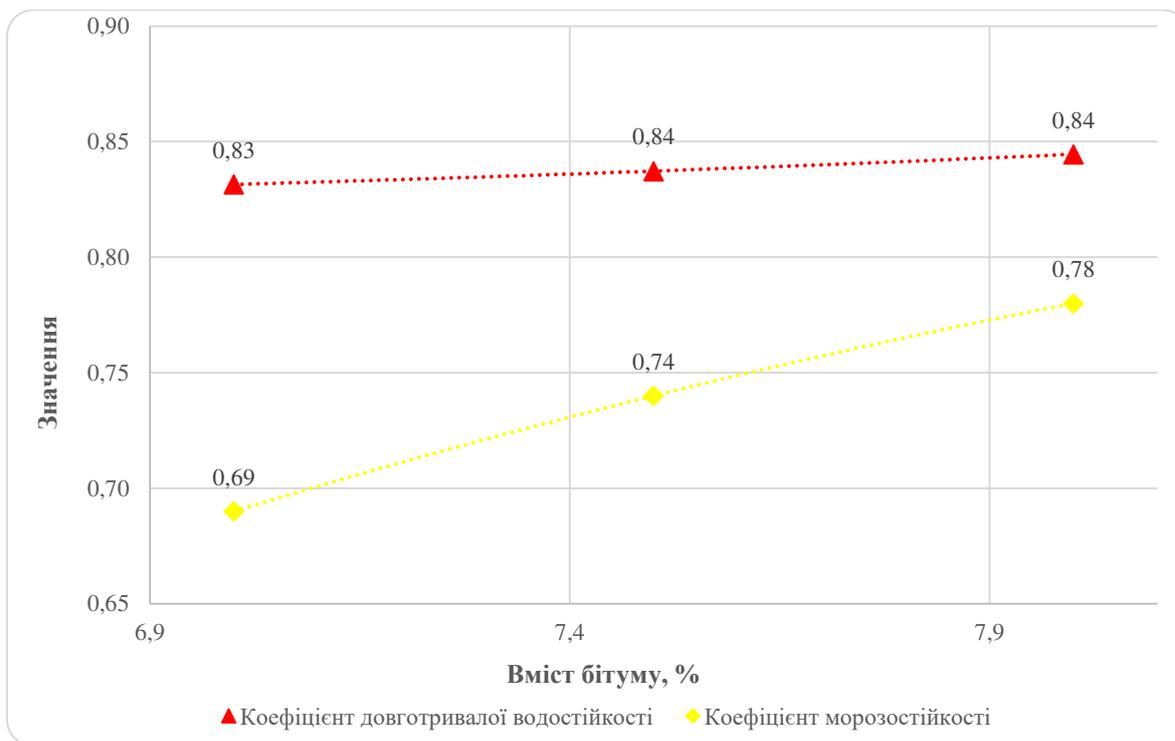


Рисунок 3.29 – Залежність атмосферостійкості від вмісту бітуму

Результати випробування показали, що із збільшенням вмісту бітуму відбувається поступове зменшення дійсної густини асфальтобетонної суміші та зростання середньої густини асфальтобетону. При цьому, нема чіткої залежності зміни середньої густини мінеральної частини та її пористості від вмісту бітуму, однак існує взаємозв'язок між цими двома показниками. В той же час поступове збільшення вмісту бітуму призводить до збільшення кількості пор, заповнених в'язучим.

Залишкова пористість та водонасичення зменшуються у міру збільшення вмісту бітуму. При цьому існує чітка залежність між даними показниками. Варто зазначити, що при зменшенні кількості залишкових пор в асфальтобетоні, різниця між залишковою пористістю та водонасиченням збільшується, що свідчить про більшу кількість замкнених пор у щільнішому асфальтобетоні.

Вміст бітуму не суттєво впливає на міцність асфальтобетону та його водостійкість. У всіх випадках результати випробування знаходяться в межах похибки випробування. При цьому найбільшою відзначається асфальтобетон 8,0 % бітуму.

Вміст бітуму має значний вплив на морозостійкість асфальтобетону. Із збільшенням вмісту бітуму від 7,0 % до 8,0 % коефіцієнт морозостійкості зростає з 0,69 до 0,78.

Таким чином тип наповнювача практично не впливає на закономірності зміни об'ємних властивостей асфальтобетону, а також міцності. При цьому, найбільшою щільністю відзначається асфальтобетон з наповнювачем із кварциту ($2,316 \text{ г/см}^3$ — $2,331 \text{ г/см}^3$), а найменшою — з наповнювачем із граніту ($2,292 \text{ г/см}^3$ — $2,314 \text{ г/см}^3$).

У той же час найменшою залишковою пористістю відзначається асфальтобетон з наповнювачем із вапняку (3,94 % за об'ємом — 2,05 % за об'ємом), а найменшою — з наповнювачем із граніту (4,91 % за об'ємом — 2,78 % за об'ємом). Відповідна тенденція має місце і для водонасичення асфальтобетону.

Міцність асфальтобетону за температури 20 °С та 50 °С також є найбільшою для асфальтобетону з наповнювачем із вапняку, а найменшою — для асфальтобетону з наповнювачем із граніту.

Найбільш суттєвим виявився вплив типу наповнювача на водо- та морозостійкість асфальтобетонів. Так, коефіцієнт довготривалої водостійкості для асфальтобетону з наповнювачем із вапняку залежно від вмісту бітуму становить 0,93 — 0,94, для асфальтобетону з наповнювачем із золи-винесення — 0,89 — 0,92, для асфальтобетону з наповнювачем із кварциту — 0,82 — 0,85, а для асфальтобетону з наповнювачем із граніту — 0,83 — 0,84. Коефіцієнт морозостійкості відповідно становить 0,85 — 0,86, 0,81 — 0,87, 0,82 — 0,85 та 0,69 — 0,78. У випадку наповнювача із вапняку та граніту такі результати можуть бути пов'язані з спорідненістю бітуму на вапняку. Вважається, що між основними гірськими породами та бітумом забезпечується висока зчеплюваність, а з кислими гірськими породами та бітумом навпаки — низька зчеплюваність. Однак у такому випадку нелогічними є результати визначення водо- та морозостійкості асфальтобетону з наповнювачем із кварциту, оскільки даний

матеріал на 98 % складається з SiO_2 , в той же час асфальтобетон має достатньо високу водо– та морозостійкість.

Таким чином, всі досліджувані наповнювачі може бути використано для виробництва асфальтобетонних сумішей, однак у певних випадках необхідно вживати заходи з підвищення водостійкості асфальтобетону шляхом використання добавок на основі поверхнево–активних речовин або ж використовувати дані наповнювачі в суміші із наповнювачем з вапняку чи інших осадових карбонатних гірських порід.

Використання в дорожньому будівництві досліджених наповнювачів з вторинних продуктів промисловості дозволить зменшити видобуток кондиційних природних матеріалів та зменшити шкідливий вплив вторинних продуктів промисловості на довкілля.

3.3 Дослідження асфальтобетону із золою-винесення

3.3.1 Методика досліджень

Проектування асфальтобетону є складним процесом, що включає ряд кроків для забезпечення відповідної якості та довговічності дорожнього одягу.

Першим етапом є вибір наповнювачів, заповнювачів та в'язучого матеріалу. Це важливо, оскільки якість цих компонентів впливає на властивості асфальтобетону. Наповнювач повинен мати відповідний зерновий склад і структурувальну здатність, щоб забезпечити відповідну щільність. Заповнювачі повинні відповідати вимогам щодо стираності та вмісту зерен лещадної форми.

Підбір гранулометричного складу та оптимального вмісту в'язучого є також важливим етапом. Вміст в'язучого повинен бути належним чином збалансованим, щоб забезпечити необхідну міцність і стійкість асфальтобетонну.

Під час вибору матеріалів і їх характеристик необхідно дотримуватися національних стандартів і вимог щодо якості. Наприклад, при використанні

мінерального порошку з відходів промисловості, важливо враховувати показник бітумоємності, який не повинен перевищувати 75 г, оскільки це може вплинути на довговічність асфальтобетонних шарів через слабку взаємодію бітуму з наповнювачем.

Таким чином, правильний вибір компонентів та їх характеристик є ключовим для успішного проектування асфальтобетонних сумішей, які відповідають вимогам якості та мають високу довговічність.

Для більш точного підбору зернового складу асфальтобетонної суміші було розроблено програмне забезпечення в середовищі Microsoft Excel. Ця програма дозволяє автоматизувати процес підбору зернового складу суміші, що значно спрощує та прискорює цей процес.

Композиція зернового складу мінеральної частини асфальтобетонної суміші має великий вплив на властивості асфальтобетону, такі як міцність, шорсткість, довговічність, стійкість, надійність та якість. Це особливо важливо при використанні вторинних відходів промисловості, які теоретично можуть використовуватися в асфальтобетоні.

Оптимізація зернового складу асфальтобетонної суміші є трудомістким процесом, проте використання комп'ютерного забезпечення, зокрема програмного забезпечення в середовищі Microsoft Excel, дозволяє значно спростити цей процес. Це дозволяє спеціалістам ефективно вирішувати завдання з підбору оптимального зернового складу, що відповідає вимогам якості асфальтобетону.

Розробка та впровадження програмного забезпечення для оптимізації зернового складу асфальтобетонної суміші в середовищі Microsoft Excel сприятиме розвитку теорії та практики проектування асфальтобетону, роблячи цей процес більш ефективним та доступним для спеціалістів.

Завдяки цьому можна вийти на найщільнішу можливу градацію зернового складу мінеральної частини асфальтобетонної суміші, яка називається максимальною градацією щільності або іноді кривою максимальної щільності Фуллера (W.B. Fuller), ці дані дозволяють підібрати оптимальне співвідношення

компонентів для виготовлення асфальтобетону з визначеним гранулометричним складом, що відповідає встановленим вимогам. Такий підхід гарантує високу якість та стабільність асфальтобетону, а також забезпечує довговічність асфальтобетонних шарів (Додаток А).

3.3.2 Результати випробування асфальтобетону

На основі визначеного зернового складу щебених матеріалів було встановлено таке співвідношення між компонентами, щоб гранулометричний склад суміші відповідав вимогам таблиці 7 ДСТУ Б В.2.7–119 [5] для призначеного складу асфальтобетонної суміші.

Для підбору зернового складу використовували такі матеріали:

– бітум нафтовий дорожній, марки БНД 70/100, що відповідає вимогам ДСТУ 4044 [87], результати випробувань наведені в таблиці 3.1;

– щебінь фракції 5 – 10 мм та 10 – 20 мм виробництва ТОВ «Малинський спецкар'єр», що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7–75 [3] результати випробувань наведені в таблиці 3.9;

– пісок із відсівів подрібнення гірських порід виробництва ТОВ «Малинський спецкар'єр», що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7–210 [4];

– вапняковий мінеральний порошок виробництва ТОВ «Скала–подільський спецкар'єр», що відповідає вимогам ДСТУ Б В 2.7–121 [6], результати випробувань наведені в таблиці 3.1;

– зола-винесення виробництва Бурштинської ТЕС, що відповідає вимогам ДСТУ Б В 2.7–121 [6], результати випробувань наведені в таблиці 3.9;

Таблиця 3.9 – Результати випробування щебеню

Ч. ч.	Найменування показників	Фактичні значення показників для фракції	
		5 – 10	10 – 20
1	Зерновий склад за повним залишком на контрольних ситах:		
	– 1,25 $D_{\text{найб}}$, % за масою	0	0
	– $D_{\text{найб}}$, % за масою	6	7
	– 0,5 ($D_{\text{найм}} + D_{\text{найб}}$), % за масою	60	62
	– $D_{\text{найм}}$, % за масою	95	93
2	Вміст пиловидних та глинистих часток, % за масою	0,6	0,3
3	Вміст глини у грудках, % за масою	0,0	0,0
4	Група за формою зерен	кубовидна	кубовидна
5	Марка щебеню за міцністю	1200	1200
6	Вміст зерен слабких порід, % за масою	0,6	0,4
7	Марка щебеню за стираністю	Ст-I	Ст-I
8	Марка щебеню за морозостійкістю	F300	F300
9	Дійсна щільність, г/см ³	2,80	2,80
10	Середня щільність, г/см ³	2,72	2,71

Результати підбору гранулометричного складу асфальтобетонних сумішей з використанням різних типів наповнювачів наведено в на рисунках 3.30 і 3.31.

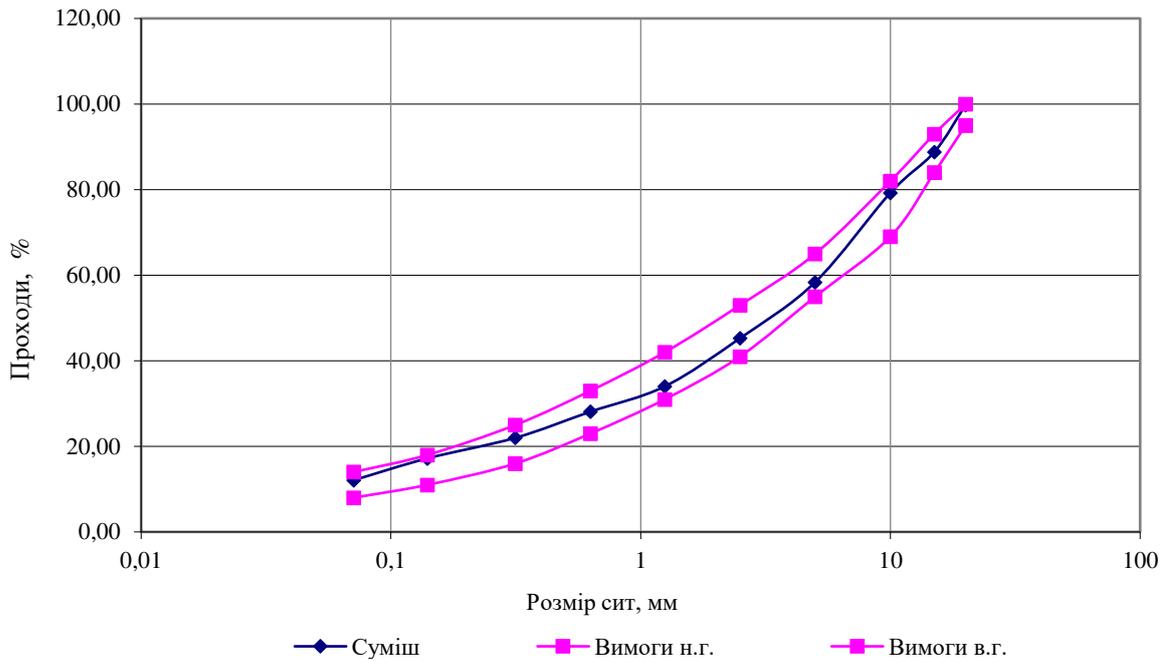


Рисунок 3.30 – Графічне зображення зернового складу асфальтобетонної суміші типу Б з використанням вапнякового мінерального порошку

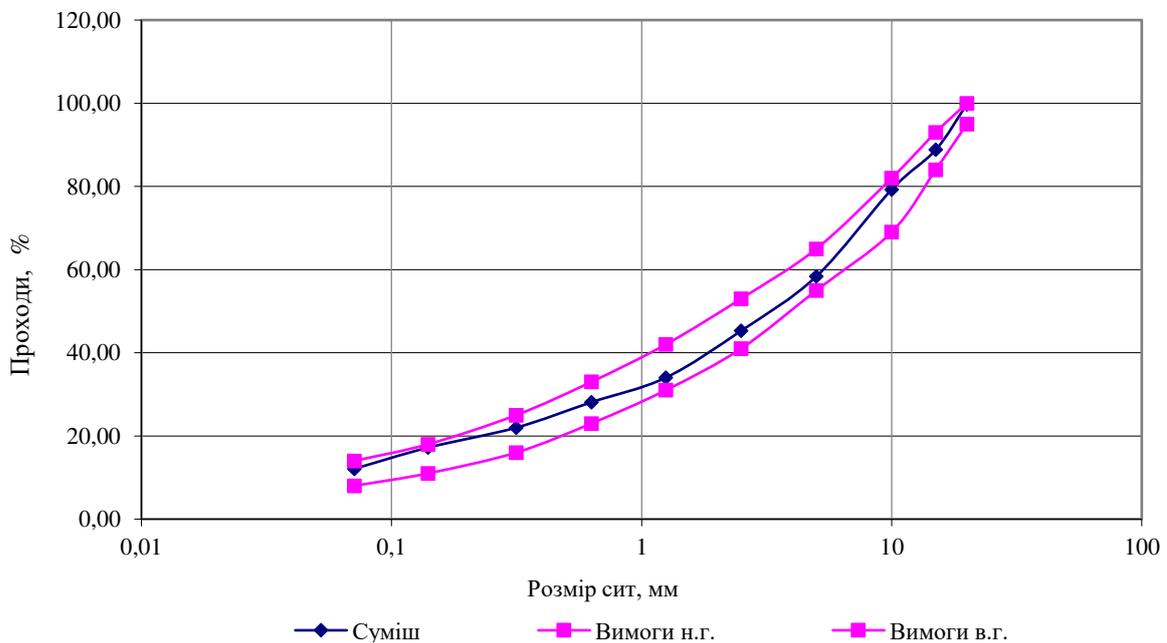


Рисунок 3.31 – Графічне зображення зернового складу асфальтобетонної суміші типу Б з використанням золи-винесення Бурштинської ТЕС

Установлені на основі температурно-в'язкісних залежностей температури виробництва та початку ущільнення асфальтобетонних сумішей становили

відповідно від 148 °С до 152,5 °С та від 139 °С до 143 °С. Ці дані дозволили належним чином налаштувати процес виготовлення асфальтобетонних сумішей, забезпечивши необхідний температурний режим для отримання оптимальних властивостей матеріалу.

Виробництво асфальтобетонних сумішей в лабораторії здійснювалося з дотриманням стандартної послідовності та змісту технологічних операцій згідно з ДСТУ Б В.2.7–319 [86]. Це забезпечувало відповідність виготовлених сумішей встановленим нормам та вимогам якості.

Результати підбору вмісту бітуму в асфальтобетонній суміші з використанням вапняку та золи-винесення наведено в таблицях 3.10 та 3.11. Випробування показали, що оптимальний вміст бітуму в асфальтобетонній суміші типу Б з вапняковим мінеральним порошком становить 6 % тоді як оптимальний вміст бітуму в асфальтобетонній суміші із золою-винесення становить 5,5 % за масою мінеральних матеріалів. При цьому асфальтобетони відповідали вимогам ДСТУ Б В.2.7–119[5] за всіма фізико-механічними показниками, що свідчить про їхню високу якість та відповідність встановленим стандартам.

Таблиця 3.10 – Результати підбору вмісту бітуму в асфальтобетонній суміші типу Б з вапняковим наповнювачем

Ч. ч.	Найменування показника, одиниця вимірювання	Результати випробувань асфальтобетону при вмісті бітуму, %			Вимоги ДСТУ Б В.2.7–119 (район А–2)
		5	5,5	6	
1	Середня густина, г/см ³	2,36	2,38	2,40	–
2	Водонасичення, % за об'ємом	3,4	3,1	2,1	не більше ніж 3,0
3	Границя міцності при стиску за температури 20 °С, МПа	3,5	3,7	4,3	не менше ніж 2,7
4	Границя міцності при стиску за температури 50 °С, МПа	1,5	1,6	1,8	не менше ніж 1,3

Таблиця 3.11 – Результати підбору вмісту бітуму в асфальтобетонній суміші типу Б з наповнювачем із золою-винесення

Ч. ч.	Найменування показника, одиниця вимірювання	Результати випробувань асфальтобетону при вмісті бітуму, %			Вимоги ДСТУ Б В.2.7–119 (район А–2)
		5	5,5	6	
1	Середня густина, г/см ³	2,36	2,39	2,41	–
2	Водонасичення, % за об'ємом	3,3	2,2	1,1	не більше ніж 3,0
3	Границя міцності при стиску за температури 20 °С, МПа	3,5	4,0	3,8	не менше ніж 2,7
4	Границя міцності при стиску за температури 50 °С, МПа	1,7	1,7	1,5	не менше ніж 1,3

З підібраним вмістом бітуму було виготовлено асфальтобетонні суміші з використанням вапняку та золою-винесення. Результати визначення фізико-механічних властивостей отриманих асфальтобетонів наведено в таблиці 3.12.

Таблиця 3.12 – Результати випробування асфальтобетонів

Ч. ч.	Найменування показника, одиниця вимірювання	Результати випробувань асфальтобетону отриманого з використанням		Вимоги ДСТУ Б В.2.7–119 (район А–2)
		вапняку з оптимальним вмістом бітуму 6 %	золи-винесення з оптимальним вмістом бітуму 5,5 %	
1	Середня густина, г/см ³	2,40	2,39	–
2	Водонасичення, % за об'ємом	2,1	2,2	не більше ніж 3,0
3	Границя міцності при стиску за температури 0 °С, МПа	9,9	10,5	не більше ніж 12,0
4	Границя міцності при стиску за температури 20 °С, МПа	4,3	4,0	не менше ніж 2,7
5	Границя міцності при стиску за температури 50 °С, МПа	1,8	1,7	не менше ніж 1,3
6	Коефіцієнт водостійкості експрес-методом	0,95	0,94	–

Результати проведених випробувань свідчать про те, що асфальтобетон з вапняковим мінеральним порошком має вищу середню густину в порівнянні з асфальтобетоном із золою-винесення (2,40 г/см³ проти 2,30 г/см³) та менше водонасичення (2,1 % проти 2,2 %).

Під час випробувань виявлено, що асфальтобетон з вапняковим наповнювачем відзначається меншою границею міцності при стиску за температури 0 °С. Однак, має більші границі міцності при стиску за температур 20 °С та 50 °С.

Зменшення середньої густини та збільшення водонасичення асфальтобетону із золю-винесення в порівнянні з асфальтобетоном з мінеральним порошком не суттєво впливає на його водостійкість і знаходиться в межах похибки експерименту. Варто відзначити, що склади асфальтобетону мають різну кількість бітуму на рівні 0,5 %, що свідчить про те, що використання золи-винесення в асфальтобетоні дозволить покращити екологічну ситуацію, а також зменшить витрати на матеріали. Важливо відзначити, що всі показники асфальтобетону з використанням золи-винесення відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.7–119 [5] для району А-2.

За результатами проведених досліджень встановлено, що асфальтобетон із золю-винесення за фізико-механічними показниками практично не поступається асфальтобетону з вапняковим мінеральним порошком.

Аналіз фізико-механічних показників асфальтобетону із золю-винесення засвідчив, що оптимальний вміст бітуму в складі асфальтобетонної суміші становить 5,5 %, а для вапняку – 6 %, що говорить про економічну доцільність використання золи-винесення для виготовлення асфальтобетону.

3.4 Визначення модуля пружності

При будівництві асфальтобетонних доріг, одним із ключових аспектів, який враховується, є міцність дорожнього одягу. Основним параметром, що визначає цей показник, є модуль пружності. Цей параметр вказує на здатність матеріалу відновлювати свою форму та розміри після впливу зовнішніх сил.

Модуль пружності має критичну роль у забезпеченні стійкості дорожнього одягу під час експлуатації. Наприклад, асфальтобетон, який є одним з

найпоширеніших матеріалів для дорожнього одягу, має високий модуль пружності, що робить його стійким до навантажень та деформацій.

Проте, властивості асфальтобетонного шару та його механічні характеристики можуть значно варіюватися в залежності від умов експлуатації та швидкості навантаження. Наприклад, дороги, які мають великий трафік вантажних автомобілів або піддаються частій ремонтній роботі, можуть вимагати більш міцного покриття з вищим модулем пружності для забезпечення довговічності та безпеки дорожнього руху.

Під час проектування дорожнього одягу, інженери враховують модуль пружності кожного шару, які використовуються, а також інші фактори, що можуть впливати на його міцність. Наприклад, температурні зміни, вологість ґрунту та частота руху транспортних засобів – усе це може впливати на стійкість та довговічність дорожнього одягу.

Для забезпечення оптимальної міцності дорожнього одягу, регулярні оцінки та перевірки стану покриття є невід'ємною частиною процесу дорожнього утримання. Це дозволяє вчасно виявляти будь-які пошкодження або деформації та проводити необхідні заходи для їх виправлення.

Узагальнюючи, модуль пружності є ключовим параметром у розрахунках міцності дорожнього одягу. Він визначає здатність матеріалу відновлювати свою форму та розміри після впливу зовнішніх сил і грає важливу роль у забезпеченні безпеки та довговічності дорожнього руху. Якісний розрахунок модуля пружності забезпечує дорожній мережі надійність та стійкість протягом тривалого часу [88].

Модуль пружності асфальтобетонів з різним видом наповнювачів визначали за моделлю М. Вітчака [89], перевірену в роботах вітчизняних та зарубіжних вчених [67, 90]:

$$\log E^* = -1,25 + 0,029p_{200} - 0,0018p_{200}^2 - 0,0028p_4 - 0,058V_a - 0,822 \frac{V_{\text{beff}}}{V_a + V_{\text{beff}}} + \frac{3,872 - 0,0021p_4 + 0,004p_{38} - 0,000071p_{38}^2 + 0,0055p_{34}}{1 + e^{(-0,603313 - 0,31335\log(f) - 0,393532\log(\eta))}} \quad (3.1)$$

де E^* – динамічний модуль пружності, 105 фунт на квадратний дюйм;

η – в'язкість в'язучого, 10^6 пз;

f – частота деформування, Гц;

p_{200} – повний прохід через сито з розміром отворів 0,075 мм, %;

p_4 – повний залишок на ситі з розміром отворів 4,76 мм, %;

p_{38} – повний залишок на ситі з розміром отворів 9,5 мм, %;

p_{34} – повний залишок на ситі з розміром отворів 19 мм, %;

V_a – залишкова пористість асфальтобетону, % за об'ємом;

V_{beff} – ефективний вміст бітуму, % за об'ємом.

В'язкість бітуму за різних температур визначали за залежністю [89]:

$$\log \eta = 10,5 - 2,26\log\Pi + 0,00389(\log\Pi)^2, \quad (3.2)$$

де Π – пенетрація бітуму за різної температури, визначена згідно з методикою ХНАДУ [91].

Згідно з цією методикою, за температур розм'якшеності бітуму глибина проникності голки складає $800 \times 0,1$ мм, а за температур крихкості – $1 \times 0,1$ мм. Між цими значеннями температур логарифмічна залежність в'язкості прямолінійна. Таким чином, знаючи температуру розм'якшеності та значення глибини проникності голки за температури 25 °С, можна визначити його пенетрацію за температури T за формулою:

$$\log\Pi_T = \frac{\log 800 - \log\Pi_{25}}{T_p - 25} \cdot (T - 25) + \log\Pi_{25}. \quad (3.3)$$

Був здійснений розрахунок з визначення модуля пружності за різних температур та різної частоти деформування, визначені на основі залежностей (3.2) та (3.3) в'язкість та penetрація за різних температур.

На основі встановлених залежностей в'язкості бітуму від температури, даних щодо гранулометричного складу асфальтобетону та його об'ємних властивостей, визначено модулі пружності асфальтобетону за частоти деформування 0,80 Гц та 1,59 Гц, що прирівнюються до швидкості руху автомобіля 50 км/год та 100 км/год відповідно. Результати визначень наведено в таблиці 3.13. Графічне зображення залежності логарифмів модуля пружності від температури зображено на рисунку 3.32 та 3.33.

Таблиця 3.13 – Залежності модуля пружності від температури

Температура	Результати визначення			
	асфальтобетону з вапняковим наповнювачем, МПа		асфальтобетону із золою-винесення, МПа	
	0,80 Гц	1,59 Гц	0,80 Гц	1,59 Гц
-10	14039	15105	14583	15690
0	9242	10206	9599	10601
10	5324	6057	5531	6291
20	2667	3125	2771	3246
30	1182	1418	1228	1473
40	485	589	504	612

Вищим значенням модуля пружності за температури 10 °С з чистотою деформування 0,8 Гц відзначається асфальтобетон із золою-винесення. Він є на 3,7 % вищим за модуль пружності асфальтобетону з вапняковим наповнювачем, а з чистотою деформування 1,59 Гц на 3,8 %.

З підвищенням температури залежність зміни модуля пружності асфальтобетону із золою-винесення залишається сталою. Це свідчить про те що, асфальтобетон із золою-винесення зі зменшеною кількістю бітуму на 0,5 % практично не відрізається від асфальтобетону з вапняковим наповнювачем.

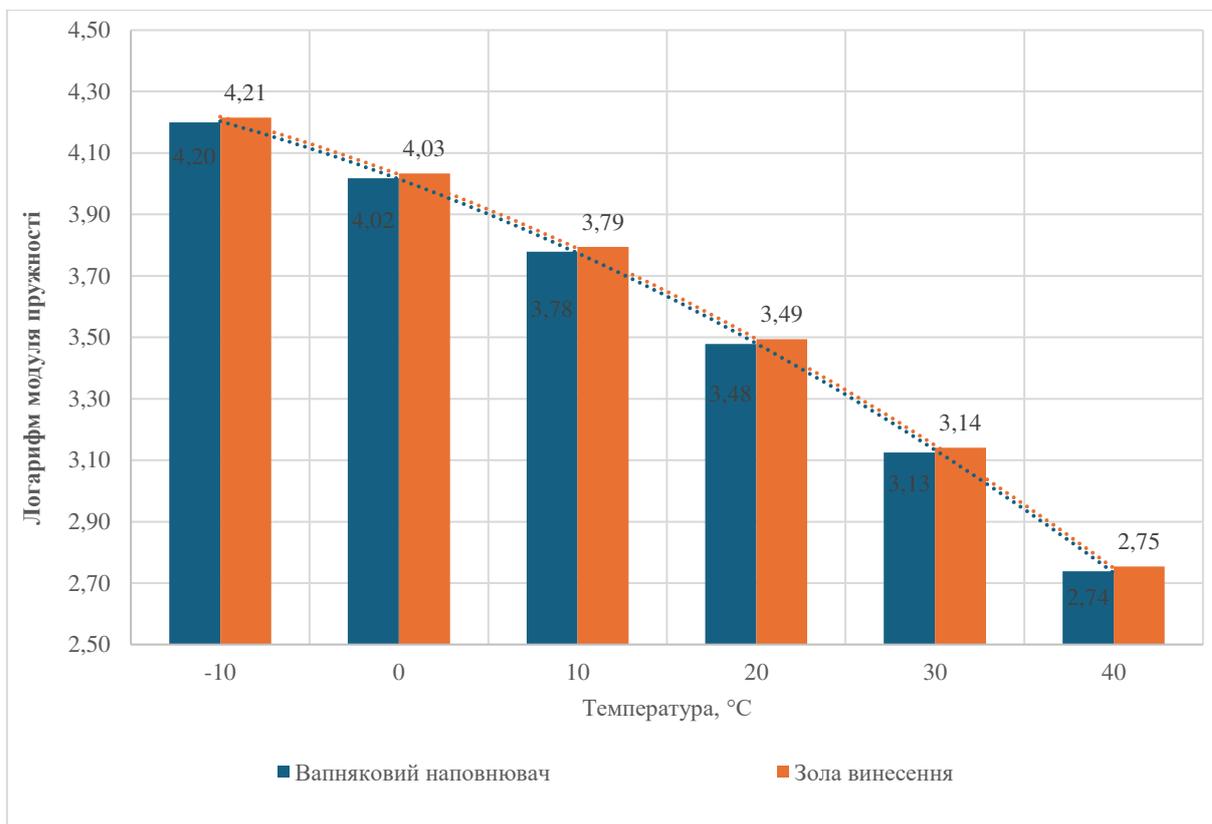


Рисунок 3.32 – Графічне зображення залежності логарифмів модуля пружності від температури зображено за частоти навантаження 0,80 Гц

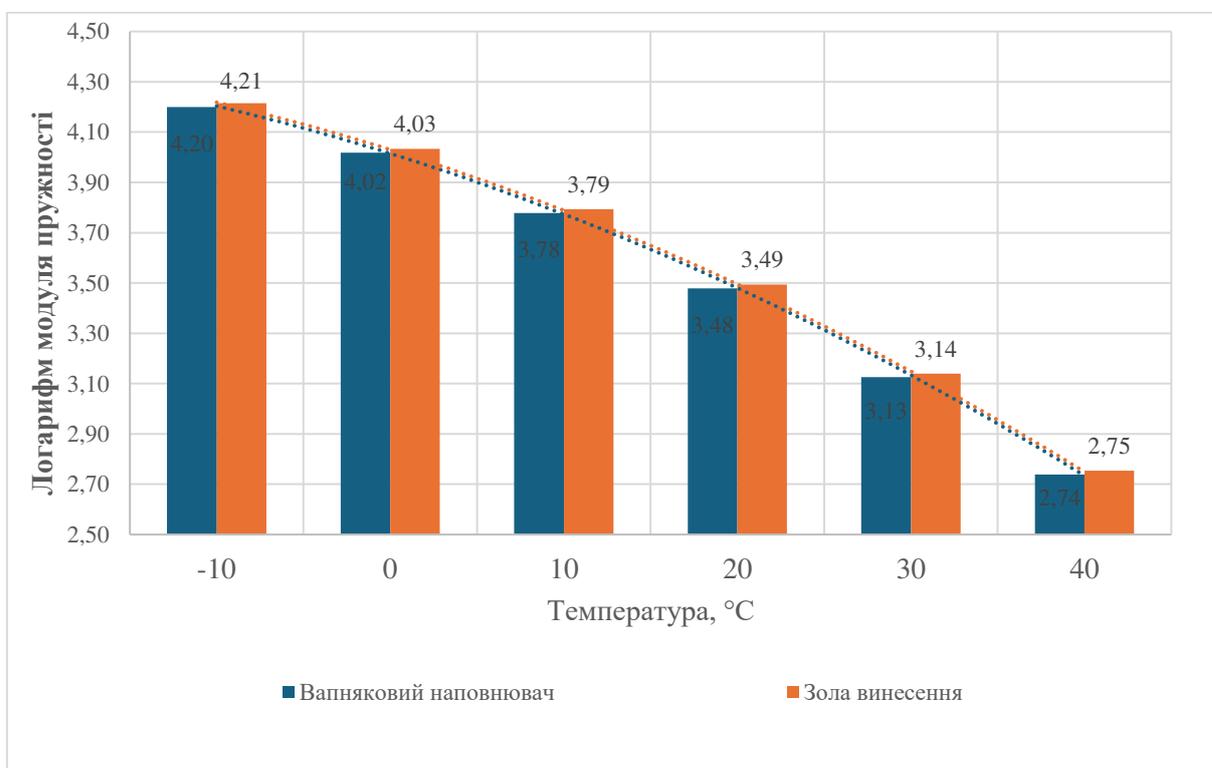


Рисунок 3.33 – Графічне зображення залежності логарифмів модуля пружності від температури зображено за частоти навантаження 1,59 Гц

У випадку зниження температур спостерігається відповідна тенденція. За температури мінус 10 °С, модуль пружності асфальтобетону із золю-винесення також на 3,7 % більший за модуль пружності асфальтобетону з вапняковим наповнювачем. Таким чином, досліджені асфальтобетони практично не відрізняються.

Зола-винесення, сприяє поліпшенню ущільнюваності асфальтобетонної суміші. Це дозволяє досягти значних переваг у будівництві асфальтобетонних доріг. За рахунок використання золи можна зменшити вміст бітуму у складі асфальтобетонної суміші, що призводить до зниження вартості асфальтобетону, а також зменшити кількість відходів від електрогенеруючих підприємств. Додавання золи-винесення дозволяє підвищити модуль пружності асфальтобетону, що робить його більш стійким до руйнування та зносу під впливом навантажень і погодних умов. В результаті асфальтобетон виготовлений з використанням золи-винесення, має покращену тривалість служби, а витрати на його експлуатацію знижуються, що є важливим фактором у плануванні і утриманні дорожньої інфраструктури.

3.5 Визначення ущільнюваності асфальтобетонної суміші

Одним із передумов проектування гарячої асфальтобетонної суміші є те, що щільність лабораторно ущільнених зразків, які використовуються для визначення оптимального вмісту бітуму, повинна наближатися до кінцевої щільності дорожнього покриття. Якщо гранична щільність асфальтобетону занадто низька, то довговічність такого матеріалу буде знижена, а якщо гранична щільність асфальтобетон занадто висока, то такий матеріал матиме тенденцію до випотівання або утворення колії. Кінцева щільність асфальтобетону при ущільненні в польових умовах практично завжди є на 1,5 % меншою, ніж щільність лабораторно ущільнених зразків. Це вказує на те, що зусилля лабораторного ущільнення занадто високі.

Концепція точки блокування була взята за основу для розроблення методики для порівняння технологічних властивостей асфальтобетону з різними типами наповнювачів. Завдяки цій методиці можна оцінити ущільнення асфальтобетонних сумішей з отриманням оптимальної залишкової пористості матеріалу.

Суть даної методики полягає у визначенні точки блокування або точки фіксації як перший оберт у блоці із трьох послідовних обертань однакової висоти, яким передують два блоки з двох обертань однакової висоти (кожне на 0,1 мм вище, ніж набір із трьох обертання), як показано на рисунку 3.34 і в таблиці 3.14 та порівняння кількості обертів необхідних в лабораторних умовах.

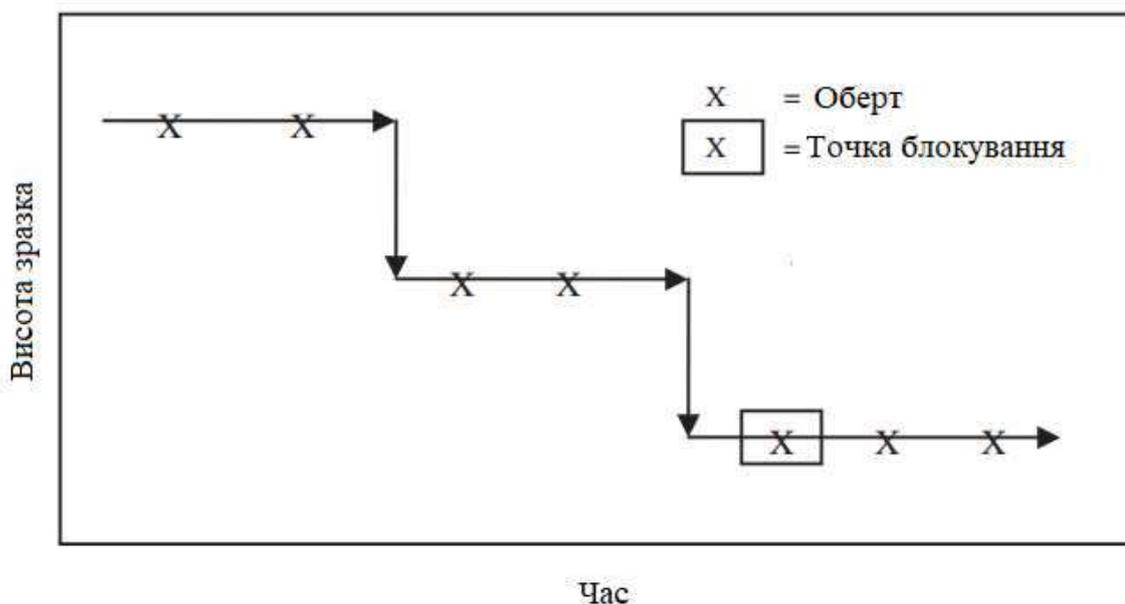


Рисунок 3.34 – Визначення точки блокування

Розроблену методику згідно з якою виконували випробування наведено в розділі 4.2. Результати випробування асфальтобетону наведені у таблиці 3.15.

Для проведення випробувань було підібрано мінеральний склад асфальтобетонної суміші згідно ДСТУ EN 13108–1 [92].

За результатами випробування було встановлено, що точка блокування асфальтобетонної суміші із золою-винесення знаходиться на 69 обертах гіратораного ущільнювача, а точка блокування асфальтобетонної суміші з вапняковим наповнювачем знаходиться на 74 обертах.

Таблиця 3.14 – Визначення точки блокування за кількістю обертів

Кількість обертів	Висота	Густина	Блоки
70	105.258	2341	1
71	105.215	2342	2
72	105.179	2342	1
73	105.139	2343	2
74	105.098	2344	1
75	105.054	2345	2
76	105.007	2346	3
77	104.973	2347	
78	104.940	2348	
79	104.897	2349	
80	104.867	2349	

Таблиця 3.15 – Результати випробування асфальтобетону відповідно до точки блокування

Матеріал		Асфальтобетон з вапняком		Асфальтобетон із золою-винесення	
		74	80	69	80
Кількість обертів		74	80	69	80
Очевидна густина крупного заповнювача фракції 8/16 мм, Мг/м ³	ρ_a	2,653	2,653	2,653	2,653
Очевидна густина крупного заповнювача фракції 4/8 мм, Мг/м ³	ρ_a	2,689	2,689	2,689	2,689
Очевидна густина крупного заповнювача фракції 2/4 мм, Мг/м ³	ρ_a	2,675	2,675	2,675	2,675
Очевидна густина дрібного заповнювача фракції 0/2 мм, Мг/м ³	ρ_a	2,676	2,676	2,676	2,676
Очевидна густина мінерального порошку, г/см ³	ρ_f	2,84	2,84	2,61	2,61
Очевидна густина бітуму, г/см ³	ρ_b	1,016	1,016	1,016	1,016
Об'ємна щільність асфальтобетону, Мг/м ³	ρ_{bssd}	2,380	2,385	2,397	2,407
Вміст крупного заповнювача фракції 8/16, %	ρ_a	35,0	35,0	35,0	35,0
Вміст крупного заповнювача фракції 4/8, %	ρ_a	19,0	19,0	19,0	19,0
Вміст крупного заповнювача фракції 2/4 мм, %	ρ_a	7,0	7,0	7,0	7,0
Вміст дрібного заповнювача фракції 0/2 мм, %	ρ_a	33,0	33,0	33,0	33,0
Вміст наповнювача, %	ρ_f	6,0	6,0	6,0	6,0
Вміст бітуму (понад 100 %), %	ρ_b	5,3	5,3	5,3	5,3

Кінець таблиці 3.15

Матеріал		Асфальтобетон з вапняком		Асфальтобетон із золою-винесення	
Вміст бітуму (в 100 %), %		5,03	5,03	5,03	5,03
Розрахункова максимальна щільність суміші мінеральних матеріалів, Мг/м ³	ρ_a	2,680	2,680	2,666	2,666
Середня густина мінеральної частини, Мг/м ³	ρ_m^M	2,260	2,265	2,276	2,286
Максимальна щільність асфальтобетонної суміші, Мг/м ³	ρ_{mc}	2,476	2,476	2,465	2,465
Пористість мінеральної частини, % за об'ємом	$V_{пор}^M$	15,65	15,47	14,62	14,27
Вміст пор у мінеральному заповнювачі, % за об'ємом	VMA	15,65	15,47	14,62	14,27
Залишкова пористість, % за об'ємом	V_m	3,9	3,7	2,7	2,3
Різниця між залишковою пористістю та водонасиченням, %		2,6	1,9	1,5	1,4
Відсоток пор, заповнених в'язучим, % за об'ємом		11,8	11,8	11,9	11,9
Відсоток пор, заповнених в'язучим, %	VFB	75,3	76,4	81,2	83,6

Тобто можна стверджувати що асфальтобетонна суміш із золою-винесення ущільнюється швидше ніж асфальтобетонна суміш з стандартним наповнювачем. Також встановлено, що об'ємна густина асфальтобетону із золою-винесення при меншій кількості обертів є більшою і складає 2,397, а в асфальтобетоні з вапняковим наповнювачем – 2,380.

Розрахунковим методом визначено залишкову пористість зразків асфальтобетону та встановлено, що асфальтобетон із золою-винесення отриманий за 69 обертів гіраторного ущільнювача має нижчу залишкову пористість ніж асфальтобетон з вапняковим наповнювачем. Що свідчить про можливість зменшення бітуму в асфальтобетоні із золою-винесення.

Висновки до розділу 3

1. Встановлено, що досліджувані золи-винесення придатні для використання в асфальтобетоні як наповнювачі відповідно до національних

стандартів відповідно до неактивованого мінерального порошку марки І та мають не суттєві відмінності від стандартного вапнякового наповнювача.

2. Визначено атмосферостійкість асфальтобетонів із золю-винесення. Таким чином, всі досліджувані наповнювачі може бути використано для виробництва асфальтобетонних сумішей.

3. Встановлено, що оптимальний вміст бітуму в складі асфальтобетонної суміші із золю-винесення становить 5,5 %, а для вапняку – 6 %, що говорить про економічну доцільність використання золи-винесення для виготовлення асфальтобетону.

4. Встановлено, що розрахунковий модуль пружності асфальтобетону із золю-винесення практично не відрізняються від асфальтобетону з вапняковим наповнювачем. Додавання золи-винесення дозволяє підвищити модуль пружності асфальтобетону, що робить його більш стійким до руйнування та зносу під впливом навантажень і погодних умов. У результаті асфальтобетон виготовлений з використанням золи-винесення, має покращену тривалість служби, а витрати на його експлуатацію знижуються, що є важливим фактором у плануванні і утриманні дорожньої інфраструктури.

5. Зола-винесення, сприяє поліпшенню ущільнюваності асфальтобетонної суміші. Це дозволяє досягти значних переваг у будівництві асфальтобетонних доріг. За рахунок використання золи можна зменшити вміст бітуму у складі асфальтобетонної суміші, що призводить до зниження вартості асфальтобетону, а також зменшити кількість відходів від електрогенеруючих підприємств.

Результати досліджень розділу викладено у наступних публікаціях: [69, 81, 88].

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Техніко-економічне обґрунтування доцільності застосування асфальтобетонних шарів із асфальтобетону із золою-винесення

При впровадженні нових матеріалів і технологій важливо базуватися на результатах їх техніко-економічного обґрунтування. Техніко-економічне обґрунтування проектних рішень включає два аспекти аналізу: технічний і економічний. У стратегії розвитку та утримання мережі автомобільних доріг України важливою складовою є заходи щодо впровадження нових або удосконалення існуючих матеріалів і технологій у цьому напрямку. Одним з таких можливих варіантів є використання асфальтобетону із золою-винесення.

Переваги використання вторинних відходів промисловості пов'язані з здешевленням матеріалів для будівництва та захистом навколишнього середовища, в світі вже багато років працює так звана циркулярна економіка або економіка замкненого циклу. Основою цієї моделі є раціональне використання ресурсів та їх відновлення, концепція базується на трьох принципах – «3R»:

- скорочення споживання (**reduce**);
- повторне використання (**reuse**);
- переробка (**recycle**).

У травні 2018 року Європейський союз оновив пакет документів у сфері управління відходами (Circular Economy Package). Директиви пакету, спрямовані на: зменшення споживання природних матеріалів, скорочення обсягів утворення відходів, максимальне повторне застосування відходів та їх переробка.

Нажаль в Україні до сьогодні спостерігається низький рівень заміщення первинних природних ресурсів відходами чи побічними продуктами виробництва.

Використання асфальтобетонів із золою-винесення передбачає ряд переваг. Згідно з оглядом літературних джерел, переваги поділяють на дві групи:

- екологічні;
- економічні.

Екологічні переваги включають зменшення накопичення відходів промисловості, що допомагає зменшити негативний вплив на екосистему тваринного і рослинного світу, а також зменшення забруднення поверхневих та підземних вод. Використання золи-винесення також призводить до зменшення використання природних матеріалів, що є важливим кроком у напрямку сталого розвитку та збереження навколишнього середовища.

Економічні переваги включають витрати, пов'язані з ціною матеріалів, вартість виробництва суміші та вартість влаштування шару. Оскільки технологія виготовлення суміші не змінюється, а ущільнення асфальтобетонної суміші із золою-винесення відбувається швидше, ніж звичайна асфальтобетонна суміш, слід порівнювати техніко-економічну доцільність асфальтобетону із золою-винесення зі стандартною асфальтобетонною сумішшю, такою як АСГ.Др.Щ.Б.НП.І.БНД 70/100.

Такий аналіз дозволяє з'ясувати, чи варто переходити на використання асфальтобетону із золою-винесення з економічної точки зору, а також на скільки вагомі переваги можуть бути отримані внаслідок цього переходу.

Для визначення ефективності заміни стандартного мінерального порошку на золу-винесення проводилося порівняння приведених витрат на вироблення 100 тонн асфальтобетонної суміші на асфальтобетонному заводі та витрат на улаштування асфальтобетонного шару товщиною 5 см з асфальтобетонної суміші асфальтоукладачем з розрахунку на 1000 м² асфальтобетонного шару.

Розглядати один з основних ресурсів, як витрати паливних матеріалів на вироблення на асфальтобетонному заводі 1 т суміші недоцільно так як технологія приготування асфальтобетонної суміші залишається сталою.

Для визначення витрат матеріалу на укладання шару дорожнього одягу товщиною 5 см із асфальтобетонної суміші асфальтоукладачем з розрахунку на 1000 м², були використані дані, зазначені в «Галузеві розрахунки витрат ресурсів на ремонтно-будівельні роботи на автомобільних дорогах загального

користування» [93].

Витрату матеріалу m для влаштування шару асфальтобетону було розраховано залежно від об'ємної густини відповідно до лабораторних результатів випробування та об'єму влаштування за формулою:

$$m = \rho \cdot V, \quad (4.1)$$

де ρ – об'ємна густина асфальтобетону, г/см³;

V – об'єм, потрібний для влаштування шару дорожнього покриття, м³.

Відповідно до зведених даних цін на дорожньо–будівельні матеріали, які були отримані від служб відновлення та розвитку інфраструктури України в областях на грудень 2023 року, та використанням калькулятора розрахунку вартості вироблення асфальтобетонної суміші який знаходиться на сайті ДП «Національний інститут розвитку інфраструктури», були розраховані витрати на матеріали для вироблення 100 тонн асфальтобетонної суміші типу АСГ.Др.Щ.Б.НП.І.БНД 70/100, а також АСГ.Др.Щ.Б.НП.І.БНД 70/100 зі повною заміною вапнякового мінерального порошку на золу-винесення (таблиця 4.1 і таблиця 4.2). Зерновий склад асфальтобетонної суміші було визначено на основі наявних та використовуваних раніше лабораторних випробувань, які були наведені в підборі зернового складу в розділі 3 даної роботи.

Таблиця 4.1 – Вартість матеріалів для вироблення 100 т АСГ.Др.Щ.Б.НП.І.БНД 70/100

Позначення матеріалу	Од. виміру	К-сть од. виміру	Ціна за од., грн	Сума, грн
Крупний заповнювач (щебінь) фракції понад 10 мм до 20 мм включно	кг	18868	0,39	7358,52
Крупний заповнювач (щебінь) фракції понад 5 мм до 10 мм включно	кг	18868	0,41	7731,88
Дрібний заповнювач (пісок) фракції понад 0 мм до 5 мм включно	кг	51887	0,33	17122,71
Мінеральний порошок	кг	4717	1,67	7877,39
Бітум нафтовий дорожній БНД 70/100	кг	5660	29,67	167932,2
Разом	грн			208026,7

Таблиця 4.2 – Вартість матеріалів для вироблення 100 т АСГ.Др.Щ.Б.НП.І.БНД 70/100 із золою-винесення

Позначення матеріалу	Од. виміру	К-сть од. виміру	Ціна за од., грн	Сума, грн
Крупний заповнювач (щебінь) фракції понад 10 мм до 20 мм включно	кг	18958	0,39	7393,62
Крупний заповнювач (щебінь) фракції понад 5 мм до 10 мм включно	кг	18958	0,41	7772,78
Дрібний заповнювач (пісок) фракції понад 0 мм до 5 мм включно	кг	52132	0,33	17203,6
Зола-винесення	кг	4739	0,01	0
Бітум нафтовий дорожній БНД 70/100	кг	5213	29,67	154669,71
Разом	грн			187039,71

Під час калькулювання вартості витрат матеріалу на укладання шару дорожнього одягу товщиною 5 см з асфальтобетону типу АСГ.Др.Щ.Б.НП.І.БНД 70/100 асфальтоукладачем з розрахунку на 1000 м² витрата матеріалу, згідно з [93], становить 121,6 тонн. Витрата матеріалу була визначена на основі виконаних експериментальних досліджень з підбору зернового складу.

Вартість матеріалів для вироблення суміші з використанням золи-винесення зменшується приблизно на 10,5 % (згідно з даними таблиць 4.1, 4.2). Загальна вартість виготовлення 100 тонн суміші на асфальтобетонному заводі, при продуктивності 160 тонн/год, враховуючи ПДВ, зменшується на 7 % і становить: для АСГ.Др.Щ.Б.НП.І.БНД 70/100 – **4769,17 грн/т**; для АСГ.Др.Щ.Б.НП.І.БНД 70/100 із золою-винесення – **4441,76 грн/т**.

Тобто, можна підрахувати, що вартість матеріалу на улаштування дорожнього одягу товщиною 5 см з розрахунку на 1000 м² становить:

- для АСГ.Др.Щ.Б.НП.І.БНД 70/100 – **579931,71 грн**;
- для АСГ.Др.Щ.Б.НП.І.БНД 70/100 із золою-винесення – **540118,1 грн**.

На основі розрахованих даних побудовано порівняльне графічне зображення витрати на закупівлю матеріали (рисунок 4.1), графік загальних витрат на виготовлення 100 т суміші (рисунок 4.2) та вартість матеріалу для асфальтобетонної суміші, потрібного для влаштування 1000 м²

асфальтобетонного шару товщиною 5 см (рисунок 4.3).

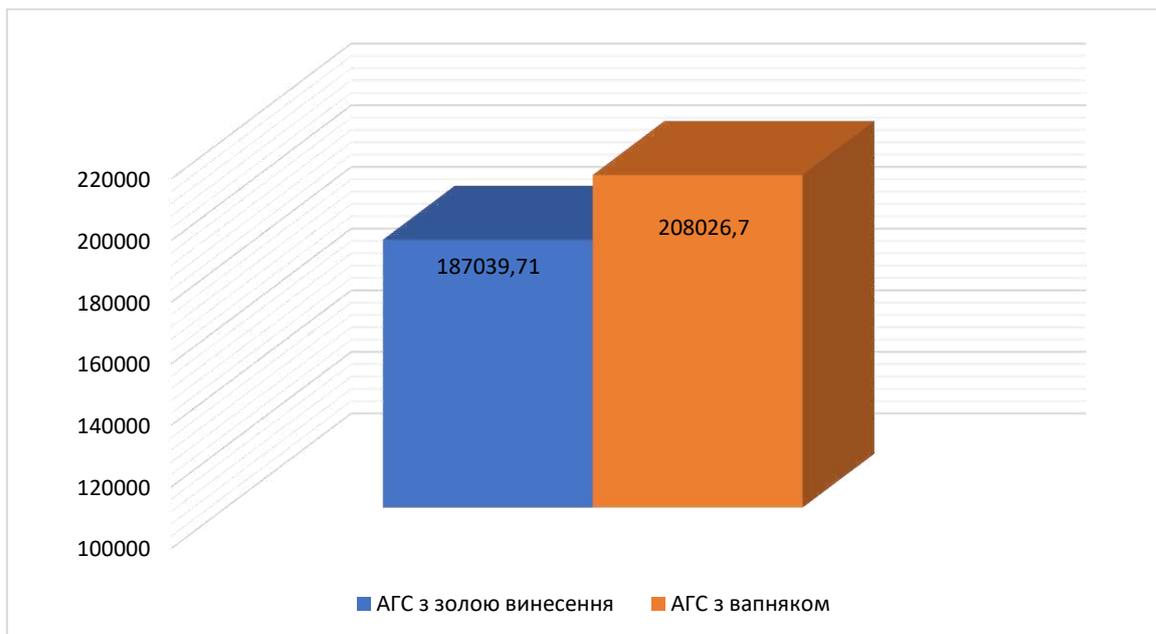


Рисунок 4.1 – Порівняння вартості витрат на закупівлю матеріалів для вироблення та влаштування дорожнього шару з певного матеріалу (грн)

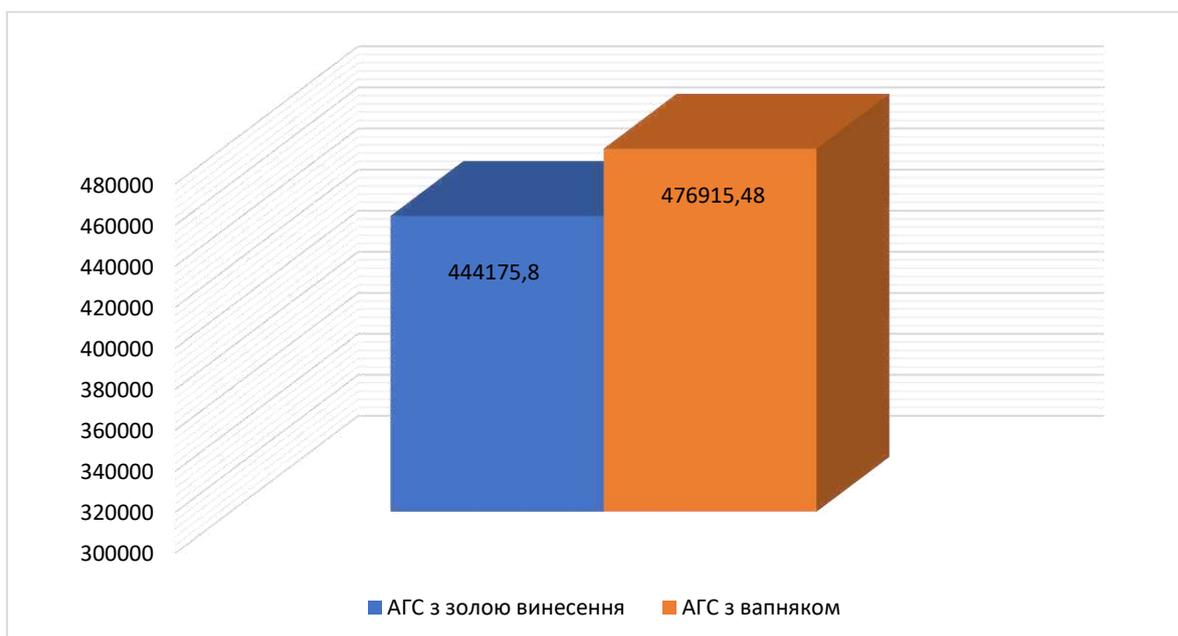


Рисунок 4.2 – Порівняння загальних витрат на виготовлення 100 т суміші (грн)

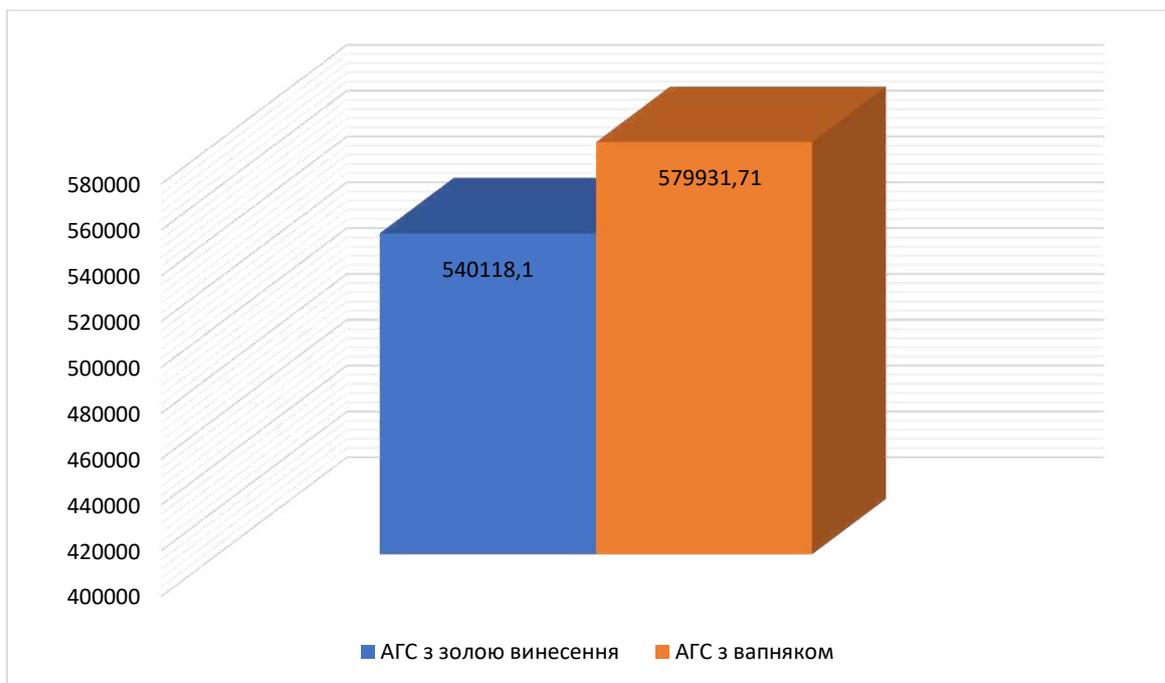


Рисунок 4.3 – Порівняння вартості матеріалу для асфальтобетонної суміші, потрібного для влаштування 1000 м² асфальтобетонного шару товщиною 5 см

Дані графіки свідчать, що під час порівняння вартостей самого матеріалу для виготовлення суміші та загальної вартості 100 тонн суміші, заміна стандартного наповнювача на золу-винесення та зменшення кількості бітуму у асфальтобетонній суміші із золою-винесення робить її вигіднішою на 10,5 %.

Завдяки вказаним економічним факторам, таким як матеріали (зерновий склад), вартість суміші, витрата матеріалу для влаштування, зменшення екологічних витрат від складування золівідходів, впровадження асфальтобетону із золою-винесення в Україні відкриває можливість ремонтувати старі та будувати нові асфальтобетонні дороги за більш вигідними цінами. Зекономлені кошти можна направити на відбудову країни в після воєнний час.

4.2 Методика визначення ущільнюваності асфальтобетонної суміші

4.2.1 Загальні поняття

Одним із передумов проектування гарячої асфальтобетонної суміші є те, що щільність лабораторно ущільнених зразків, які використовуються для

визначення оптимального вмісту бітуму, повинна наближатися до кінцевої щільності дорожнього покриття. Якщо гранична щільність асфальтобетону занадто низька, то довговічність такого матеріалу буде знижена, а якщо гранична щільність асфальтобетон занадто висока, то такий матеріал матиме тенденцію до випотівання або утворення колії. Кінцева щільність асфальтобетону при ущільненні в польових умовах практично завжди є на 1,5 % меншою, ніж щільність лабораторно ущільнених зразків. Це вказує на те, що зусилля лабораторного ущільнення занадто високі.

Система проектування складу суміші Supergravel враховує різні умови руху та навколишнього середовища. Одним із головних устаткувань в цій системі Supergravel займає гіраційний ущільнювач Supergravel. Гіраційний ущільнювач використовується для ущільнення підібраних асфальтобетонних сумішей до проектної кількості обертань у лабораторії, щоб дозволити оцінити об'ємні властивості ущільненого зразка. Оцінені об'ємні властивості включають пористість, порожнечі в мінеральному заповнювачі, порожнечі заповнені бітумом, і співвідношення мінерального порошку до ефективного вмісту бітуму.

Для перевірки швидкості ущільнення включено два додаткові параметри: щільність при початковій кількості обертань ($N_{initial}$) і щільність при максимальній кількості обертань ($N_{maximum}$). Передбачається, що лабораторна проектна кількість залишкових пор пов'язана з кінцевою щільністю асфальтобетону. Фізико-механічні характеристики асфальтобетону на пряму залежать від конструкції дорожнього одягу та якості будівництва.

Міністерство транспорту штату Іллінойс розробило альтернативу N_{design} , яка називається концепцією «точки блокування», щоб запобігти надмірному ущільненню та подальшій руйнації заповнювача в асфальтобетонній суміші [94]. Точку блокування, визначену як обертання, при якому заповнювачі «з'єднується» разом, а подальше ущільнення призводить до руйнації заповнювача та дуже невеликого додаткового ущільнення, порівнювали з кривою зростання, проведеною для визначення максимальної кількості проходів котка по дорозі перед тим, як збільшення щільності на місці нівелюється або зменшується.

Було відзначено, що суміші не ущільнюються з однаковою кількістю проходів по дорозі, оскільки кожна суміш відрізняється. Прокатку було зупинено на піку щільності до того, як відбулася надмірна руйнація заповнювача. Концепція точки блокування була розроблена на основі порівняння даних Marshall і Superpave за три роки та кривих зростання поля [95]. Спочатку точка блокування в Іллінойсі була визначена як перше обертання в наборі з трьох обертань однакової висоти, якому передував один набір з двох обертань однакової висоти (кожне на 0,1 мм вище, ніж набір із трьох обертань). Вважалося, що точка блокування вказує на розвиток деякого ступеня зчеплення грубого заповнювача і пов'язана із щільністю, досягнутою на кривих зростання поля. Стандартне відхилення кількості поворотів, що дорівнює точці блокування, було менше, ніж стандартне відхилення числа поворотів для отримання 4-відсоткових повітряних порожот.

Ваврик і Карпентер [96] уточнили визначення точки блокування як перше обертання в першій появі трьох обертань однакової висоти, яким передують два набори з двох обертань однакової висоти (кожне на 0,1 мм вище, ніж набір із трьох обертань), як показано на рисунку 4.4.

Даний метод дозволяє визначити закінчення ущільнюваності асфальтобетонних сумішей з використанням гіраторного ущільнювача.

Суть методики полягає в тому, що зразок асфальтобетонної суміші поміщають у циліндричну форму, обмежену вставками, і витримують за постійної температури в межах визначених допусків упродовж усього часу випробування. Зразок асфальтобетонної суміші ущільнюють згідно з ДСТУ EN 12697-31 [97] за 100 обертів, визначаючи висоту зразка асфальтобетонної суміші після кожного оберту. За результатами оцінювання зміни товщини зразка асфальтобетонної суміші визначають точку блокування, що є характеристикою ущільнюваності асфальтобетонної суміші.

4.2.2 Устаткування

Випробувальний прилад згідно з ДСТУ EN 12697–31 [97], здатний під час випробування підтримувати швидкість обертання 32 об/хв точністю до ± 10 %.

Металеві форми з твердістю поверхні більше ніж 48 HRC згідно з ДСТУ EN ISO 6508–1 [98]. Металеві форми повинні мати шорсткість R_a менше ніж 1 мкм згідно з ДСТУ EN ISO 4287 [99] або початкову шорсткість менше ніж 0,8 мкм згідно з ДСТУ EN ISO 4287 [99], а також не мати дефектів, подряпин чи слідів, видимих неозброєним оком. Під час ущільнення у зоні контакту зі зразком асфальтобетонної суміші металеві форми повинні мати внутрішній діаметр $(100,0 \pm 0,1)$ мм або $(150,0 \pm 0,1)$ мм. Товщина стінок форми повинна становити більше ніж 7,5 мм.

Круглі металеві вставки, які мають рівну поверхню контакту в межах $\pm 0,1$ мм. Твердість поверхні металевих вставок повинна бути більше ніж 55 HRC згідно з ДСТУ EN ISO 6508–1 [98]. Круглі металеві вставки повинні мати шорсткість R_a менше ніж 1 мкм згідно з ДСТУ EN ISO 4287 [99] або початкову шорсткість менше ніж 0,8 мкм згідно з ДСТУ EN ISO 4287 [99], а також не мати дефектів, подряпин чи слідів, видимих неозброєним оком. Форма круглих металевих вставок повинна відповідати кінетиці руху та діаметру, що призводить до утворення проміжку між вставкою та формою в межах від 0,1 мм до 0,6 мм.

Прилад для підрахування кількості обертів з точністю до одного оберту та вентильована сушильна шафа для нагрівання форми, металевих вставок та зразка асфальтобетонної суміші з точністю згідно з ДСТУ EN 12697–38 [100].

Ваги, здатні вимірювати масу форми та зразка асфальтобетонної суміші з точністю згідно з ДСТУ EN 12697–38 [100]. Та прилад для вимірювання температури всередині бітумомінеральної суміші з точністю згідно з ДСТУ EN 12697–38 [100].

4.2.3 Виготовлення зразків

Масу зразка асфальтобетонної суміші M , який потрібно помістити у форму, обчислюють, залежно від очікуваної об'ємної густини зразка асфальтобетону та його висоти.

У разі використання асфальтобетонної суміші з найбільшим номінальним розміром зерен до 20 мм ущільнення виконують у формі діаметром $(100,0 \pm 0,1)$ мм, а висота зразка асфальтобетону повинна становити (100 ± 5) мм, у разі використання асфальтобетонної суміші з найбільшим номінальним розміром зерен 40 мм ущільнення виконують у формі діаметром $(150,0 \pm 0,1)$ мм, а висота зразка асфальтобетону повинна становити (150 ± 5) мм.

Для проведення випробування використовують асфальтобетонну суміш, вироблену в лабораторії згідно з ДСТУ EN 12697–35 [101]. За потреби для проведення випробування може бути використано асфальтобетонну суміш, вироблену на асфальтобетонному заводі, та відібрану згідно з ДСТУ EN 12697–27 [102].

Форми та вставки поміщають не менше ніж на 2 год у сушильну шафу, розігріту до температури ущільнення ± 5 °С. Поверхню форм змащують, наносячи пензлем розчин гліцерину або силіконове мастило. Асфальтобетонну суміш нагрівають до температури ущільнення, не перевищуючи цієї температури більше ніж на 20 °С, за найменший необхідний час нагрівання, щоб запобігти додатковому старінню пухкої асфальтобетонної суміші. За потреби перемішують асфальтобетонну суміш вручну, щоб звести до мінімуму можливе розшарування, зважують форму та вставки, засипають у форму зразок асфальтобетонної суміші, використовуючи лійку, за один прийом і зважують форму та вставки з асфальтобетонною сумішшю у формі, щоб отримати задану масу асфальтобетонної суміші у формі M з точністю зважування до 0,1 %. Вимірюють температуру суміші в центрі форми. Якщо температура на 5 °С нижча за температуру ущільнення, наповнену форму та вставки треба покласти в сушильну шафу, розігріту до температури ущільнення ± 5 °С на 30 хв — 2 год.

4.2.4 Проведення випробування

Попередня напруга має бути в межах від 20 кПа до 382 кПа для зразків діаметром 100 мм або в межах від 8 кПа до 150 кПа включно — для зразків діаметром 150 мм.

Напруга має відповідати положенням додатка А чи В ДСТУ EN 12697–31 [97]. Напругу визначають як силу F , поділену на поперечний переріз зразка. Кут нахилу має відповідати положенням додатка В ДСТУ EN 12697–31 [97]. Швидкість обертання під час випробування повинна становити 32 об/хв з точністю до ± 10 %.

Температура ущільнення має відповідати ДСТУ EN 12697–35 [101] залежно від марки бітуму.

4.2.5 Ущільнення

За температури в межах температури ущільнення ± 5 °С форму із зразком асфальтобетонної суміші та вставкою поміщають у випробувальний прилад. Коли механічна головка торкається верхньої вставки, розпочинають обертання. Навантаження F і кут нахилу φ прикладають за першого обертання.

Не перериваючи обертання, вимірюють висоту зразка h з точністю до $\pm 0,1$ мм після кожного оберту, із зупинкою після завершення 100 обертів.

4.2.6 Визначення точки блокування

Отримані результати визначення товщини зразка вносять в таблицю та визначають точку блокування як перший оберт в блоці з трьох послідовних обертань за яких висота зразка асфальтобетонної суміші зменшується менше ніж на 0,1 мм, яким передують два блоки з двох обертань за яких висота зразка асфальтобетонної суміші зменшується менше ніж на 0,1 мм, як зображено на рисунку 4.4.

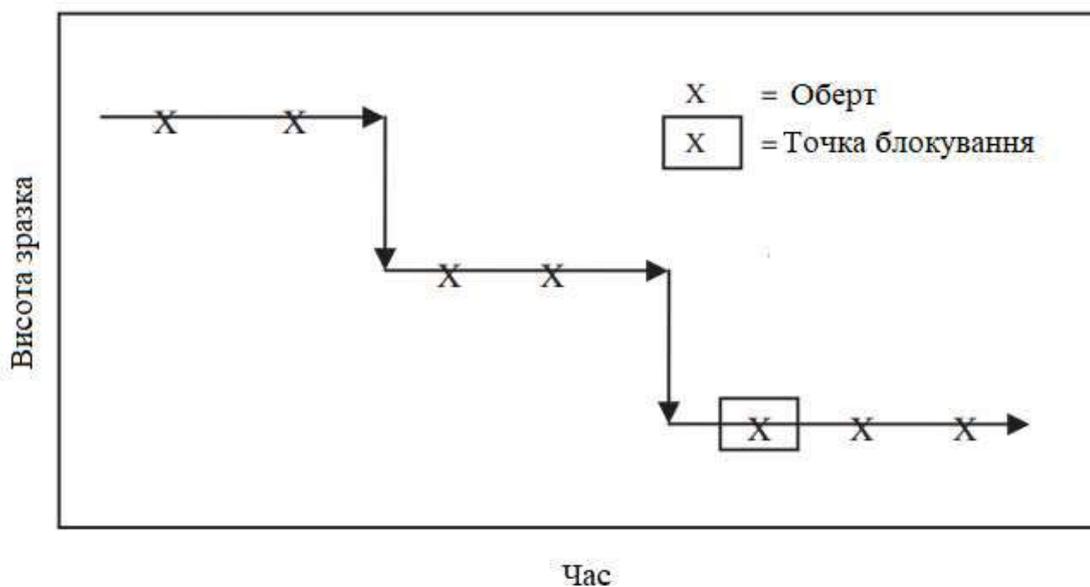


Рисунок 4.4 – Визначення точки блокування

Результати випробування з визначення ущільнюваності асфальтобетонної суміші подають як кількість обертів за якої досягають точки блокування.

4.3 Технологія вироблення асфальтобетонної суміші із золю-винесення в якості наповнювача

Приготування асфальтобетону з використанням золи-винесення як наповнювач істотно не відрізняється від приготування традиційного асфальтобетону. Підготовка мінеральних матеріалів відбувається за традиційною технологією, з переміщенням з штабелів до розподільних бункерів і подальшим нагріванням, перемішуванням та відвантаженням, єдиною відмінністю є доставка золи-винесення до місця розташування АБЗ і розподільних бункерів не зі штабелів, а з тари BigBag.

У свою чергу переміщення фракціонованого матеріалу (піску з відсіву дроблення, щебню), у розподільчі бункери відбувається за допомогою фронтального навантажувача. Варто зазначити, що при транспортуванні мінеральних матеріалів необхідно стежити за поділом дрібних і великих заповнювачів при скочуванні до основи конуса, щоб уникнути так званої сегрегації, вона повинна бути мінімальною.

За забезпечення рівномірного надходження мінеральних матеріалів та подальшого нагріву та в залежності від рецепту об'ємного дозування відповідають, живильники-дозатори та накопичувальні бункери. На першому етапі дозування інертних матеріалів відбувається за допомогою шиберної заслінки бункера-живильника (грубе дозування).

Більш точне дозування мілких фракцій щебеневих матеріалів відбувається за рахунок змінної швидкості обертового приводу живильника. Для забезпечення мінеральними матеріалами живильників-дозаторів, необхідний постійний контроль кількості та якості інертних матеріалів.

Сушіння інертних матеріалів відбувається в сушильному барабані, де відбувається нагрівання до робочих температур, при яких забезпечується максимально повне обволікання, тобто покриття органічним в'язучим частинок кам'яних матеріалів з мінімальною зміною структурно-механічних і хімічних властивостей, які можуть протікати при надмірно високих температурах, таких як старіння бітуму, зменшення в'язкості, збільшення крихкості і т.д. Вологість має перевищувати 1 %. Температура контролюється температурними датчиками, розташованими у вузлах АБЗ, яка залежить від марки бітуму та представлені в національних стандартах.

При виготовленні органомінеральних композицій, слід враховувати, що при технологічних операціях після висушування в сушильному барабані температура кам'яних інертних матеріалів знижується і відбувається охолодження мінерального кістяка. Зниження температури інертних матеріалів залежить від температури навколишнього середовища та швидкості вітру. Залежно від цих двох факторів необхідно внести коригування температурних режимів нагрівання кам'яних матеріалів. Для цього необхідно на початку робочої зміни зробити 5–6 пробних сухих замісів без додавання органічного в'язучого, з подальшим вивантаженням в кузов самоскида та визначенням температури сухого замісу. Після внесення необхідних коригувань температурних режимів виготовлення асфальтобетону, інертні матеріали з кузова автосамоскида вивантажують штабелі мінеральних матеріалів. Технологія приготування

асфальтобетону полягає у наступних етапах, представлених на рис. 4.5: доставка та складування мінеральних матеріалів та подальше транспортування до місця дозування та нагріву (1,2); попереднє дозування та подача мінеральних матеріалів у сушильний барабан просушування, сортування за фракціями та нагрівання інертних матеріалів (3–8); складування в силосах та підготовка мінерального порошку для його подальшого використання (9); завезення органічного в'язучого та нагрівання (10,11); приготування асфальтобетонної суміші (14, 15, 17, 18); перемішування спільно інертних матеріалів з органічним в'язким у нагрітому стані (18); відвантаження готової асфальтобетонної суміші (12); керування технологічними операціями (13).

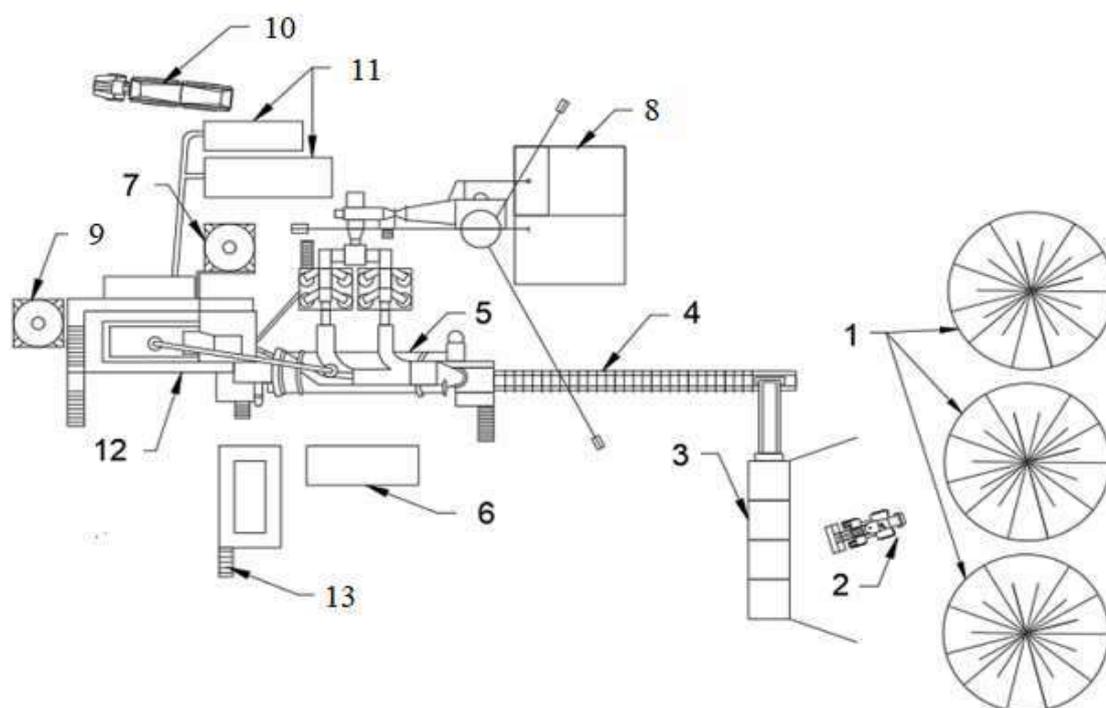


Рисунок 4.5 – Схема технологічного процесу виготовлення асфальтобетону

Враховуючи, що АБС є комплексним багатокомпонентним матеріалом, який змінює властивості при зміні складу, та що всі технологічні операції в

значній мірі впливають на властивості покриття, важливими параметрами технологічних операцій є:

- точність попереднього дозування мінеральних матеріалів, оскільки зменшення чи збільшення дозування навіть одного компонента призводить у результаті до нестачі або надлишку цього компонента в «гарячих» бункерах. Забезпечення цього параметра вирішується шляхом підвищення точності дозування, із застосуванням автоматичного управління на базі мікропроцесорної системи управління (МСУ);

- температура мінеральних матеріалів на виході з сушильного барабана, оскільки низька чи висока температура мінеральних матеріалів зумовлює зниження якості суміші: при низькій температурі частина вологи залишається на зернах мінерального матеріалу і погіршує зчеплення бітуму з поверхнею зерен, а при високій температурі зерен мінерального матеріалу відбувається окислення бітуму на поверхні цих зерен, що змінює його властивості. Забезпечення цього параметра вирішується із застосуванням автоматичного управління на базі МСУ введенням відповідних даних в блок контролю температури мінеральних матеріалів, блок регулювання потужності пальника сушильного барабана та сумарною продуктивністю агрегату живлення холодного відсіву та щебеню;

- температура та режим нагріву бітумного в'язучого, оскільки висока температура бітуму може привести до зміни його властивостей, а низька температура бітуму погіршує процес обволікання зерен мінерального матеріалу, різкий режим нагріву бітуму (висока температура теплоносія) також приводить до зміни його властивостей. Забезпечення цих параметрів вирішується введенням в блок автоматичного управління на базі МСУ відповідних даних щодо контролю температури бітуму і температури теплоносія, а також у блок регулювання потужності пальника нагрівача теплоносія (електронагрівача) бітуму;

- точність дозування мінеральних матеріалів, добавок і бітуму, оскільки відхилення від заданого складу суміші є головною причиною отримання неякісної суміші. Забезпечення цих параметрів вирішується шляхом

використання вагових дозаторів мінеральних матеріалів, добавок і бітуму на тензодатчики;

– точність дотримання часу «сухого» і «мокрого» перемішування компонентів асфальтобетонної суміші в змішувачі. Забезпечення цього параметра вирішується введенням даних щодо часу перемішування в блок автоматичного управління на базі МСУ.

Отримання якісного органомінерального композиту, що відповідає необхідним нормативним показникам, забезпечується проведенням наступних виробничих заходів щодо контролю якості:

– вхідний контроль якості мінеральних матеріалів, спрямований на визначення основних фізико-механічних характеристик для підтвердження та коригування дозування інертних матеріалів при виготовленні асфальтобетону;

– операційний контроль якості, основою якого є оцінка технологічних процесів, що відбуваються, режимів і внесенням обґрунтованого корективу в технологічний процес, що істотно може вплинути на якість продукту, що випускається. Також зіставлення результатів зернових складів інертних матеріалів, що змінюються, не відходячи від запроектованих рецептур асфальтобетонів, із заданими фізико-механічними характеристиками.

4.4 Будівництво дослідної ділянки для впровадження асфальтобетонів із золою-винесення

4.4.1 Вихідні дані

Апробацію результатів наукових досліджень з використанням золи-винесення в асфальтобетоні було виконано в м. Бурштин, Івано-Франківській області при ремонті під'їзної автомобільної дороги до прохідної 1-го блоку ДТЕК Бурштинської ТЕС у 2021 році.

Товщина покриття становила 5 см. Підбір складу асфальтобетонної суміші було виконано відповідно до ДСТУ Б В.2.7–305:2015 [103] таким чином, щоб також за зерновим складом відповідати ДСТУ Б В.2.7–119–2011 [5]. При

влаштуванні верхнього шару покриття автомобільної дороги використовували гарячі дрібнозернисті асфальтобетони типу СБМД.Г.Др.Щ.НП.І, БНД 60/90.

Усі технологічні операції з попередньої підготовки золи-винесення та його використання при виробництві асфальтобетонної суміші здійснювалися без суттєвих зміни операцій як і з стандартним мінеральним порошком. Було обстежено ділянку дороги та встановлено такі параметри (таблиця 4.3).

Потрібний модуль пружності згідно з ГБН В.2.3–37641918–559 [104] на поверхні дорожнього одягу капітального типу для:

– автомобільних доріг IV категорії повинен становити не менше ніж 190 МПа. З урахуванням коефіцієнта запасу міцності 1,29 для коефіцієнта надійності 0,95, загальний модуль пружності дорожнього одягу, що проектується повинен складати не менше $190 \times 1,29 = 245$ МПа.

Таблиця 4.3 – Вихідні дані

Параметр	Значення
Категорія дороги	IV
Адміністративна область	Івано-Франківська
Тип дорожнього одягу	капітальний
Розрахункове навантаження, кН	100
Розрахунковий тиск, МПа	0,6
Розрахунковий діаметр (динамічного навантаження), м	0,37
Дорожньо кліматична зона	IV
Кліматичний регіон	A–2
Кліматичний регіон за ґрунтово-геологічними умовами	III.P.5
Тип місцевості за умовами зволоження	1–3

Був прийняти такий варіант конструкції дорожнього одягу.

1. СБМД.Г.Др.Щ.НП.ІІ з заміною мінерального порошку на золю-винесення (100 % заміна) орієнтовний вміст золи-винесення в СБМД 2-ї марки – 5 %, БНД 60/90 згідно ДСТУ Б В.2.7–305 [103] – 5 см;

2. СБМД.Г.Др.Щ.НП.ІІ з заміною мінерального порошку на золю-винесення (100 % заміна) орієнтовний вміст золи-винесення в СБМД 2-ї марки – 5 %, БНД 60/90 згідно ДСТУ Б В.2.7–305 [103] – 7 см;

3. ЩПС–40 марки М–20 оброблена цементом з додаванням 25 % золи-винесення – 12 см;

4. Щебенево–піщана суміш С–5 з додаванням до 30 % золи-винесення – 26 см.

Довжина даної ділянки 900 м, ширина дороги 7,0 м. Розрахункові показники наведено у таблиці 4.4, результати розрахунків на міцність наведено у таблиці 4.5.

Таблиця 4.4 – Розрахункові показники

№ шару	Найменування матеріалу шару	Товщина шару, см		Розрахункові модулі			Середнє значення межі міцності на розтяг при згині R, МПа	Коефіцієнт m	Коефіцієнт Клр	Вологість, W _p , частки од.	Коефіцієнт К ₃	Зчеплення, С, МПа		Кут внутрішнього тертя, F, град		Щільність, ρ, кг/куб.м.
		h _{min}	h _{max}	пружності, E	зсуву, E _{зс}	згину, E _р						динаміка	статика	динаміка	статика	
1	СБМД.Г.Др.Щ.НП.І, БНД 60/90 згідно ДСТУ Б В.2.7–305:2015	5,0	5,0	3200	1440	4500	9,80	5,50	4,00	–	–	–	–	–	–	2400
2	СБМД.Г.Др.Щ.НП.І, БНД 60/90 згідно ДСТУ Б В.2.7–305:2015	7,0	7,0	3200	1440	4500	9,80	5,50	4,00	–	–	–	–	–	–	2400
3	Щебенево-піщані суміші, з додаванням 25 % золи винесення укріплені цементом М20	12,0	12,0	400	–	400	0,500	–	–	–	–	–	–	–	–	2000
4	Щебенево-піщана суміш С5 з додаванням до 30 % золи винесення	26,0	26,0	240	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	2000
5	Супісок легкий пілуватий	–	–	69	–	–	–	–	–	0,752	1,50	0,010	0,010	26,0	26,0	2100

Таблиця 4.5 – Результати розрахунків на міцність

№ шару	Найменування матеріалу шару	Розрахункова товщина шару, см	Загальний модуль пружності по шарам, $E_{заг}$, МПа	Показник міцності:			Граничне активне напруження зсуву в шарі, $T_{гр}$, МПа	Розрахункове активне напруження зсуву, T , МПа	Граничне напруження розтягу при згині, $R_{зг}$, МПа	Розрахункове напруження розтягу в шарі, G_r , МПа	Розрахункова вологість ґрунту, W_p , частки од.	Вартість, гривні/кв.м
				критерій	розрахункове значення коеф. міцності $K_{мц}$	величина, запас (+/-), %						
1	СБМД.Г.Др.Щ.НП.І, БНД 60/90 згідно ДСТУ Б В.2.7–305:2015	5,0	323	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2	СБМД.Г.Др.Щ.НП.І, БНД 60/90 згідно ДСТУ Б В.2.7–305:2015	7,0	239	Розтяг	1,84	+30 %	–	–	3,309	1,799	–	–
3	Щебенево–піщані суміші, з додаванням 25 % золи виносення укріплені цементом М20	12,0	173	Розтяг	2,37	+46 %	–	–	0,500	0,211	–	–
4	Щебенево–піщана суміш С5 з додаванням до 30 % золи виносення	26,0	129	–	–	–	–	–	–	–	–	–
5	Супісок легкий пилюватий	–	69	Зсув	1,40	+1 %	0,01744	0,01244	–	–	0,752	–
Сумарна товщина конструкції:		50	Підсумкова вартість конструкції:									–

Розрахункові характеристики та результати розрахунку конструкції дорожнього одягу наведені на рис. 4.6.

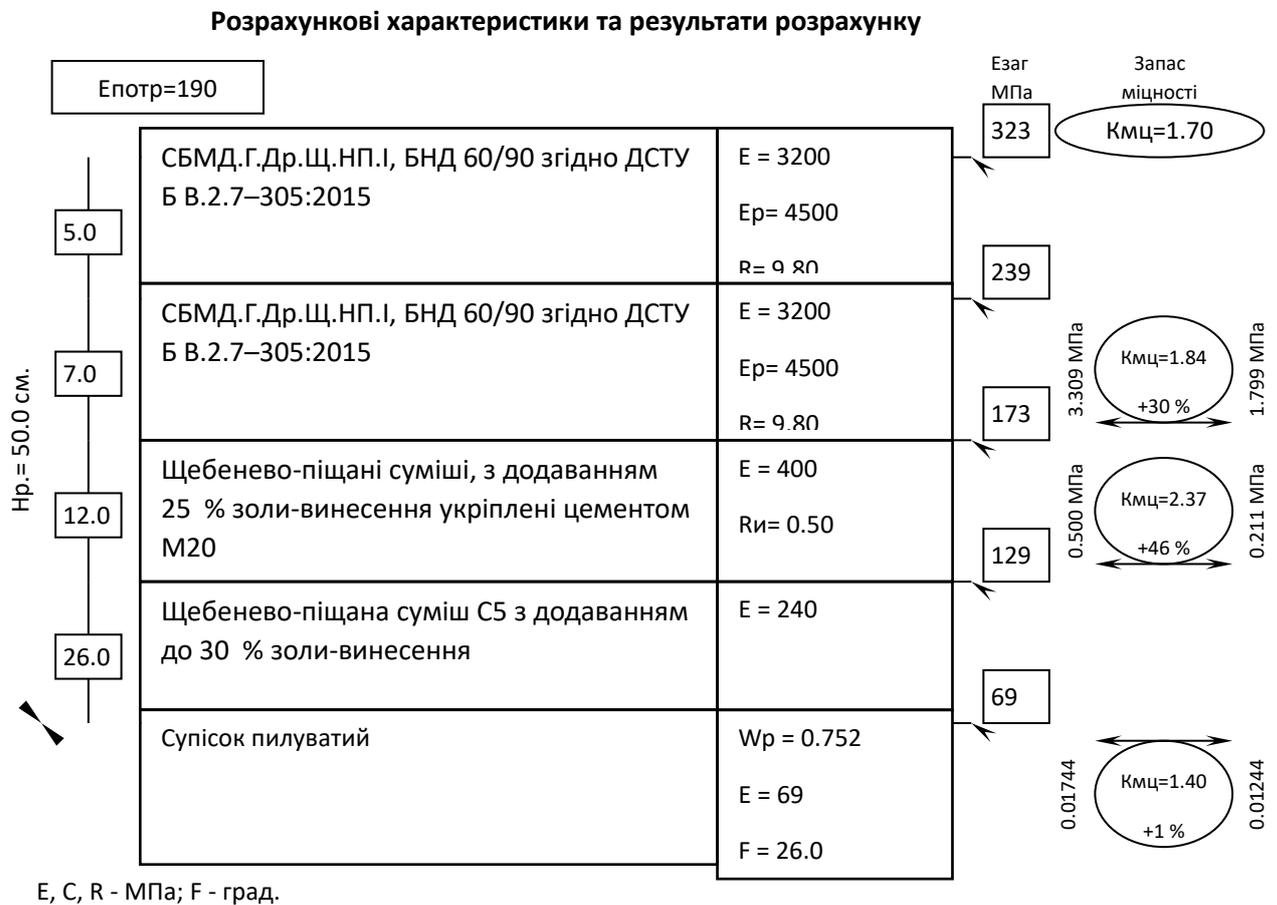


Рисунок 4.6 – Результати розрахунку конструкції дорожнього одягу

Наведений варіант конструкції дорожнього одягу задовольняє вимоги ГБН В.2.3–37641918–559.

Відповідно до додатку А «Районування території України за кліматичними умовами роботи асфальтобетонного покриття» ДСТУ Б В.2.7–119 [5] дана автомобільна дорога розташована в районі А-2.

Місце розташування ділянки автомобільної дороги зображено на рисунку 4.7.

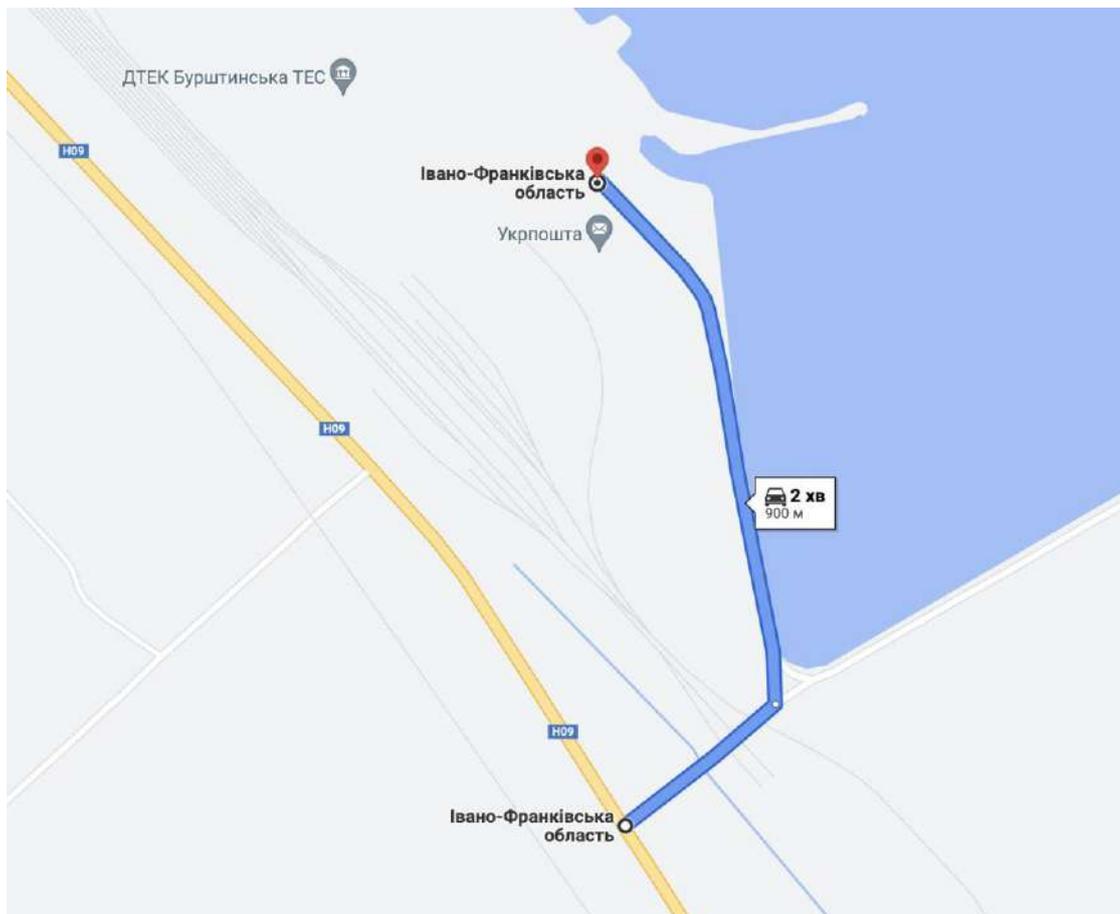


Рисунок 4.7 – Схема розташування під’їзної автомобільної дороги до прохідної 1-го блоку ДТЕК Бурштинської ТЕС

На наступний день після влаштування асфальтобетонних шарів дорожнього одягу були проведені польові дослідження які включали в себе візуальне обстеження, відбирання зразків-кернів, визначення модуля пружності, та виміри рівності.

Зразки-керни відбирали на відстані не менше ніж 1 м від крайки дорожнього покриття по лівій стороні проїзної частини з врахуванням вимог ДСТУ Б В.2.7–319 [86]. Результати визначення товщини шарів наведено в таблиці 4.6, а зображення відібраних зразків-кернів – на рисунках 4.8 – 4.12.

Модуль пружності визначали з використанням штапового обладнання відповідно до ДСТУ Б В.2.3–42 [105].

Таблиця 4.6 – Відомість відбирання зразків-кernів на під'їзній автомобільній дорозі до прохідної 1-го блоку ДТЕК Бурштинської ТЕС

№ зразка-керна	Місце відбирання, зразка-керна, км+	Результати вимірювання товщини, см				Середнє арифметичне
шар покриття із СБМД.Г.Др.Щ.НП.І БНД 70/100						
1	0+300	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
2	0+300	6,6	6,7	6,6	6,7	6,7
3	0+300	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
4	0+720	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
5	0+720	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
6	0+720	5,0	5,2	5,1	5,1	5,1
шар основи із СБМД.Г.Др.Щ.НП.І БНД 70/100						
1	0+300	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
2	0+300	9,0	8,7	8,3	8,3	8,6
3	0+300	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
4	0+720	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
5	0+720	8,0	8,5	8,5	8,5	8,4
6	0+720	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5



Рисунок 4.8 – Загальний вигляд під'їзної автомобільної дороги до прохідної 1-го блоку ДТЕК Бурштинської ТЕС



Рисунок 4.9 – Відбирання зразків-кернів на під’їзній автомобільній дорозі до прохідної 1-го блоку ДТЕК Бурштинської ТЕС



Рисунок 4.10 – Відібрані зразки-керни на під’їзній автомобільній дорозі до прохідної 1-го блоку ДТЕК Бурштинської ТЕС

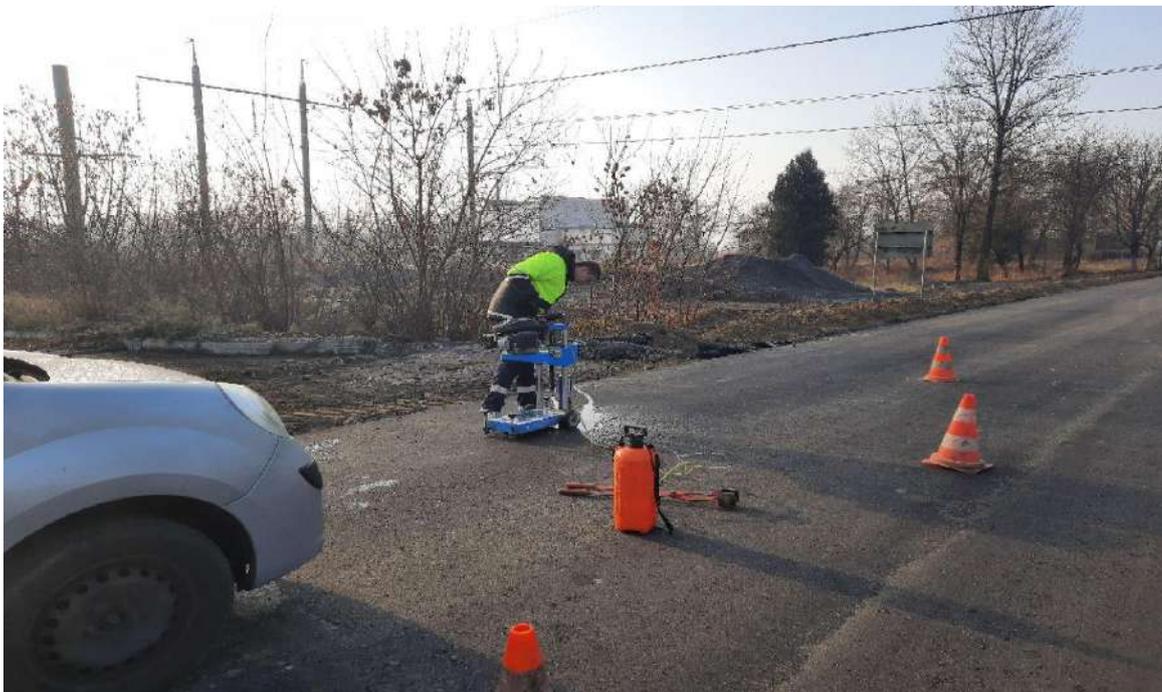


Рисунок 4.11 – Відбирання зразків-кернів на під'їзній автомобільній дорозі до прохідної 1-го блоку ДТЕК Бурштинської ТЕС



Рисунок 4.12 – Відібрані зразки-керни на під'їзній автомобільній дорозі до прохідної 1-го блоку ДТЕК Бурштинської

Результати розрахунку фактичних значень показника модуля пружності дорожнього одягу наведено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Результати розрахунку фактичних значень показника модуля пружності

Ч. ч.	Фактичний модуль пружності, МПа
1	536
2	580
3	544

4.4.2 Визначення фізичних показників відібраних зразків-керна

З метою встановлення якості ущільнення суміші виконано визначення фізичних показників відібраних зразків-керна, а саме середньої густини та водонасичення відповідно до розділу 8 та розділу 14 ДСТУ Б В.2.7–319 [86].

Результати визначення фізичних показників відібраних зразків-керна наведено в таблицях 4.8 – 4.11.

Таблиця 4.8 – Результати визначення фізичних показників зразків-керна шару покриття (зразок 1, 2 та 3)

Ч. ч.	Найменування показника, одиниця вимірювання	Вимоги ДСТУ Б В.2.7–119 (район А–2)	Вимоги ДСТУ Б В.2.7–305	Фактичні показники зразків-керна			Середнє арифметичне
				1	2	3	
1	Середня густина, г/см ³	не нормується	не нормується	2,30	2,27	2,31	2,29
2	Водонасичення, % за об'ємом	не нормується	не нормується	3,5	4,5	3,3	3,8

Таблиця 4.9 – Результати визначення фізичних показників зразків-керна шару покриття (зразок 4, 5 та 6)

Ч. ч.	Найменування показника, одиниця вимірювання	Вимоги ДСТУ Б В.2.7–119 (район А–2)	Вимоги ДСТУ Б В.2.7–305	Фактичні показники зразків-керна			Середнє арифметичне
				4	5	6	
1	Середня густина, г/см ³	не нормується	не нормується	2,28	2,28	2,29	2,28
2	Водонасичення, % за об'ємом	не нормується	не нормується	4,3	4,5	4,1	4,3

Таблиця 4.10 – Результати визначення фізичних показників зразків-керна шару основи (зразок 1, 2 та 3)

Ч. ч.	Найменування показника, одиниця вимірювання	Вимоги ДСТУ Б В.2.7–119 (район А–2)	Вимоги ДСТУ Б В.2.7–305	Фактичні показники зразків-керна			Середнє арифметичне
				1	2	3	
1	Середня густина, г/см ³	не нормується	не нормується	2,33	2,31	2,34	2,32
2	Водонасичення, % за об'ємом	не нормується	не нормується	2,8	3,2	2,5	2,8

Таблиця 4.11 – Результати визначення фізичних показників зразків-кernів шару основи (зразок 4, 5 та 6)

Ч. ч.	Найменування показника, одиниця вимірювання	Вимоги ДСТУ Б В.2.7–119 (район А–2)	Вимоги ДСТУ Б В.2.7–305	Фактичні показники зразків-кernів			Середнє арифметичне
				4	5	6	
1	Середня густина, г/см ³	не нормується	не нормується	2,29	2,28	2,26	2,28
2	Водонасичення, % за об'ємом	не нормується	не нормується	4,4	4,8	4,7	4,6

Визначення складу відібраної суміші, а саме зернового складу мінеральної частини та вмісту в'язучого, на відповідність вимогам ДСТУ Б В.2.7–119 [5] виконували відповідно до розділу 31 ДСТУ Б В.2.7–319 [86].

Результати визначення складу відібраної суміші наведено в таблиці 4.12.

Таблиця 4.12 – Результати визначення зернового складу мінеральної частини суміші, відібраної на під'їзній автомобільній дорозі до прохідної 1-го блоку ДТЕК Бурштинської ТЕС

Найменування показника	Вміст, % за масою, мінеральних зерен, менших даного розміру, мм											
	40	25	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,071
Результат випробування	100,0	100,0	98,4	88,7	77,5	62,5	44,8	32,6	26,0	19,0	12,2	8,3
Вимоги ДСТУ Б В.2.7–305 та ДСТУ Б В.2.7–119	100	100	100–95	93–84	82–69	65–55	53–41	42–31	33–23	25–16	18–11	14–8
Відповідність вимогам ДСТУ Б В.2.7–305 та ДСТУ Б В.2.7–119	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Таблиця 4.13 – Результати визначення вмісту в'язучого суміші відібраної на під'їзній автомобільній дорозі до прохідної 1-го блоку ДТЕК Бурштинської ТЕС

Ч. ч.	Найменування показника, одиниця вимірювання	Орієнтовний вміст згідно з ДСТУ Б В.2.7–305 та ДСТУ Б В.2.7–119	Середнє значення вмісту в'язучого
1	Вміст в'язучого, % за масою мінеральних матеріалів	від 5,5 до 7,0	4,76

Середнє значення вмісту в'язучого в суміші становить 4,76 % за масою мінеральних матеріалів. Окремі результати визначення вмісту в'язучого становлять від 4,68 % за масою до 4,83 % за масою.

Встановлений фактичний вміст в'язучого у суміші, відібраній на під'їзній автомобільній дорозі до прохідної 1-го блоку ДТЕК Бурштинської ТЕС, є меншим за орієнтовний вміст в'язучого згідно з таблицею Б.1 ДСТУ Б В.2.7–119 [5] відповідно до дрібнозернистої асфальтобетонної суміші типу Б. Однак, дані таблиці Б.1 ДСТУ Б В.2.7–119 [5] є базовими під час підбору складу асфальтобетонної суміші і оптимальний вміст в'язучого в асфальтобетонній суміші може відрізнятися від встановленого діапазону [107].

4.4.3 Визначення фізико-механічних показників виготовлених зразків

Визначення фізико-механічних показників виготовлених зразків, а саме середньої густини, водонасичення, міцності за температури 20 °С, міцності за температури 50 °С, на відповідність вимогам ДСТУ Б В.2.7–305 [103] та ДСТУ Б В.2.7–119 [5] виконували відповідно до розділу 8, розділу 14 та розділу 16 ДСТУ Б В.2.7–319 [86].

Результати визначення фізико-механічних показників виготовлених зразків наведено в таблиці 4.14.

Таблиця 4.14 – Результати визначення фізико-механічних показників виготовлених зразків

Ч.ч.	Найменування показника, одиниця вимірювання	Вимоги ДСТУ Б В.2.7–119 (район А–2)	Вимоги ДСТУ Б В.2.7–305	Результат випробування			Середнє арифметичне
1	Середня густина, г/см ³	не нормується	не нормується	2,31	2,31	2,32	2,31
2	Водонасичення, % за об'ємом	3,5, не більше	4,0, не більше	3,4	3,4	3,3	3,4
3	Границя міцності при стиску за температури 20 °С, МПа	2,7, не менше	2,0, не менше	4,2	4,4	4,6	4,4
4	Границя міцності при стиску за температури 50 °С, МПа	1,2, не менше	1,0, не менше	1,7	1,6	1,6	1,6

Визначення коефіцієнта ущільнення на відповідність вимогам ДБН В.2.3–4 виконували відповідно до розділу 33 ДСТУ Б В.2.7–319 [86].

Результати визначення коефіцієнта ущільнення наведено в таблиці 4.15.

Таблиця 4.15 – Результати визначення коефіцієнта ущільнення

Ч. ч.	Найменування показника, одиниця вимірювання	Вимоги ДБН В.2.3–4	Результат випробування
1	Коефіцієнт ущільнення суміші для шару покриття (зразки 1 – 3)	0,99, не менше	0,99
2	Коефіцієнт ущільнення суміші для шару покриття (зразки 4 – 6)	0,99, не менше	0,99
3	Коефіцієнт ущільнення суміші для шару основи (зразки 1 – 3)	0,98, не менше	1,00
4	Коефіцієнт ущільнення суміші для шару основи (зразки 4 – 6)	0,98, не менше	0,99

Результати лабораторних випробувань зразків-кернів асфальтобетону, відібраних на під'їзній автомобільній дорозі до прохідної 1-го блоку ДТЕК Бурштинської ТЕС, свідчать про наступне:

– товщина зразків-кернів шару покриття становить від 5,5 см до 6,7 см, а середня товщина – 5,9 см;

– товщина зразків-кернів шару основи становить від 6,5 см до 9,5 см, а середня товщина – 8,2 см;

– водонасичення зразків-кернів шару покриття відповідає вимогам таблиці 3 ДСТУ Б В.2.7–305 [103] та таблиці 8 ДСТУ Б В.2.7–119 [5] відповідно до району А–2, у тому числі з урахуванням пункту 7.13 ДСТУ Б В.2.7–119 [5];

– водонасичення зразків-кернів шару основи відповідає вимогам таблиці 3 ДСТУ Б В.2.7–305 [103] та таблиці 8 ДСТУ Б В.2.7–119 [5] відповідно до району А–2, у тому числі з урахуванням пункту 7.13 ДСТУ Б В.2.7–119 [5];

– коефіцієнт ущільнення сумішей для шару покриття відповідає вимогам пункту 20.8.10 ДБН В.2.3–4 [106];

– коефіцієнт ущільнення сумішей для шару основи відповідає вимогам пункту 20.8.10 ДБН В.2.3–4 [106].

Результати лабораторних випробувань суміші, відібраної на під'їзній

автомобільній дорозі до прохідної 1-го блоку ДТЕК Бурштинської ТЕС, свідчать про наступне:

– зерновий склад суміші відповідає вимогам таблиці 6 ДСТУ Б В.2.7–119 [5] щодо суміші дрібнозернистої типу Б та вимогам 5.2.1.1 ДСТУ Б В.2.7–305 [103];

– водонасичення виготовлених зразків відповідає вимогам таблиці 8 ДСТУ Б В.2.7–119 [5] відповідно до району А–2 та таблиці 3 ДСТУ Б В.2.7–305 [103];

– границя міцності при стиску за температури 20 °С виготовлених зразків відповідає вимогам таблиці 8 ДСТУ Б В.2.7–119 [5] відповідно до району А–2 та таблиці 3 ДСТУ Б В.2.7–305 [103];

– границя міцності при стиску за температури 50 °С виготовлених зразків відповідає вимогам таблиці 8 ДСТУ Б В.2.7–119 [5] відповідно до району А–2 та таблиці 3 ДСТУ Б В.2.7–305 [103].

Встановлений фактичний вміст в'язучого є меншим за орієнтовний вміст в'язучого згідно з таблицею Б.1 ДСТУ Б В.2.7–119 [5] відповідно до дрібнозернистої асфальтобетонної суміші типу Б. Однак, дані таблиці Б.1 ДСТУ Б В.2.7–119 [5] є базовими під час підбору складу асфальтобетонної суміші і оптимальний вміст в'язучого в асфальтобетонній суміші може відрізнятись від установленого діапазону. Про це також свідчать результати випробування виготовлених зразків, відповідно до яких водонасичення асфальтобетону та границя міцності при стиску відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7–119 [5] та ДСТУ Б В.2.7–305 [103].

Висновки до розділу 4

1. Підтверджений економічний ефект заміни стандартного наповнювача на золу-винесення. При використанні золи-винесення оптимальний склад бітуму зменшується на 0,5 – 1,0 %, що робить асфальтобетонну суміш із золою-винесення вигіднішою на 10,5 % за стандартну.

2. Розроблено методику визначення ущільнюваності асфальтобетонної

суміші, яка дозволяє визначити закінчення ущільнюваності асфальтобетонних сумішей з використанням гіраторного ущільнювача.

3. Розроблено технологію приготування асфальтобетонів з використанням золи-винесення, яка дозволяє знизити економічне навантаження на підприємства дорожньої галузі та розширити сировинну базу використовуваних інертних мінеральних матеріалів України.

4. Результати теоретичних та лабораторних досліджень апробовані при влаштуванні шарів покриття дорожнього одягу із асфальтобетону і шарів основи під'їзної автомобільної дороги до прохідної 1-го блоку ДТЕК Бурштинської ТЕС. Трирічні спостереження за дослідною ділянкою підтвердили, що асфальтобетон із золою-винесення має високу якість, що не поступається (візуально) традиційному.

Результати досліджень розділу викладено у наступних публікаціях: [1, 81, 107].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-практична задача, що полягає в обґрунтуванні критеріїв застосування золи-винесення при виробництві асфальтобетонних сумішей та удосконаленні технології їх вироблення. Отримані нові закономірності і методи, які дозволяють встановити придатність золи-винесення з метою використання її як наповнювач асфальтобетонної суміші із забезпеченням нормативних вимог до неї, зменшити вартість асфальтобетонної суміші і негативний екологічний вплив на навколишнє середовище:

1. На онові аналізу вітчизняного і закордонного досвіду використання золи-винесення обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість її використання в якості наповнювача для асфальтобетонних сумішей.

Розроблено критерії, що дозволяють встановити придатність наповнювача для використання в асфальтобетонній суміші, а саме: 1) коефіцієнт якості наповнювача, за його допомогою можна оцінити якість наповнювача відповідно до вимог національних стандартів. Критерієм є максимальне значення коефіцієнта із отриманих для наповнювачів із різних матеріалів, зокрема і золи-винесення; 2) критерій придатності золи-винесення як наповнювача асфальтобетонних сумішей, що являє собою відношення сум значень критеріїв бітумоємності та пористості до сум значень критеріїв структурувальної здатності та дійсної густини суміші. Встановлені межі придатності цього критерію, які знаходяться в інтервалі від 0,90 до 1,10 включно, у межах яких досліджуваний наповнювач може бути використаним при виготовленні асфальтобетонної суміші.

2. Проведені дослідження фізико-механічних характеристик асфальтобетону із золою-винесення дозволили встановити закономірності впливу золи-винесення на атмосферостійкість асфальтобетону та визначити раціональний діапазон вмісту бітуму в асфальтобетонних сумішах із золою-винесення (5,0–5,5) %, встановлені залежності вмісту бітуму від типу

наповнювача, а саме з використанням золи-винесення зменшується кількість бітуму на 0,5 % порівняно зі стандартним вапняковим наповнювачем.

3. На підставі експериментальних досліджень розроблено методику визначення ущільнюваності асфальтобетонної суміші, яка дозволяє визначити закінчення ущільнення асфальтобетонної суміші з оптимальним значенням залишкової пористості, встановлено, що асфальтобетонна суміш із золю-винесення ущільнюється швидше ніж з вапняковим наповнювачем на 7 %, що свідчить про можливість зменшення кількості проходів котка в польових умовах.

4. Виконані теоретичні дослідження дозволили розробити математичну модель оптимізації підбору зернового складу мінеральної частини асфальтобетонної суміші, зокрема з наповнювачем із золю-винесення. Розроблена математичка модель дозволила удосконалити метод проектування зернового складу асфальтобетонних сумішей та розробити програмне забезпечення із застосуванням програм табличного процесора Excel.

5. Розроблені практичні рекомендації щодо виробництва асфальтобетонних сумішей. Виконано виробниче впровадження отриманих результатів при улаштуванні шарів покритву дорожнього одягу із асфальтобетону і шарів основи під'їзної автомобільної дороги до прохідної 1-го блоку ДТЕК Бурштинської ТЕС у м. Бурштин, Івано-Франківській області у 2021 році.

На основі техніко-економічного обґрунтування підтверджена економічна доцільність використання золи-винесення в асфальтобетонних сумішах. Встановлено, що заміна стандартного наповнювача на золу-винесення в асфальтобетонній суміші знижує її вартість понад 10 %. Застосування золи-винесення в асфальтобетоні дозволяє зменшити негативний екологічний вплив на навколишнє середовище, зменшити витрати від складування золівідходів, одночасно забезпечуючи нормативні вимоги до асфальтобетонних сумішей.

Матеріали досліджень були впроваджені в Державному агентстві відновлення та розвитку інфраструктури України при розробленні нормативних документів: зміна до ДСТУ Б В.2.7–121:2014 «Порошок мінеральний для асфальтобетонних сумішей. Технічні умови» та зміна до ДСТУ 8772:2018

«Порошок мінеральний для асфальтобетонних сумішей. Методи випробування», ДСТУ EN 13108–1:2019 «Бітумомінеральні суміші. Технічні вимоги до матеріалів. Частина 1. Асфальтобетон (EN 13108–1:2006, IDT)», удосконалено вимоги до наповнювачів та розроблено ДСТУ 9246–1:2023 «Заповнювачі для асфальтобетонних сумішей та матеріалів, оброблених бітумним в'язучим. Технічні умови. Частина 1. Наповнювач» та у навчальному процесі, а саме при викладанні дисциплін «Технологія будівництва доріг», «Сучасні технології будівництва автомобільних доріг» та в дипломному проектуванні для студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія, ОП «Автомобільні дороги, вулиці та дороги населених пунктів».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Каськів В. І., Копинець І. В., Соколов О. В. Дослідження золи-винесення електрогенеруючих підприємств з метою її використання як альтернативи вапняковому мінеральному порошку для виробництва асфальтобетонних сумішей. *Дороги і мости*. 2021. Вип. 24. С. 40–47. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.24.040>
2. Wang, Kun & Wu, Qiong & Hu, Peng & Xu, Hao & Qu, Lu & Li, Xiongao & Lin, Yuquan & Du, Guoyi & Shi, Tao. (2023). Road Performance and Microscopic Mechanism Analysis of Modified Straw Fiber Asphalt Binder. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2023. 1–15. (Scopus) <https://doi.org/10.1155/2023/2328556>
3. ДСТУ Б В.2.7–75–98 Будівельні матеріали. Щебінь та гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Технічні умови
4. ДСТУ Б В.2.7–210:2010 Будівельні матеріали. Пісок із відсівів дроблення вивержених гірських порід для будівельних робіт. Технічні умови
5. ДСТУ Б В.2.7–119:2011 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови
6. ДСТУ Б В.2.7–121–2014 Порошок мінеральний для асфальтобетонних сумішей. Технічні умови
7. Hossain, Zahid & Zaman, Musharraf. (2020). Prediction of Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalts with Reclaimed Asphalt Pavement. *Advances in Civil Engineering*. 2020. 1–13. (Scopus) <https://doi.org/10.1155/2020/8672654>
8. Wang, Xiushan & Dong, Bowen & Wang, Junjie. (2020). Road Performance of Calcium Sulfate Whisker and Polyester Fiber Composite–Modified Asphalt Mixture. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020. (Scopus) <https://doi.org/10.1155/2020/1231396>
9. Morone M., Costa G., Poletti A., Pomi R., Baciocchi R. Valorization of steel slag by a combined carbonation and granulation treatment. *Mineral Engineering*. 2014. N 59. P. 82–90. DOI:10.1016/j.mineng.2013.08.009

10. Grönniger J., Wistuba M.P., Cannone Falchetto A. Reuse of Linz–Donawitz (LD)slag in asphalt mixtures for pavement application. Proceedings of the Interantional Conference on Industrial Wasted and Wastewater Treatment & Valorization, Athens. 2015. P. 21–23.
http://uest.ntua.gr/iwwatv/proceedings/pdf/Gronniger_et_al.pdf
11. Каськів В. І., Копинець І. В., Соколов О. В. Використання побічних відходів промисловості в якості мінерального порошку в дорожньому будівництві. Дороги і мости. 2021. Вип. 24. С. 183–192. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.24.183>
12. Фізико–хімічна механіка будівельних матеріалів: В. І. Братчун, В. О. Золотарьов, М. К. Пактер, В. Л. Беспалов; під редакцією д.т.н. В. І. Братчуна. – Донецьк : Вид–во «Ноулідж» 2013. – 338 с. ISBN 5–7763–0351–6.
13. Борщ І.М. Лес як мінеральний порошок для асфальтового бетону: автореф. дис. на пошук. вчений. степ. к.т.н.: спец. 05.23.05/І.М. Борщ. – Харків, 1952. – 25 с
14. Пиріг Я.І. Про структуруючу здатність мінеральних порошків / Я.І. Пиріг // Праці ХНАДУ, 2014 (67). – С.89–93.
<https://dSPACE.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/1065>
15. Гридчин А.М. Особливості взаємодії бітуму з мінеральними матеріалами з кислих порід/А.М. Гридчин, В.В. Ядикіна // Вісник ХНАДУ, 2008. – Вип.40. – С.13–16.
16. M. Prezzi, P. Bandini, J. A. N. Carraro et al., “Use of recyclable materials in sustainable Civil engineering applications,” *Advances in Civil Engineering*, vol. 2011, Article ID 896016, 2 pages, 2011.
<https://downloads.hindawi.com/journals/specialissues/950416.pdf>
17. M. I. Souliman and A. Eifert, “Mechanistic and economical characteristics of asphalt rubber mixtures,” *Advances in Civil Engineering*, vol. 2016, Article ID 8647801, 6 pages, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/8647801>
18. Соколов О. В., Желотобрях А. Д., Копинець І. В., Каськів В. І. Використання відходів промисловості в дорожньому будівництві // Дороги і

мости. – 2020. – Вип. 21. – С. 110–119. DOI:
<https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.110>

19. Костін Д. Ю. Підвищення стійкості до накопичення пластичних деформацій щебенево–мастикових асфальтобетонних покриттів дорожніх одягів. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Харківський національний автомобільно–дорожній університет. Харків, 2021.
https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/Spec_VR_64.059.01/dis_Kostin.pdf

20. Амброс Р.А. Про дослідження впливу хімічних добавок на зчеплення бітуму із кам'яними матеріалами / Р.А. Амброс. //Тр. Таллінського політехнічного інст.: Естондержвидав, 1956. – Серія А, №69. – С. 74–77.

21. Золотарьов В.А. Про взаємозв'язок реологічних властивостей бітумів та асфальтобетонів. В.А. Золотарьов. Наука та техніка у дорожній галузі, 2002. – №4. – С. 3–6.

22. Каськів В. І., Копинець І. В., Соколов О. В. Дослідження властивостей пиловатих відходів з електрогенеруючих підприємств України. Дороги і мости. 2021. Вип. 23. С. 94–101 DOI:
<https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.23.094>

23. В. Свідерський, В. Демченко. Хімічний склад і дисперсність зольних мікросфер/ «Товари і ринки» – 2017–№ 1–С. 69–77.
http://tr.knute.edu.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=1411&catid=116&lang=uk

24. Сергієв А.М. Використання в будівництві відходів енергетичної промисловості – К.:Будівельник, 1984. – 120 с.

25. Gamage, Nirdosha & Liyanage, Kasuni & Fragomeni, S.. (2011). Overview of different type of fly ash and their use as a building and construction material.

https://www.researchgate.net/publication/264707671_Overview_of_different_type_of_fly_ash_and_their_use_as_a_building_and_construction_material

26. ДСТУ Б EN 197–1:2015 Цемент. Частина 1. Склад, технічні умови та критерії відповідності для звичайних цементів (EN 197–1:2011, IDT)

27. ASTM C 618, *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, ASTM, West Conshohocken, PA, USA, 2019.

28. Доцент кафедри машинобудування, інженерно–технологічний факультет, Джамія Міллія Ісламія, Джамія Нагар. Утилізація та використання зол виносу для захисту середовища. Міжнародний журнал інноваційних досліджень у науці, інженерії та технології. Нью–Делі–110025, Індія. Том 2, випуск 10, жовтень 2013 року, с.5259–5266.

29. В. П. Ковальський, О.С. Сідлак. Використання золи виносу ТЕС у будівельних матеріалах// Науково–технічний збірник “сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві”–2014 – С. 35–40.
<https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/3936>

30. Jazi, Marwa & Gazder, Uneb & Arifuzzaman, Md & Abid, Madiha. (2024). State-of-the-Art Review on Utilization of Fly Ash in Pavement Structures. *The Journal of Engineering Research [TJER]*. 20. 33–44. DOI:10.53540/tjer.vol20iss1pp33–44

31. K. Sobolev, I. Flores Vivian, R. Saha, N. M. Wasiuddin, and N. E. Saltibus, “The effect of fly ash on the rheological properties of bituminous materials,” *Fuel*, vol. 116, pp. 471–477, 2014. <https://doi.org/10.1155/2019/8107264>

32. V. Sharma, S. Chandra, and R. Choudhary, “Characterization of fly ash bituminous concrete mixes,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 22, no. 12, pp. 1209–1216, 2010. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943–5533.0000125

33. A. Durekovic and G. Mladenovic, “The performance of bitumen mastics with the addition of fly ash,” in *Bituminous Mixtures & Pavements VI*, A. Nikolaidis, Ed., pp. 115–122, Taylor and Francis Group, London, UK, 2015. https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781315668161_A25607159/preview-9781315668161_A25607159.pdf

34. D. Kar, M. Panda, and J. P. Giri, “Influence of fly ash as a filler in bituminous mixes,” *Journal of Engineering and Applied Science*, vol. 9, no. 6, pp. 895–900, 2014. DOI:10.14256/JCE.1601.2016

35. S. Likitlersuang and T. Chompoorat, “Laboratory investigation of the performances of cement and fly ash modified asphalt concrete mixtures,” *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 9, no. 5, pp. 337–344, 2016. DOI:10.1016/j.ijprt.2016.08.002

36. K. Sobolev, I. V. Flores, J. D. Bohler et al., “Application of fly ash in ASHphalt concrete: from challenges to opportunities,” in *Proceedings of the World of Coal Ash Conference, Session: Cement and Concrete VI*, Lexington, KY, USA, April 2013.

https://www.researchgate.net/publication/236898269_Application_of_Fly_Ash_in_ASHphalt_Concrete_from_Challenges_to_Opportunities

37. I. Androjic, G. Kaludjer, and M. Komljen, “Usage of the fly ash in hot mix asphalt mixes,” in *Proceedings of the XXVIII International Baltic Road Conference*, Vilnius, Lithuania, August 2013.

https://www.researchgate.net/publication/332593432_USAGE_OF_THE_FLY_ASH_IN_HOT_ASPHALT_MIXES

38. R. Mistry and T. K. Roy, “Effect of using fly ash as alternative filler in hot mix asphalt,” *Perspectives in Science*, vol. 8, pp. 307–309, 2016. DOI:10.1155/2019/8107264

39. Ministry of Road Transport and Highways (MoRTH), *Specifications for Road and Bridgeworks, Fifth Revision*, Indian Roads Congress, New Delhi, India, 2013. <https://law.resource.org/pub/in/bis/irc/mort.250.2013.pdf>

40. M. Jovanović, A. Mijusković, and A. Šeper, “Mechanical properties of bituminous aggregate mixture BNS 22A prepared with fly ash from power plant Gacko as a filler replacement,” in *Proceedings of the 15th International Research/Expert Conference “Trends in the Development of Machinery and Associated Technology,” TMT 2011*, Prague, Czech Republic, September 2011.

https://www.researchgate.net/publication/328496206_MECHANICAL_PROPERTIES_OF_BITUMINOUS_AGGREGATE_MIXTURE_BNS_22A_PREPARED_WITH_FLY_ASH_FROM_POWER_PLANT_GACKO_AS_A_FILLER_REPLACEMENT

41. Mirkovic, Katarina & Tosic, Nikola & Mladenovic, Goran. (2019). Effect of Different Types of Fly Ash on Properties of Asphalt Mixtures. *Advances in Civil Engineering*. 2019. 1–12. 10.1155/2019/8107264. (Scopus) <https://doi.org/10.1155/2019/8107264>
42. Tapkin, S., 2008, "Mechanical Evaluation of Asphalt–Aggregate Mixtures Prepared with Fly Ash as A Filler Replacement," *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35(1),27–40. <https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.1139/L07–082>
43. A. Wozzuk, L. Bandura, W. Franus Fly ash as low cost and environmentally friendly filler and its effect on the properties of mix asphalt *J. Clean. Prod.*, 235 (2019), pp. 493–502, (Scopus) <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.353>
44. Aliaa Faleh Al.ani. Effect of Fly–ash on The Performance of Asphalt Concrete Mixes. *Journal of Babylon University/Engineering Sciences/ No.(5)/ Vol.(25): 2017* <https://www.iasj.net/iasj/download/9da8868b07f7ee34>
45. Xing, X.; Han, K.; Liu, R.; Chen, Z.; Li, H.; Li, P.; Zhou, Q.; Wen, Y. Study on the Rheological Properties of Fly Ash Modified Asphalt Mastics. *Coatings* **2023**, *13*, 1307. (Scopus) <https://doi.org/10.3390/coatings13081307>
46. Yıldız, K.; Atakan, M. Improving microwave healing characteristic of asphalt concrete by using fly ash as a filler. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *262*, 120448. (Scopus) <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120448>
47. R Muniandy, E Aburkaba and R Taha, 2013, "Effect of Mineral Filler Type and Particle Size on the Engineering Properties of Stone Mastic Asphalt Pavements," *The Journal of Engineering Research*, Vol. 10, No. 2, 13–32 DOI:10.24200/tjer.vol10iss2pp13–32
48. Wahhab, H. I. A. A., Hussein, I. A., Parvez, M. A., & Shawabkeh, R. A., 2015, "Use of Modified Oil Fly Ash to Enhance Asphalt Concrete Performance," *Materials and Structures*, 48(10), 3231–3240. <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527–014–0393–5>
49. А. О. Бєлятинський, К., В. Краюшкіна Навчальний посібник «Фізико–хімічна механіка дорожньо–будівельних матеріалів» Київ 2016

https://dspace.nau.edu.ua/bitstream/NAU/25596/1/%D0%92%D0%B5%D1%80%D1%81%D1%82%D0%BA%D0%B0_12.12%20%D0%9E%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%87%D0%BD%D0%B0%D0%A4%D0%A5%D0%9C.pdf

50. Пиріг Я. І., Галкін А. В., Оксак С. В. Порівняння властивостей бітумних в'язучих після старіння різними методами. Дороги і мости. Київ, 2022. Вип. 26. С. 92–107. <http://dorogimosti.org.ua/ua/porivnyannya-vlastivostey-bitumnih-vyaghuchih-pislya-starinnya-riznimi-metodami>

51. Bhatt, A.; Priyadarshini, S.; Mohanakrishnan, A.A.; Abri, A.; Sattler, M.; Techapaphawit, S. Physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: A global review. Case Stud. Constr. Mater. 2019, 11, e00263. (Scopus) <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00263>

52. НРБУ–97/Д–2000 Радіаційний захист від джерел потенційного опромінення (ДГН 6.6.1. – 6.5.061–2000)

53. Соколов О.В. Оцінювання структуровальної здатності мінерального порошку в широкому діапазоні температур. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Органічні і мінеральні в'язучі та дорожні бетони на їх основі"*. Харків, ХНАДУ, 2022. С. 133–136. https://rcf.khadi.kharkov.ua/fileadmin/user_upload/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA_%D1%82%D0%B5%D0%B7_%D0%A0%D0%B5%D0%B4%D0%B0%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%8F_.pdf

54. Ivan Kopynets, Oksana Sokolova, Iryna Gudyma, Alina Yunak Laboratory studies to reduce the technological aging of bitumen. Дороги і мости. Київ, 2018. Вип. 18. С. 107–118. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2018.18.107>

55. Fan Zhenyang & Wang Xuancang & Zhang Zhuo & Zhang Yi. (2019). Effects of Cement–Mineral Filler on Asphalt Mixture Performance under Different Aging Procedures. Applied Sciences. 9.3785. DOI: 10.3390/app9183785.

56. Moraes Raquel & Bahia Hussain. (2013). Investigation of Effect of Mineral Fillers on the Oxidative Aging of Asphalt Binders.

https://www.researchgate.net/publication/310951830_Investigation_of_Mineral_Filler_Effects_on_the_Aging_Process_of_Asphalt_Mastics

57. Nasir, N.H.M.; Usman, F.; Saggaf, A. Development of composite material from Recycled Polyethylene Terephthalate and fly ash: Four decades progress review. *Curr. Res. Green Sustain. Chem.* 2022, 5, 100280
<https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2022.100280>

58. Norhaiza, G.; Khairunisa, M.; Saffuan, W.A. Utilization of Fly Ash in Construction. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019, 601, 012023 DOI 10.1088/1757-899X/601/1/012023

59. Bieliatynskiy, A.; Yang, S.; Pershakov, V.; Shao, M.; Ta, M. The use of fiber made from fly ash from power plants in China in road and airfield construction. *Constr. Build. Mater.* 2022, 323, 126537
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126537>

60. Muhammad, J.; Peng, T.; Zhang, W.; Cheng, H.; Waqas, H.; Abdul, S.; Chen, K.; Zhou, Y. Moisture susceptibility and fatigue performance of asphalt binder modified by bone glue and coal fly ash. *Constr. Build. Mater.* 2021, 308, 125135
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125135>

61. Radwan, A.; Satar, M.; Hassan, N.; Rogo, K. The Influence of Coal Fly Ash on the Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt Mixture. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*; IOP Publishing: Bristol, UK, 2022; p. 012012 DOI 10.1088/1755-1315/971/1/012012

62. Chaira; Veranita. The Effect of Combining Coal Fly Ash and Lokan Shells as Filler Towards the Mixture of Asphalt Concrete Wearing Course. In *Journal of Physics: Conference Series*; IOP Publishing: Bristol, UK, 2020; p. 012033 DOI 10.1088/1742-6596/1625/1/012033

63. Amoni, B.C.; Freitas, A.D.L.; Bessa, R.A.; Oliveira, C.P.; Bastos-Neto, M.; Azevedo, D.C.S.; Lucena, S.M.P.; Sasaki, J.M.; Soares, J.B.; Soares, S.A.; et al. Effect of coal fly ash treatments on synthesis of high-quality zeolite A as a potential additive for warm mix asphalt. *Mater. Chem. Phys.* 2022, 275, 125197
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125197>

64. Apostolidis, Panos & Xueyan, Liu & Marocho, Paul & Ven, Martin & Erkens, Sandra & Skarpas, Tom. (2020). Evaluation of epoxy modification in asphalt mastic. *Materials and Structures*. DOI:10.1617/s11527-020-01494-9
65. Золотарьов В. А. Перспективи підвищення довговічності асфальтобетону. Автомобільний транспорт та шляхове господарство на рубежі 3-го тисячоліття: Матеріали міжнародної наукової конференції. - Харків: ХДАДТУ, 2000. - С. 58-61. [російською мовою]
66. В.І. Братчун, М.К. Пактер, А.А. Стукалов та ін.. Технологічне старіння дорожнього нафтового бітуму як двофакторний процес. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Зб. наук. праць. – Рівне, 2012. – Вип. 23. – С. 31–41. [російською мовою]
67. Копинець І.В. Підвищення довговічності асфальтобетонного покриття шляхом зменшення технологічного старіння бітумів: Дис. на отр. учен. степ. канд. техн. наук. – Київ, 2021. http://diser.ntu.edu.ua/Kopynets_aref.pdf
68. Сюньї Г.К. Дорожній асфальтовий бетон. Київ: Госстройиздат УССР, 1962. – 264 с. [російською мовою]
69. V.I Kaskiv, O.V. Sokolov, V.V. Mozghovyi. Assessment of the impact of fly ash on the technological aging of bitumen in the asphalt binder system. *World Science* 2024. 1(83). DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30032024/8109
70. Каськів В. І., Копинець І. В., Соколов О. В. Дослідження структуровальної здатності мінерального порошку різного походження. Дороги і мости. Київ, 2022. Вип. 26. С. 36–47. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.26.036>
71. Морозов А.І. Підвищення якості щебеню з порід, що попутно-добуваються КМА і органомінеральних матеріалів на його основі: автореф. дис. на пошук. вченого. степ. к.т.н.: 05.23.05/О.І. Морозов. - Харків, 1987. - 24 с. [російською мовою]
72. ДСТУ Б EN 12607–1:2015 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення опору до твердіння під впливом теплоти та повітря. Частина 1. Метод RTFOT (EN 12607–1:2014, IDT)

73. ГОСТ 18180–72 Бітуми нафтові. Метод визначення зміни маси після прогріву (СТ СЕВ 4543–84) [російською мовою]
74. ДСТУ EN 13302:2019 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення динамічної в'язкості бітумного в'язучого з використанням ротаційного віскозиметра (EN 13302:2018, IDT)
75. ДСТУ EN 13179–1:2021 Методи випробування мінеральних наповнювачів для бітумомінеральних сумішей. Частина 1. Метод дельта кільця та кулі (EN 13179–1:2013, IDT)
76. ДСТУ EN 1427:2018 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення температури розм'якшеності за методом кільця і кулі (EN 1427:2015, IDT)
77. Каськів В. І., Соколов О. В. Теоретичне обґрунтування використання золи-винесення як наповнювача в асфальтобетоні. Дороги і мости. Київ, 2023. Вип. 28. С. 92–98. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.092>
78. Мотало В. Аналіз шкал вимірювань. Вимірювальна техніка та метрологія. – 2015. – Вип. 76. – С. 21–35
http://nbuv.gov.ua/UJRN/metrolog_2015_76_4
79. Xie, & Li, Zhenwang & Duan, & Tong,. (2020). Influence of the Mineral Powder Content on the Asphalt Aging Resistance in High–Altitude Areas Based on Indoor Ultraviolet Light Tests. Materials. DOI:10.3390/ma13030754
80. Prabir Kumar Das. Ageing of Asphalt Mixtures: Micro–scale and mixture morphology investigation. Doctoral Thesis in Civil and Architectural Engineering. Stockholm, Sweden 2014 <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:715945/FULLTEXT01.pdf>
81. Каськів В. І., Соколов О. В. Дослідження впливу наповнювачів різного походження на властивості асфальтобетонів. Дороги і мости. Київ, 2023. Вип. 27. С. 68–80. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.27.068>
82. Lasdon L.S., Fox R.L., Ratner M.W. Nonlinear optimization using the generalized reduced gradient method. // Revue française d'automatique, informatique, recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle, tome 8, no V3 (1974), p. 73–103.
http://www.numdam.org/item/RO_1974__8_3_73_0.pdf

83. ДСТУ 8772:2018 Порошок мінеральний для асфальтобетонних сумішей. Методи випробування
84. ДСТУ EN 12607–2:2019 Бітум та бітумні в’язучі. Визначення опору до твердіння під впливом тепла та повітря. Частина 2. Метод TFOT (EN 12607–2:2014, IDT)
85. ДСТУ EN 1744–4:2021 Методи випробування з визначення хімічних характеристик заповнювачів. Частина 4. Визначення стійкості наповнювачів для бітумомінеральних сумішей до дії води (EN 1744–4:2005, IDT)
86. ДСТУ Б В.2.7–319:2016 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Методи випробувань
87. ДСТУ 4044:2019 Бітуми нафтові дорожні в’язкі. Технічні умови
88. Słowik, Mięczysław; Bartkowiak, Mikołaj. Review of analytical-empirical methods for determining stiffness moduli of asphalt mixtures. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, [S.l.], v. 17, n. 1, p. 5-22, mar. 2018. ISSN 2449-769X. Available at: Date accessed: 09 Feb. 2024. doi: <http://dx.doi.org/10.7409/rabdim.018.001>
89. M. W. Witczak. Development of a master curve (E*) database for lime modified asphaltic mixtures / M. W. Witczak, Javed Bari // Arizona State University Research Project, Fulton School of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering. – 2004. July. – 29 p. https://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/master-curve.pdf
90. Маляр В.В. Прогнозування модуля пружності асфальтобетону з використанням реологічної моделі Віткача Автомобільні дороги і дорожнє. – Київ, НТУ, 2013. – Випуск №84. – С. 72–79. [російською мовою] http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/84/072–080.pdf
91. Золотарьов В. А., Пиріг Я.І., Галкін А.В. Еквіпенетраційна температура як альтернатива температурі розм’якшення бітуму. Наука та техніка у дорожній галузі. МАДІ. 2007. - №2. – С. 36–39. [російською мовою]
92. ДСТУ EN 13108–1:2019 Бітумомінеральні суміші. Технічні вимоги до матеріалів. Частина 1. Асфальтобетон (EN 13108–1:2006, IDT)

93. Галузеві розрахунки витрат ресурсів на ремонтно–будівельні роботи на автомобільних дорогах загального користування. Київ. 2022. 285 с.
94. Jazi, Marwa & Gazder, Uneb & Arifuzzaman, Md & Abid, Madiha. (2024). State-of-the-Art Review on Utilization of Fly Ash in Pavement Structures. The Journal of Engineering Research [TJER]. 20. 33–44. DOI:10.53540/tjer.vol20iss1pp33–44
95. Pine, W. J., “Superpave Gyrotory Compaction and the Ndesign Table,” internal report to Illinois Department of Transportation, 1997.
96. Vavrik, W. R., and S. H. Carpenter, “Calculating Air Voids at Specified Numbers of Gyrotations in Superpave Gyrotory Compactor,” Transportation Research Record 1630: Asphalt Mixtures: Stiffness Characterization, Variables, and Performance, Transportation Research Board, National Research Council, 1998
97. ДСТУ EN 12697–31:2021 Бітумомінеральні суміші. Методи випробування. Частина 31. Підготування зразка гіраторним ущільнювачем (EN 12697–31:2019, IDT)
98. ДСТУ ISO 6508–1:2013 Металеві матеріали. Визначення твердості за Роквеллом. Частина 1. Метод випробування (шкали А, В, С, D, E, F, G, H, K, N, T) (ISO 6508–1:2005, IDT)
99. ДСТУ ISO 4287:2012 Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення понять і параметри структури (ISO 4287:1997, IDT + ISO 4287:1997/Cor 1:1998, IDT + ISO 4287:1997/Cor 2:2005, IDT). З поправками
100. ДСТУ EN 12697–38:2021 Бітумомінеральні суміші. Методи випробування гарячих асфальтобетонних сумішей. Частина 38. Типове устаткування та калібрування (EN 12697–38:2004, IDT)
101. ДСТУ EN 12697–35:2019 Бітумомінеральні суміші. Методи випробування. Частина 35. Лабораторне змішування (EN 12697–35:2016, IDT)
102. ДСТУ EN 12697–27:2018 Бітумомінеральні суміші. Методи випробування. Частина 27. Відбирання проб (EN 12697–27:2017, IDT)

103. ДСТУ Б В.2.7–305:2015 Суміші бітумомінеральні дорожні. Загальні технічні умови
104. ГБН В.2.3–37641918–559:2019 Автомобільні дороги. Дорожній одяг нежорсткий. Проектування
105. ДСТУ Б В.2.3–42:2016 Автомобільні дороги. Методи визначення деформаційних характеристик земляного полотна та дорожнього одягу
106. ДБН В.2.3–4:2015 Автомобільні дороги. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво
107. Каськів В. І., Соколов О. В. Дослідне впровадження асфальтобетонних сумішей із золою–виносу. Вісник Національного транспортного університету. Науковий журнал. Випуск 1 (55), 2023 DOI: 10.33744/2308–6645–2023–1–55–124–130
108. Мозговий В.В. Наукові основи забезпечення температурної тріщиностійкості асфальтобетонних покриттів: Дис. на отр. учен. степ. доктора техн. наук. – Київ, 1996–530 с.

ДОДАТОК А
ПРИКЛАД ОПТИМІЗАЦІЇ ЗЕРНОВОГО СКЛАДУ МІНЕРАЛЬНОЇ
ЧАСТИНИ ГАРЯЧОЇ АСФАЛЬТОБЕТОННОЇ СУМІШІ

А.1 Вступ

Оптимізацію здійснюють з використанням математичної моделі, наведеної у п. 2.8, за критерієм мінімального відхилення лінії досліджуваної суміші від середньої лінії між нижньою і верхньою межами – лінії максимальної щільності, заданими вимогами табл. 6 – Зернові склади мінеральної частини гарячої суміші ДСТУ Б В.2.7-119 [5], методом узагальненого зведеного градієнта

Для дослідження застосовності та ефективності методів розв’язання була створена книга Excel з одним аркушем, наведеним на рис. А.1.

Аркуш з ім’ям «АСГ.Кр.Щ.Б.НП» містить п’ять таблиць, вихідною з яких є таблиця 1 – «Часткові залишки на ситі, грам». Інші таблиці є похідними від першої, отже очислюються автоматично.. Вони призначені для перетворення даних з таблиці 1. У таблиці 5 також містяться вихідні дані для побудови графіків: верхньої та нижньої границь відсоткового складу мінеральної частини АСГ; середньої між границями лінії; дані для побудови графіку лінії суміші, які обчислюють підсумовуванням для кожного розміру сит, де $\sum_{j=1}^{j=N} [\sum_{i=1}^{i=5} s_{ji} - (l_j + \frac{u_j - l_j}{2})]^2$ – вираз під коренем у формулі (2.23).

Згадані вище дані графіків ліній відображені на графіку з правого боку від таблиць.

Для даних суміші виконане умовне форматування – якщо значення суміші менші від нижньої границі, то вони виділені жовтим кольором, а якщо значення суміші більші від верхньої границі, то вони виділені блідо-червоною заливкою з темно-червоним текстом.

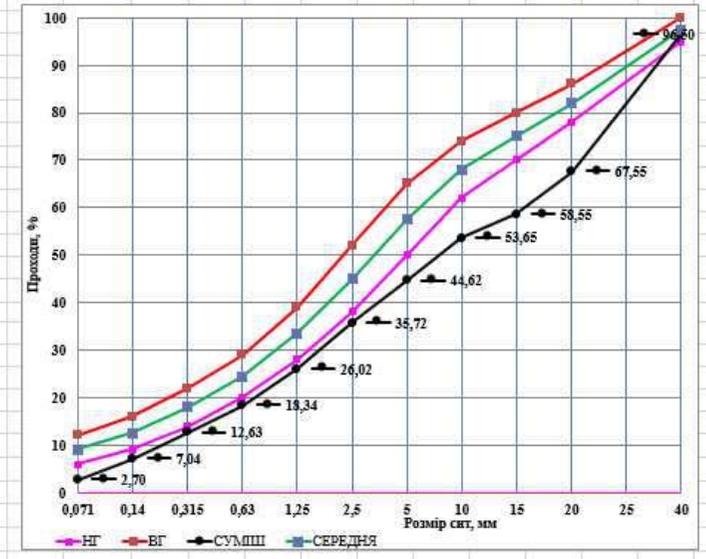
Частковий залишок на ситі, г													Сума	
	40	25	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,071		Піддон
Щебінь фр. 20-40	1000,00	0,00	18800,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20000
Щебінь фр. 10-20	0,00	0,00	500,00	6000,00	3000,00	400,00	50,00	50,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10000
Щебінь фр. 5-10	0,00	0,00	0,00	0,00	400,00	4200,00	350,00	25,00	25,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5000
Пісок	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	94,00	185,00	210,00	170,00	126,00	120,00	90,00	5,00	1000
Порошок мінеральний	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	1,35	6,36	9,69	82,43	100

Частковий залишок на ситі, %														
	40	25	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,071	Піддон	
Щебінь фр. 20-40	5,00		94,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
Щебінь фр. 10-20	0,00		5,00	60,00	30,00	4,00	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
Щебінь фр. 5-10	0,00		0,00	0,00	8,00	84,00	7,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
Пісок	0,00		0,00	0,00	0,00	9,40	18,50	21,00	17,00	12,60	12,00	9,00	0,50	100,00
Порошок мінеральний	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	1,35	6,36	9,69	82,42	100

Повні залишки на ситі, %														
	40	25	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,071	Піддон	
Щебінь фр. 20-40	5,00		99,00	99,00	99,00	99,50	99,50	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Щебінь фр. 10-20	0,00		5,00	65,00	95,00	99,00	99,50	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Щебінь фр. 5-10	0,00		0,00	0,00	8,00	92,00	99,00	99,50	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Пісок	0,00		0,00	0,00	0,00	9,40	27,90	48,90	65,90	78,50	90,50	99,50	100,00	100,00
Порошок мінеральний	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	1,53	7,89	17,58	100,00	100,00

Повні процеди через сито, %														
	40	25	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,071	0	
Щебінь фр. 20-40	95,00		1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Щебінь фр. 10-20	100,00		95,00	35,00	5,00	1,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Щебінь фр. 5-10	100,00		100,00	100,00	92,00	8,00	1,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Пісок	100,00		100,00	100,00	100,00	90,60	72,10	51,10	34,10	21,50	9,50	0,50	0,00	0,00
Порошок мінеральний	100,00		100,00	100,00	100,00	100,00	99,82	98,47	92,11	82,42	0,00	0,00	0,00	0,00

Підвірений склад суміші, %														
Компонент	40	25	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,071	0	
Щебінь фр. 20-40	28,50		0,30	0,30	0,30	0,30	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Щебінь фр. 10-20	15,00		14,25	5,25	0,75	0,15	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Щебінь фр. 5-10	5,00		5,00	5,00	4,60	0,40	0,05	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Пісок	45,00		45,00	45,00	45,00	40,77	32,45	23,00	15,35	9,68	4,28	0,23	0,00	0,00
Порошок мінеральний	3,00		3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	2,99	2,95	2,76	2,47	0,00	0,00
Суміш	96,50		67,55	58,55	53,65	44,62	35,72	26,02	18,34	12,63	7,04	2,70	0,00	0,00
Верхня границя (ВГ)	100		86	80	74	65	52	39	29	22	16	12		
Нижня границя (НГ)	95		78	70	62	50	38	28	20	14	9	6		
Середня	97,5		82	75	68	57,5	45	33,5	24,5	18	12,5	9		
Відхилення: ±	1		0	208,80	270,60	205,92	165,89	96,12	55,95	37,95	28,85	29,83	39,72	1130,64



Компоненти	Від%	До%	Змінні	Шифр	ІД Уст	ІД Дос	ІД Ком	ІД Джерела
Щебінь фр. 20-4	15,00	30,00	30,00	01/01-01	1	1	1	2
Щебінь фр. 10-2	5,00	15,00	15,00	01/01-01	1	1	2	2
Щебінь фр. 5-10	2,00	10,00	5,00	01/01-01	1	1	3	2
Пісок	40,00	55,00	45,00	01/01-01	1	1	10	2
Порошок мінер	6,00	12,00	3,00	01/01-01	1	1	11	2
		98,00						

Ціль: min=√SOS46 33,62

Умова	Колір
> вг	жовтий
< нг	рожевий
Доступ	зелений

Рисунок А.1 – Шаблон з початковим *неоптимальним* рішенням щодо відсоткового складу компонентів АСГ

У нижній таблиці містяться дані про складові компоненти суміші, обмеження на їх допустимі відсоткові інтервали значень (від-до), змінні рішення – відсотки компонентів у суміші та блок даних ідентифікації досліду.

У п. А.2 наведено числовий приклад оптимізації зернового складу мінеральної частини гарячої асфальтобетонної суміші АСГ.Кр.Щ.Б1.НП за критерієм мінімального відхилення від лінії максимальної щільності.

А.2 Вихідні дані зважувань та результат оптимізації

Вихідні дані зважувань, похідні дані від них та результат оптимізації наведені у таблицях А.1 – А.6 та на рисунках А.2 і А.3.

Таблиця А.1 – Результати зважування щебню фракції 20-40

Сито, мм	Залишок на ситі, г	Частковий залишок, %	Повний залишок, %	Повний прохід, %	Підібраний склад, %
1	2	3	4	5	6
40	1 000,00	5,00	5,00	95,00	27,55
25	-	-	-	-	-
20	18 800,00	94,00	99,00	1,00	0,29
15	0,00	0,00	99,00	1,00	0,29
10	0,00	0,00	99,00	1,00	0,29
5	0,00	0,00	99,00	1,00	0,29
2,5	100,00	0,50	99,50	0,50	0,15
1,25	100,00	0,50	100,00	0,00	0,00
0,63	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
0,315	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
0,14	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
0,071	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
Піддон	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
Σ	20 000,00	100,00	-	-	-

Таблиця А.2 – Результати зважування щебню фракції 10-20

Сито, мм	Залишок на ситі, г	Частковий залишок, %	Повний залишок, %	Повний прохід, %	Підібраний склад, %
1	2	3	4	5	6
40	0,00	0,00	0,00	100,00	10,00
25	-	-	-	-	-
20	500,00	5,00	5,00	95,00	9,50
15	6 000,00	60,00	65,00	35,00	3,50
10	3 000,00	30,00	95,00	5,00	0,50
5	400,00	4,00	99,00	1,00	0,10

Кінець таблиці А.2

1	2	3	4	5	6
2,5	50,00	0,50	99,50	0,50	0,05
1,25	50,00	0,50	100,00	0,00	0,00
0,63	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
0,315	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
0,14	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
0,071	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
Піддон	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
Σ	10 000,00	100,00	-	-	-

Таблиця А.3 – Результати зважування щєбню фракції 5-10

Сито, мм	Залишок на ситі, г	Частковий залишок, %	Повний залишок, %	Повний прохід, %	Підібраний склад, %
1	2	3	4	5	6
40	0,00	0,00	0,00	100	12,00
25	-	-	-	-	-
20	0,00	0,00	5,00	100	12,00
15	0,00	0,00	65,00	100	12,00
10	400,00	8,00	95,00	92,00	11,04
5	4 200,00	84,00	99,00	,00	0,96
2,5	350,00	7,00	99,50	0,50	0,12
1,25	25,00	0,50	100,00	0,00	0,06
0,63	25,00	0,50	100,00	0,00	0,00
0,315	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
0,14	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
0,071	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
Піддон	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
Σ	5 000,00	100,00	-	-	-

Таблиця А.4 – Результати зважування піску

Сито, мм	Залишок на ситі, г	Частковий залишок, %	Повний залишок, %	Повний прохід, %	Підібраний склад, %
1	2	3	4	5	6
40	0,00	0,00	0,00	100,00	50,00
25	-	-	-	-	-
20	0,00	0,00	0,00	100,00	50,00
15	0,00	0,00	0,00	100,00	50,00
10	0,00	0,00	0,00	100,00	50,04
5	94,00	9,40	9,40	90,60	45,30
2,5	185,00	18,50	27,90	72,10	36,05
1,25	210,00	21,00	48,90	51,10	25,55
0,63	170,00	17,00	65,90	34,10	17,05
0,315	126,00	12,60	78,50	21,50	10,75
0,14	120,00	12,00	90,50	9,50	4,75
0,071	90,00	9,00	99,50	0,50	0,25
Піддон	5,00	0,50	100,00	0,00	0,00
Σ	1 000,00	100,00	-	-	-

Таблиця А.5 – Результати зважування мінерального порошку

Сито, мм	Залишок на ситі, г	Частковий залишок, %	Повний залишок, %	Повний прохід, %	Підібраний склад, %
40	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00
25	-	-	-	-	-
20	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00
15	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00
2,5	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00
1,25	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00
0,63	0,18	0,18	0,18	99,82	0,00
0,315	1,35	1,35	1,53	98,47	0,00
0,14	9,69	6,36	7,89	92,11	0,00
0,071	82,42	9,69	17,58	82,42	0,00
Піддон	0,00	82,42	0,00	0,00	0,00
Σ	100,00	100,00	-	-	-

Таблиця А.6 – Результати оцінювання суміші перед оптимізацією

Сито, мм	Суміш, %	Верхня границя, %	Нижня границя, %	Середнє, %	Відхилення ² , %
1	2	3	4	5	6
40	96,50	100	95	97,5	1
25	-				0
20	67,55	86	78	82	208,80
15	58,55	80	70	75	270,60
10	53,65	74	62	68	205,92
5	43,94	65	50	57,5	165,89
2,5	35,22	52	38	45	86,12
1,25	26,11	39	28	33,5	55,95
0,63	18,88	29	20	24,5	37,95
0,315	13,51	22	14	18	28,85
0,14	8,17	16	9	12,5	29,83
0,071	3,94	12	6	9	39,72

Сума квадратів відхилень $\Sigma = 1\,130,64$ Корінь квадратний з суми відхилень $\sqrt{\quad} = 33,62$

Таблиця А.7 – Вихідні параметри меж визначення та відсотків складових

Компоненти	Від, %	До, %	Не оптимізовані змінні, %
Щебінь фр. 20-40	15,00	30,00	30,00
Щебінь фр. 10-20	5,00	15,00	15,00
Щебінь фр. 5-10	2,00	10,00	5,00
Пісок	40,00	55,00	45,00
Порошок мінеральний	6,00	12,00	3,00
			98,00

Таблиця А.8 – Результати після оптимізації методом зведеного градієнту

Сито, мм	Суміш оптимальна, %	Верхня границя, %	Нижня границя, %	Середнє, %	Відхилення ² , %
1	2	3	4	5	
40	99,14	100	95	97,5	2,69
25	-				0
20	82,28	86	78	82	0,08
15	73,88	80	70	75	1,25
10	68,95	74	62	68	0,90
5	55,78	65	50	57,5	2,95
2,5	45,45	52	38	45	0,20
1,25	34,42	39	28	33,5	0,85
0,63	25,60	29	20	24,5	1,21
0,315	19,00	22	14	18	0,99
0,14	12,30	16	9	12,5	0,04
0,071	6,88	12	6	9	4,49

Сума квадратів відхилень $\Sigma = 15,63$ Корінь квадратний з суми відхилень $\sqrt{} = 3,95$

Таблиця А.9 – Вихідні параметри та отримані оптимальні змінні складових суміші

Компоненти	Від%	До%	Змінні оптимальні, %
Щебінь фр. 20-40	15,00	30,00	17,20
Щебінь фр. 10-20	5,00	15,00	13,99
Щебінь фр. 5-10	2,00	10,00	9,24
Пісок	40,00	55,00	51,54
Порошок мінеральний	6,00	12,00	8,04
			100,00

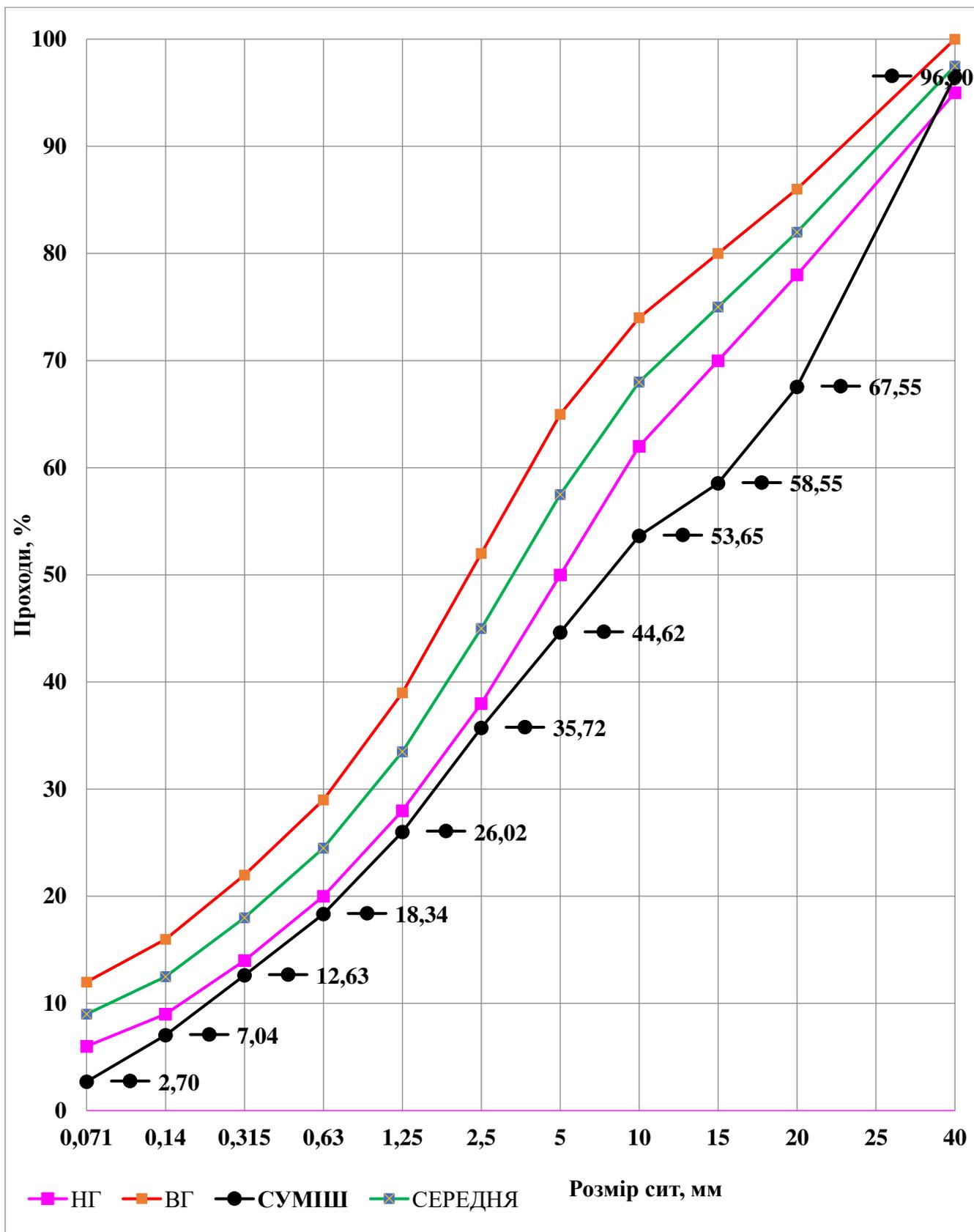


Рисунок А.2 – Початкове рішення про склад суміші

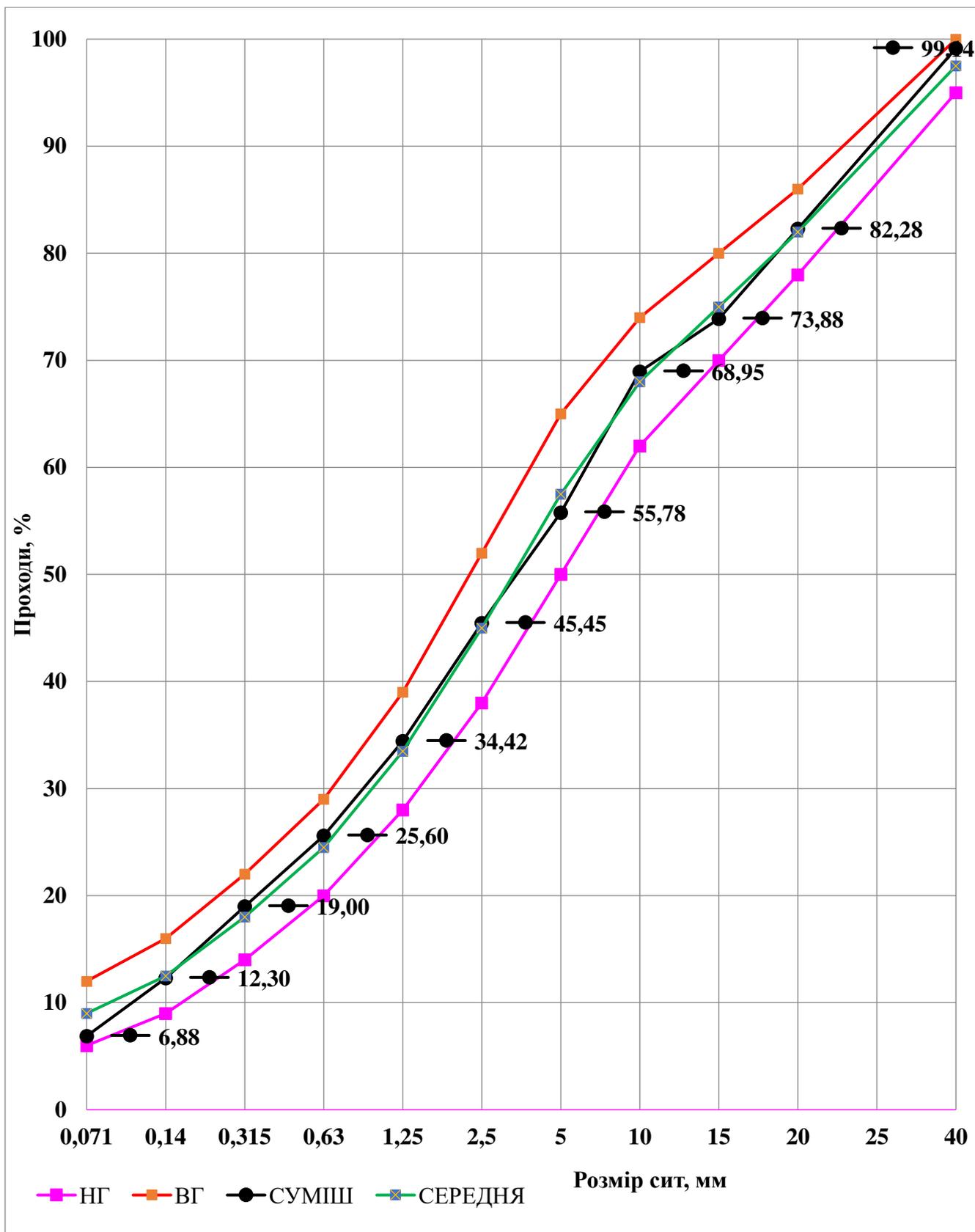


Рисунок А.3 – Оптимізований склад суміші

А.3 Використання розв'язувача Excel для оптимізації значень відсотків складових суміші

Для користування розв'язувачем виконайте цю інструкцію.

В Excel 2010 і пізніших версіях виберіть Файл > Параметри.

Примітка.: В Excel 2007 натисніть кнопку Microsoft Office Зображення кнопки Office, а потім виберіть параметри Excel.

Виберіть пункт Надбудови, а потім у полі Керування виберіть пункт Надбудови Excel.

Натисніть кнопку Перейти.

У полі Наявні надбудови встановіть прапорець для надбудови Пошук розв'язання та натисніть кнопку ОК.

Примітки.:

Якщо надбудови Пошук розв'язання немає в списку Наявні надбудови, натисніть кнопку Огляд, щоб знайти її.

Якщо з'явиться повідомлення про те, що надбудову "Пошук розв'язання" ще не інстальовано на ПК, натисніть кнопку «Так», щоб інстальувати її.

Коли ви завантажите надбудову "Пошук розв'язання", на вкладці Дані в групі Аналіз з'явиться команда Розв'язувач.

Книга і аркуш книги створюють на основі шаблону згідно п. А.1 цього додатку.

Отже, заповнюють першу таблицю шаблону Часткові залишки на ситі, г, а потім заповнюють таблицю А.7 – Вихідні параметри меж визначення та відсотків складових (або редагують її, уколи вона присутня у шаблоні). Зауважимо, що у цьому додатку таблиця А.7 навмисно містить неоптимальні змінні, для демонстрації наступної оптимізації.

Запускають розв'язувач з вже налаштованими параметрами розв'язувача (рис. А.4). Вибирають режим Розв'язати.

Параметри розв'язувача ✕

Оптимізувати цільову функцію: ↑

До: Максимум Мінімум Значення:

Змінюючи клітинки змінних: ↑

Підлягає обмеженням:

\$E\$50:\$E\$54 <= \$D\$50:\$D\$54
 \$E\$50:\$E\$54 >= \$C\$50:\$C\$54
 \$E\$55 = 100

Додати

Змінити

Видалити

Скинути

Завантажити/зберегти

Зробити необмежені змінні не від'ємними

Виберіть метод розв'язання: ↓ Параметри

Метод розв'язання

Для розв'язання гладких нелінійних задач виберіть розв'язувач нелінійних задач за методом зведеного градієнта. Для розв'язання лінійних завдань виберіть розв'язувач за симплекс-методом, для негладких завдань виберіть розвиваний розв'язувач.

Довідка
Розв'язати
Закрити

Рисунок А.4 – Налаштування параметрів розв'язувача

Після розв'язання задачі (за час до 1 секунди) видаються результати, як наведено на рис. А.5.

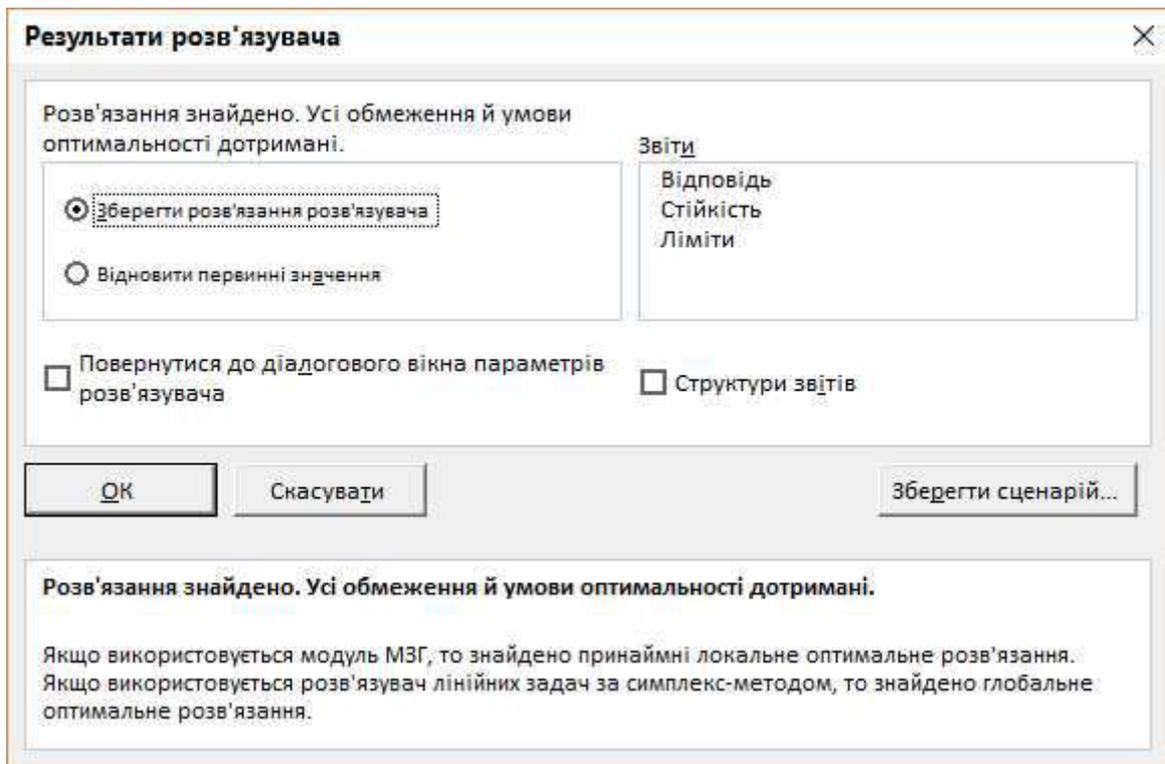


Рисунок А.5 – Результати розв'язання задачі

Можна спробувати вибрати інші методи розв'язання, наприклад, розвиваний розв'язувач. Ним задача оптимізації також буде вирішена, проте часу знадобиться значно більше (порядку 40 – 50 секунд).

Що стосується симплекс-методу, то він не може бути застосований для розв'язання обговорюваної задачі з-за того, що не виконуються умови лінійності тому що формула цільової функції є нелінійною (рис. А.6).

Можна отримати звіти з розв'язання задачі (рис. А.5 і А.6). Для цього їх потрібно виділити мишкою (одночасно всі три на рис. А.5 або на вибір). При цьому у книгу добавиться відповідна кількість аркушів.

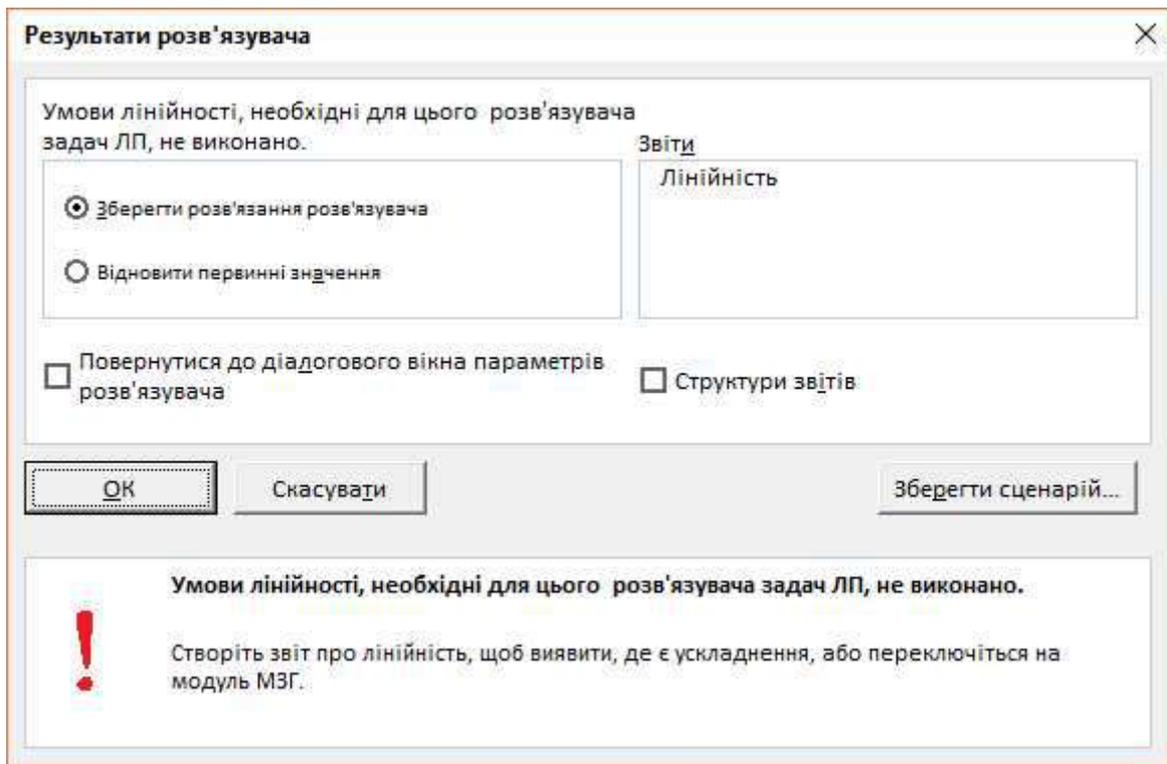


Рисунок А.6 – Повідомлення розв'язувача про неможливість застосування симплекс-методу

ДОДАТОК Б
ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ



**ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО
ВІДНОВЛЕННЯ ТА РОЗВИТКУ
ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ**

вул. Фізкультури, 9, м. Київ, 03150
Тел.: (044) 287-24-05, 287-24-49, факс: 287-42-18
E-mail: info@restoration.gov.ua
<https://www.restoration.gov.ua>
Код ЄДРПОУ 37641918

№ _____
На № _____ від _____

Соколову Олексію Владиславовичу,
bitumen_lab@ukr.net

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційного дослідження
Соколова Олексія Владиславовича

Даною довідкою підтверджується, що результати дисертаційної роботи Соколова О.В. було впроваджено в Державному агентстві автомобільних доріг України (Укравтодор) при виконанні науково-дослідних робіт згідно з договором № 57-21 від 30 серпня 2021 року «Провести дослідження, переглянути ДСТУ Б В.2.7-121:2014 «Порошок мінеральний для асфальтобетонних сумішей. Технічні умови» та розробити зміну до ДСТУ 8772:2018 «Порошок мінеральний для асфальтобетонних сумішей. Методи випробування»» (№ державної реєстрації 0121U112736). В результаті виконання роботи були розроблені:

- Зміна № 1 ДСТУ 8772:2018 «Порошок мінеральний для асфальтобетонних сумішей. Методи випробування»;
- ДСТУ 9246-1:2023 «Заповнювачі для асфальтобетонних сумішей та матеріалів, оброблених бітумним в'язучим. Технічні умови. Частина 1. Наповнювач».

Заступник Голови з питань
цифрового розвитку, цифрових
трансформацій і цифровізації

Роман КОМЕНДАНТ

Тетяна КРИВОБОК



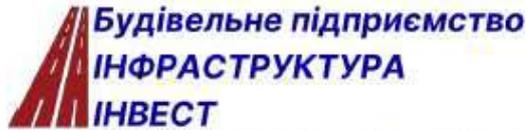
Вихідний документ
(Підписано кваліфікованим електронним підписом)

Сертифікат 6FA97849F1B2570D04000000307F0000C9F90200
Підписувач Комендант Роман Анатолійович
Дійсний з 05.02.2024 15:43:00 по 05.02.2025 15:43:00

Державне агентство відновлення та
розвитку інфраструктури України



1232/5/13-01/14
від 22.03.2024



**Будівельне підприємство
ІНФРАСТРУКТУРА
ІНВЕСТ**

**ТОВ «БУДІВЕЛЬНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«ІНФРАСТРУКТУРА ІНВЕСТ»**

☎ 03049, м. Київ, вул. Генерала Геннадія Воробйова, буд. 10
+38 (097) 428-5678

✉ bp@infrastructure-invest.com; www.infrastructure-invest.com

ТОВ «БП»Інфраструктура Інвест», код ЄДРПОУ 42829880, ІВАН UA82 305299 00000 26006010109998 у банку АТ КБ "Приватбанк"

м. Київ

ДОВІДКА

про впровадження наукових результатів дисертаційної роботи

Соколова Олексія Владиславовича

Наукові результати та практичні рекомендації дисертаційного дослідження Соколова О.В. щодо застосування золи-винесення в асфальтобетонних сумішах в якості наповнювача отримали практичне використання під час проектування складу асфальтобетонної суміші в ТОВ «БУДІВЕЛЬНЕ ПІДПРИЄМСТВО «ІНФРАСТРУКТУРА ІНВЕСТ», зокрема було використано розроблену програму оптимізації підбору зернового складу.

Директор ТОВ
«БП «ІНФРАСТРУКТУРА ІНВЕСТ»



А. А. ЯРОШЕВИЧ



020900

УКРАЇНА

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

 вул. М.Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, Україна, 01010. т.ф. +38 (044) 280 82 03, т. +38 (044) 280 87 65
 e-mail: general@ntu.edu.ua, код ЄДРПОУ 02070915

25.03.2024 № 396/14

на № _____

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Результати дисертаційної роботи Соколова Олексія Владиславовича було впроваджено у навчальний процес при викладанні дисциплін: «Технології будівництва доріг», «Сучасні технології будівництва доріг» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія», освітньо-професійної програми «Автомобільні дороги, вулиці та дороги населених пунктів», а також як теоретико - науковий базис під час підготовки кваліфікаційних робіт бакалаврів та магістрів зі спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія», освітньо-професійної програми «Автомобільні дороги, вулиці та дороги населених пунктів».

 Проректор з навчальної роботи НТУ,
 канд. техн. наук, доцент


Віталій ХАРУТА

 Декан факультету
 транспортного будівництва НТУ,
 д-р техн. наук, професор

Андрій БУБЕЛА



ВІДОКРЕМЛЕНИЙ ПІДРОЗДІЛ
 «БУРШТИНСЬКА ТЕПЛОВА
 ЕЛЕКТРИЧНА СТАНЦІЯ
 АТ «ДТЕК ЗАХІДЕНЕРГО»
 код ЄДРПОУ 00131541
 м. Бурштин, Івано-Франківська обл.
 77112, Україна
 тел.: +38 034 384 41 81
 факс: +38 034 384 63 30
 ІВАН UA763365030000026000300673350
 у філії Івано-Франківського
 управління АТ «Ощадбанк» ТБ68 № 10008/065

01.01.24 № 01/845
 На № _____ від _____

ДОВІДКА

Даною довідкою підтверджується, що з боку ДП «ДерждорНД» здійснювався науковий супровід проекту з ремонту ділянки автомобільної дороги до прохідної ДТЕК Бурштинської ТЕС з використанням наукових досліджень Соколова О.В. щодо можливості використання золи-винесення в асфальтобетонних сумішах для влаштування конструктивних шарів дорожнього одягу.

Директор ДТЕК БТЕС

Вадим СИМАКОВ



УКРАЇНА



СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 124925

Стаття «Дослідження властивостей зол-виносу різного походження на відповідність національним вимогам»
(вид, назва твору)

Автор (співавтори) Соколов Олексій Владиславович
(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності), псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать повністю Соколов Олексій Владиславович, вул. Незалежності, 2, кв. 308, м. Бровари, Київська обл., 07400
(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності) фізичної особи / найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації 19 березня 2024 р.

**Директор Державної організації
«Український національний
офіс інтелектуальної власності
та інновацій»**


Олена ОРЛЮК



ДОДАТОК В
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА
ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Список опублікованих праць за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. V.I Kaskiv, O.V. Sokolov, V.V. Mozghovyi. Assessment of the impact of fly ash on the technological aging of bitumen in the asphalt binder system. *World Science* 2024. 1(83). DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30032024/8109

2. Ivan Kopynets, Oleksii Sokolov, Comparison of density of asphalt concrete mixture with fly ash and limestone filler. *Modern Science*. 2023 No 4
DOI: 10.62204/2336-498X-2023-4-15

Статті у фахових виданнях:

3. Соколов О. В., Желотобрюх А. Д., Копинець І. В., Каськів В. І. Використання відходів промисловості в дорожньому будівництві. *Дороги і мости*. 2020. Вип. 21. С. 110–119.

DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.110>

4. Копинець І.В., Соколов О.В., Желтобрюх А.Д., Головченко В.С. Дослідження можливості використання дробильних матеріалів виробництва ВАТ «Нікопольський завод феросплавів» під час будівництва доріг. *Автошляховик України*. № 4. 2020.

DOI: [10.33868/0365-8392-2020-4-264-52-58](https://doi.org/10.33868/0365-8392-2020-4-264-52-58)

5. Каськів В. І., Копинець І. В., Соколов О. В. Дослідження властивостей пилюватих відходів з електрогенеруючих підприємств України. *Дороги і мости*. 2021. Вип. 23. С. 94–101.

DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.23.094>

6. Каськів В. І., Копинець І. В., Соколов О. В. Дослідження золи-винесення електрогенеруючих підприємств з метою її використання як альтернативи

вапняковому мінеральному порошку для виробництва асфальтобетонних сумішей. *Дороги і мости*. 2021. Вип. 24. С. 40–47.

DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.24.040>

7. Каськів В. І., Копинець І. В., Соколов О. В. Дослідження структуровальної здатності мінерального порошку різного походження. *Дороги і мости*. 2022. Вип. 26. С. 36–47.

DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.26.036>

8. Соколов О. В. Дослідження властивостей зол-виносу різного походження на відповідність національним вимогам. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2023. Вип. 113.2. С. 82-89.

DOI: 10.33744/0365-8171-2023-113.2-082-089

9. Каськів В. І., Соколов О. В. Дослідження впливу наповнювачів різного походження на властивості асфальтобетонів. *Дороги і мости*. 2023. Вип. 27. С. 68–80.

DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.27.068>

10. Соколов О. В. Підбір оптимальних зернових складів асфальтобетонних сумішей у середовищі MS Excel. *Дороги і мости*. 2023. Вип. 28. С. 159–171.

DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.159>

11. Каськів В.І., Соколов О. В. Дослідне впровадження асфальтобетонних сумішей із золою-виносу. *Вісник Національного транспортного університету*. Випуск 55. 2023. С. 124 – 130.

DOI: 10.33744/2308-6645-2023-1-55-124-130

Опубліковані праці апробаційного характеру:

12. Каськів В. І., Соколов О. В. Зола-виносу як альтернатива вапняковому мінеральному порошку під час виробництва асфальтобетонних сумішей. *LXXVII Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів,*

студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету, НТУ, 2021 р. С. 163.

13. Каськів В.І., Соколов О.В., Касай К.І. Дослідження золи-винесення як заміну традиційним мінеральним порошкам. *LXXVIII Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету, НТУ, 2022 р. С. 92.*

DOI: 10.33744/2786-6459-2022-78

14. Олексій Соколов. Дослідження впливу наповнювачів різного походження на властивості асфальтобетонів. *Матеріали міжнародної конференції «Впровадження інноваційних матеріалів і технологій при проєктуванні, будівництві та експлуатації об'єктів транспортної інфраструктури в рамках програми «Велике будівництво».* НТУ, 2022. С. 363.

DOI: 10.33744/978-966-632-317-3-2022-2

15. Копинець І.В., Соколов О.В., Желтобрюх А.Д., Головченко В.С. Установлення впливу методу ущільнення на об'ємні властивості асфальтобетонів. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Органічні і мінеральні в'язучі та дорожні бетони на їх основі". ХНАДУ, 2022. С. 76-79.*

ISBN 978-617-8009-87-8

16. Копинець І.В., Соколова О.Б., Соколов О.В., Юнак А.Л. Уточнення технологічних температур виробництва та ущільнення асфальтобетонних сумішей. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Органічні і мінеральні в'язучі та дорожні бетони на їх основі". ХНАДУ, 2022. С. 68-71.*

ISBN 978-617-8009-87-8

17. Соколов О.В. Оцінювання структурувальної здатності мінерального порошку в широкому діапазоні температур. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Органічні і мінеральні в'язучі та дорожні бетони на їх основі". ХНАДУ, 2022. С. 133-136.*

ISBN 978-617-8009-87-8

18. Каськів В. І., Соколов О. В. Дослідження структурувальної здатності мінерального порошку різного походження. *LXXVIV Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету, НТУ, 2023 р. С. 161.*

DOI: 10.33744/2786-6459-2023-79