

УДК 625.168  
UDK 625.168

DOI:10.33744/0365-8171-2024-115.1-049-056

**ВИЗНАЧЕННЯ МОДУЛЯ ПРУЖНОСТІ АСФАЛЬТОБЕТОНУ З ЗОЛОЮ ВИНЕСЕННЯ  
З ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛІ ВІТЧАКА**

**DETERMINATION OF MODULUS OF ELASTICITY OF ASPHALT CONCRETE WITH  
FLY ASH USING THE WITCZAK MODEL**



*Соколов Олексій Владиславович, завідувач лабораторії випробувань матеріалів відділу матеріалів Центру досліджень розвитку та утримання об'єктів інфраструктури ДП "НІРІ", e-mail: [bitumen\\_lab@ukr.net](mailto:bitumen_lab@ukr.net)*

<https://orcid.org/0000-0002-4694-9647>

**Анотація.** В Україні близько 30% всієї електроенергії виробляється від спалювання твердого палива - вугілля, сланцю, торфу. В нашій країні налічується близько 15 діючих ТЕС на яких вторинним продуктом утворюється близько 5-6 млн. тон золошлакових відходів в рік. 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 (1200-1700 °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.

В Україні як наповнювач використовують переважно матеріал, отриманий подрібненням карбонатних гірських порід, що встановлено в національних стандартах. В той же час на електрогенеруючих підприємствах України в результаті спалювання вугілля утворюються мільйони тон пилоподібних відходів – золи винесення. Даний матеріал за показниками наближається до вимог до наповнювача згідно з національного стандарту та може бути використаний для виробництва асфальтобетонних сумішей.

Під час досліджень використовували золи виносу Бурштинської ТЕС та вапняковий мінеральний порошок Скало-Подільського спец кар'єру .

**Ключові слова.** мінеральний порошок, зола винесення, екологія, модуль пружності, асфальтобетон.

**Вступ.** Постійне зростання обсягів будівництва автомобільних доріг у сучасному світі вимагає пошуку економічно та екологічно збалансованих рішень щодо використання матеріалів. Одним з основних матеріалів для влаштування монолітних шарів дорожнього одягу є асфальтобетонні суміші. Збільшення попиту на ці суміші призводить до важливого питання щодо джерел їх складників. У цьому

контексті використання побічних продуктів промисловості для вироблення асфальтобетонних сумішей стає актуальним та стратегічно важливим аспектом сучасної будівельної індустрії.

Одним з складників асфальтобетонних сумішей є наповнювач, який використовують для покращення механічних властивостей та довговічності асфальтобетону. Одним із типів наповнювачів є карбонатні мінеральні порошки, які широко використовують не тільки дорожньому будівництві, а і в інших будівельних галузях.

Як відомо, якість асфальтобетонної суміші, а отже, шару асфальтобетону, в більшості визначається структурно-механічними характеристиками асфальтов'язучого, яке представляє собою бінарну систему органічного в'язівника (бітуму) та наповнювача. Як наповнювач використовують різноманітні матеріали, вимоги до яких визначені в національних стандартах. Функціональне призначення наповнювача полягає в заповненні пор між більш крупними зернами та утворенні разом з бітумом асфальтов'язучої речовини, підвищуючи його в'язкість та склеювальну здатність. Завдяки великій площі адсорбційної поверхні наповнювач надає асфальтобетону необхідні характеристики міцності та стійкості.

Традиційно для вироблення асфальтобетонних сумішей застосовують наповнювачі карбонатного складу. Зазвичай їх отримують подрібненням природної сировини - карбонатних гірських порід різного походження. На їхню частку в осадовій оболонці Землі припадає близько 14 %.

Карбонатні породи високої якості, які задовольняють вимогам національних стандартів, з одного боку, не є доступними у всіх регіонах країни, а з іншого боку, їх використовують в інших галузях промисловості і вони є досить вартісними. Тому у технології вироблення асфальтобетонних сумішей розглядають використання різних вторинних продуктів промисловості, що задовольняють вимоги до складу, дисперсності та інших фізико-механічних властивостей.

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, ремонтування та реконструювання 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 складник асфальтобетонних сумішей, постійно зменшуються, тому необхідно шукати альтернативні джерела сировини для будівельних матеріалів та вивчати можливість їх застосування. У зв'язку з цим найбільш ефективним використанням місцевих сировинних ресурсів є використання вторинних продуктів промисловості, що стане одним із вирішень проблеми сировинних матеріалів неорганічного походження.

В Україні близько 30 % всієї електроенергії отримують спалюванням твердого палива - вугілля, сланцю, торфу. В Україні налічується близько 15 працюючих ТЕС на яких в рік утворюється близько 5-6 млн. т. золошлакових відходів. Таким чином, відходи паливно-енергетичного комплексу, що утворюються на теплових електростанціях, являють собою величезні скупчення золи у вигляді пилоподібних залишків і шматкового шламу, а також різні золошлакові суміші. Ці продукти високотемпературного оброблення (1200-1700 °С) мінеральної частини палива знайшли широке застосування в багатьох країнах світу і враховуючи світову тенденцію до збільшення частки вторинного ринку використання вторинних продуктів промисловості, слід прогнозувати підвищення темпів їх перероблення і в Україні [1].

Зола винесення є вторинним продуктом промисловості, який утворюється з мінеральної частини твердого палива. Цю золу збирають з димових газів теплових електростанцій

золоуловлювальними пристроями. Залежно від типу цих пристроїв, золу можна утримувати у вологому або сухому стані. Механізм утворення вторинних продуктів залежить від таких факторів, як вид палива, спосіб спалювання та температура спалювання [2].

Розмір частинок золи варіюється від мікрон до 0,63 мм, що робить її тонкодисперсним матеріалом. Цю золу виносять димові гази, зола осідає у золоуловлювачах, таких як електрофільтри, де вона накопичується в силосних баштах.

Під час будівництва автомобільних доріг з нежорстким дорожнім одягом, одним із ключових аспектів, який враховують, 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 експлуатування. Наприклад, асфальтобетон, який є одним з найпоширеніших матеріалів шарів дорожнього одягу, має високий модуль пружності, що робить його стійким до навантажування та деформування.

Проте, властивості шару асфальтобетону та його механічні характеристики можуть значно варіюватися залежно від умов експлуатування та швидкості навантажування. Наприклад, дороги, які мають значну кількість вантажних транспортних засобів у складі руху або піддаються частим ремонтам, можуть вимагати більш міцного дорожнього одягу з вищим модулем пружності для забезпечення довговічності та безпеки дорожнього руху.

Під час проектування дорожнього одягу, інженери враховують модуль пружності кожного шару, які використовують, 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, постійне оцінювання та перевіряння стану дорожнього одягу є невід'ємною частиною процесу утримування автомобільних доріг. Це дозволяє своєчасно виявляти будь-які дефекти або деформації та виконувати потрібні заходи для їх усунення.

Узагальнюючи, модуль пружності є ключовим параметром під час розрахування міцності дорожнього одягу. Він визначає здатність матеріалу відновлювати свою форму та розміри після впливу зовнішніх сил і відіграє важливу роль у забезпеченні безпеки дорожнього руху. Якісний розрахунок модуля пружності забезпечує дорожній мережі надійність та стійкість впродовж тривалого часу.

**Виклад основного матеріалу.** Для визначення модуля пружності асфальтобетонів було прийнято модель М. Вітчака [3], яка набула значного поширення в Україні [4,5]:

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

де  $E^*$  – динамічний модуль пружності,  $10^5$  фунт на квадратний дюйм;

$\eta$  – 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;

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

В'язкість бітуму за різних температур визначали за залежністю [3]:

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

де  $P$  – пенетрація бітуму за різної температури, визначена згідно з методикою ХНАДУ [6].

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  $25^\circ\text{C}$ , можна визначити його пенетрацію за температури  $T$  за формулою:

$$\log P_T = \frac{\log 800 - \log P_{25}}{T_p - 25} \cdot (T - 25) + \log P_{25} \quad (3)$$

Був здійснений розрахунок з визначення модуля пружності за різних температур та різної частоти деформування, визначені на основі залежностей (2) та (3) в'язкість та пенетрація за різних температур.

На основі встановлених залежностей в'язкості бітуму від температури, даних щодо зернового складу асфальтобетону та його об'ємних властивостей, визначено модулі пружності асфальтобетону за частоти деформування 0,8 Гц та 1,59 Гц, що прирівнюються до швидкості руху автомобіля 50 та 100 км/год відповідно. Раніше було встановлено, що використання золи винесення поліпшує ущільнюваність асфальтобетонної суміші, та дозволяє зменшити оптимальний вміст бітуму орієнтовно на 0,5 % [7], тому для порівняння було прийнято асфальтобетони з однаковою залишковою пористістю, але з різним вмістом об'ємного бітуму. Результати визначень наведено в таблиці 1. Графічне зображення залежності логарифмів модуля пружності від температури зображено на рисунку 1 та 2.

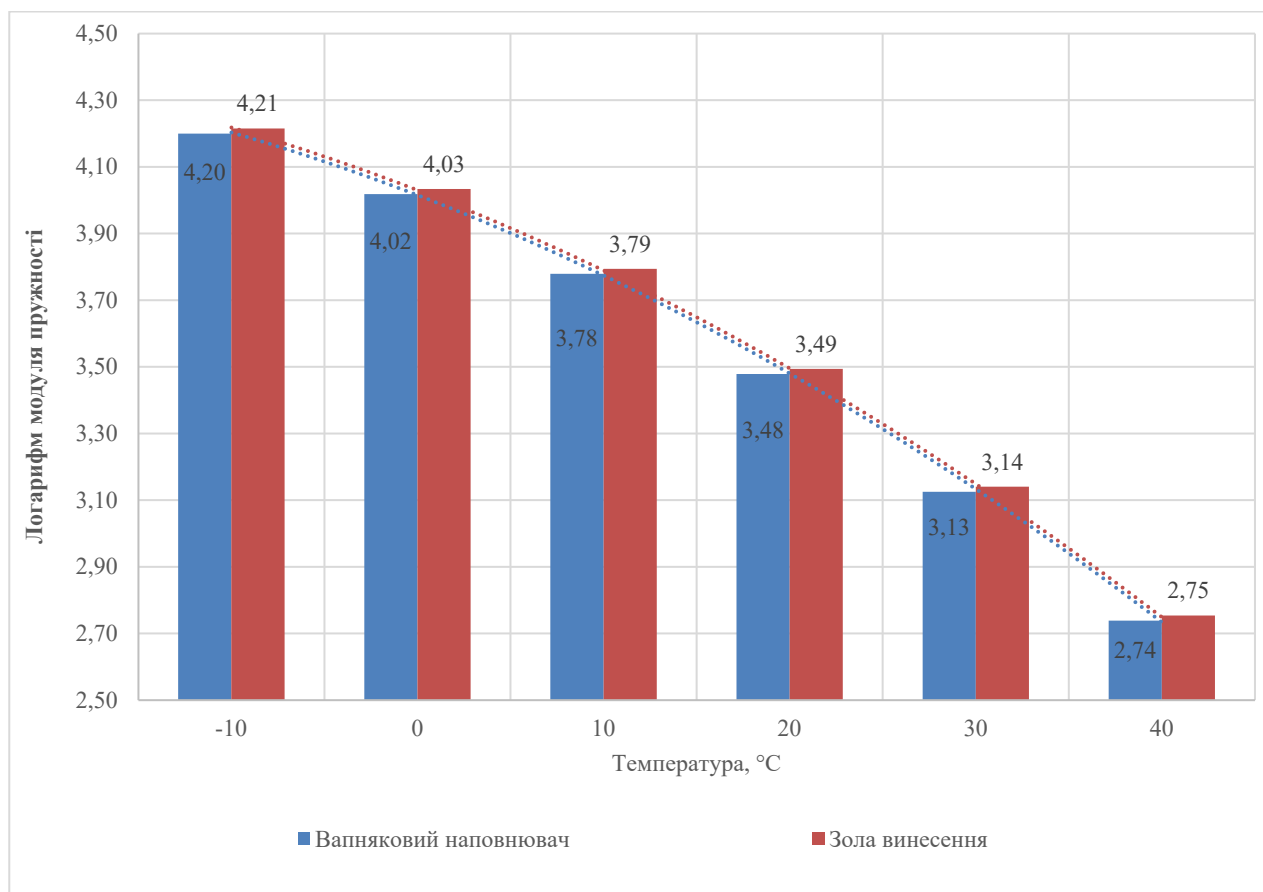
**Таблиця 1** – Результати визначення модуля пружності

**Table 1** – Results of determining the modulus of elasticity

Температура	Результати визначення модуля пружності, МПа,			
	асфальтобетону з вапняковим наповнювачем за частоти		асфальтобетону з золою винесення за частоти	
	0,8 Гц	1,59 Гц	0,8 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

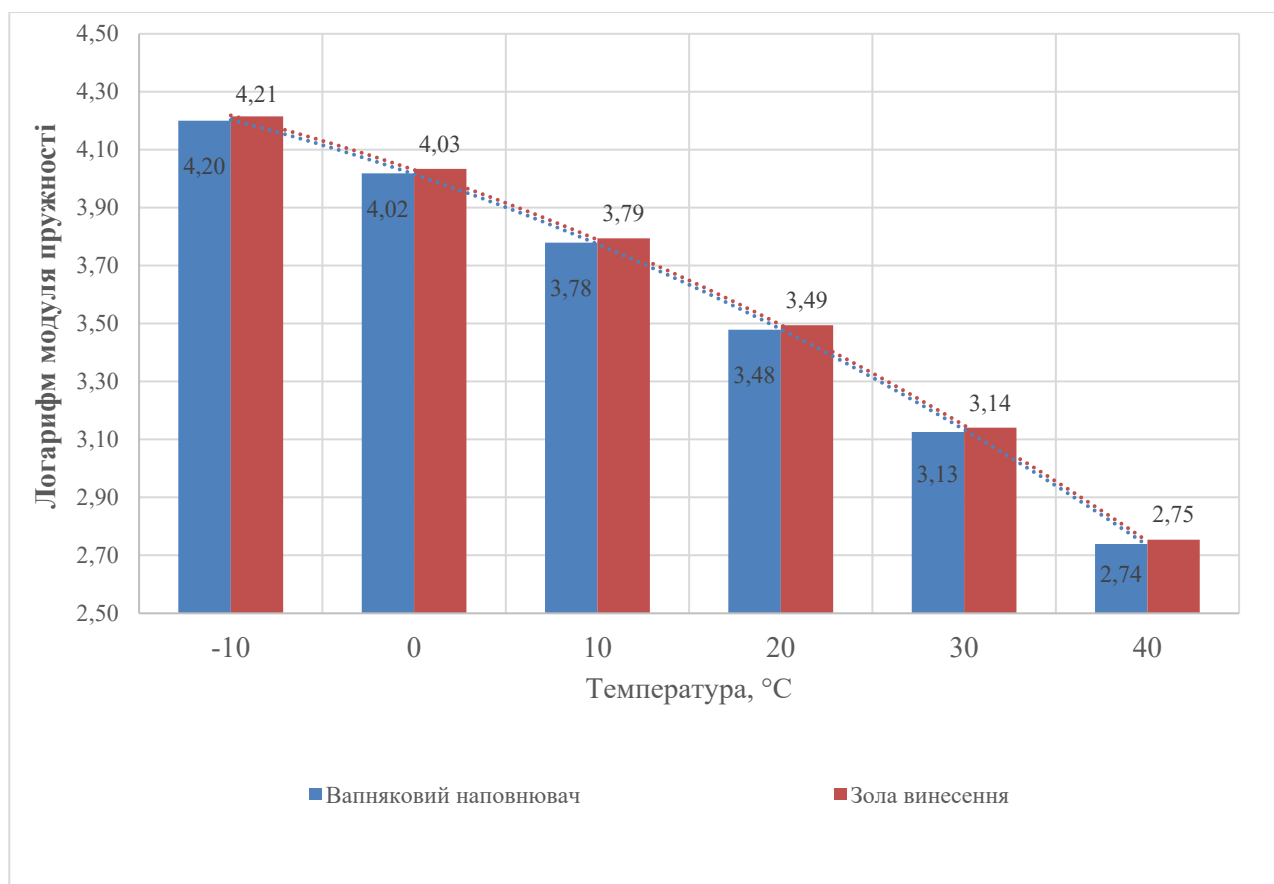
Вищим значенням модуля пружності за температури 10 °С за частоти деформування 0,8 Гц відзначається асфальтобетон з золою винесення. Він є на 3,8 % вищим за модуль пружності асфальтобетону з вапняковим наповнювачем, а за частоти деформування 1,59 Гц на 3,9 %.

З підвищенням температури залежність зміни модуля пружності асфальтобетону з золою винесення залишається сталою. Це свідчить про те що, асфальтобетон з золою винесення зі зменшеною кількістю бітуму на 0,5 % завдяки зменшеному вмісту об'ємного бітуму і більшому його структуруванню, переважає асфальтобетон із вапняковим наповнювачем.



**Рисунок 1** – Графічне зображення залежності логарифмів модуля пружності від температури зображено за частоти деформування 0,8 Гц

**Figure 1** – Graphical representation of the dependence of the logarithms of the modulus of elasticity on temperature is shown at a deformation frequency of 0.8 Hz



**Рисунок 2** – Графічне зображення залежності логарифмів модуля пружності від температури зображено за частоти деформування 1,59 Гц

**Figure 2** – Graphic representation of the dependence of the logarithms of the modulus of elasticity on temperature is shown at a deformation frequency of 1.59 Hz

У випадку зниження температур спостерігається відповідна тенденція. За температури мінус 10 °C, модуль пружності асфальтобетону з золою виносення також на 3,7 % більший за модуль пружності асфальтобетону з вапняковим наповнювачем.

**Висновки.** Зола виносення, 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 виносення 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 виносення, має покращену тривалість служби, а витрати на його експлуатацію знижуються, що є важливим фактором у плануванні і утриманні дорожньої інфраструктури.



**Перелік посилань**

1. 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
2. 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.
3. M. W. Witzczak Development of a master curve (E\*) database for lime modified asphaltic mixtures / M. W. Witzczak, Javed Bari // Arizona State University Research Project, Fulton School of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering. – 2004. July. – 29 p.
4. Маляр В.В. Прогнозирование модуля упругости асфальтобетона с использованием реологической модели Виткача / В.В. Маляр // Автомобільні дороги і дорожнє. – Київ, НТУ, 2013. – Випуск №84. – С. 72-79.
5. Копинець І.В. Підвищення довговічності асфальтобетонного покриття шляхом зменшення технологічного старіння бітумів. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Національний транспортний університет. Київ 2021 р.
6. Золотарев В. А. Эквипенетрационная температура как альтернатива температуре размягчения битума / Золотарев В.А., Пыриг Я.И., Галкин А.В. // Наука и техника в дорожной отрасли. М.: МАДИ. – 2007. - №2. – С. 36-39.
7. 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.

**DETERMINATION OF MODULUS OF ELASTICITY OF ASPHALT CONCRETE WITH FLY ASH USING THE WITCZAK MODEL**

**Oleksiy Sokolov**, head of the material testing laboratory of the materials department of the Research Center for the Development and Maintenance of Infrastructure Facilities of SE "NIRI", e-mail: [bitumen\\_lab@ukr.net](mailto:bitumen_lab@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-4694-9647>

**Summary.** In Ukraine, about 30% of all electricity is produced by burning solid fuels - coal, shale, and peat. In our country, there are about 15 operating thermal power plants, which generate about 5-6 million tons of ash and slag waste as a secondary product per year. Thus, the waste of the fuel and energy complex, which is formed in the furnaces of thermal power plants, is a huge accumulation of ash in the form of dust-like residues and lumpy sludge, as well as various ash-slag mixtures. These products of high-temperature processing (1200-1700 °C) of the mineral part of the fuel are widely used in many countries of the world, and taking into account the global trend of increasing the share of the secondary market for the use of waste, it is necessary to predict an increase in the rate of their processing in Ukraine as well.

**Problems.** In Ukraine, as a filler, the material obtained by crushing carbonate rocks is used as a filler, which is established in DSTU B B.2.7-121. At the same time, as a result of burning coal, millions of tons of dust-like waste - fly ash - are generated at power-generating enterprises of Ukraine. In terms of indicators, this material approaches the requirements for filler according to DSTU B V.2.7-121 and can be used for the production of asphalt concrete mixtures.

*The purpose* of the work is to compare the predicted modulus of elasticity of asphalt concrete with different fillers.

*Materials and methods.* During the research, fly ash from the Burshtyn TPP and limestone mineral powder from the Skalo-Podilsky special quarry were used.

*The results.* It was established that the modulus of elasticity of asphalt concrete with fly ash is greater than that of asphalt concrete with limestone filler.

*Conclusions.* The use of fly ash due to the improvement of compaction of the asphalt concrete mixture allows not only to reduce the content of bitumen in the composition of the asphalt concrete mixture, but also to increase the modulus of elasticity of asphalt concrete.

**Key words.** mineral powder, ash removal, ecology, modulus of elasticity, asphalt concrete.

### References

1. Sokolov O.V. Research on the properties of fly ash of various origins for compliance with national requirements. Roads and road construction. 2023. Issue 113.2. P. 82-89. DOI: 10.33744/0365-8171-2023-113.2-082-089
2. Sokolov O. V., Zhelotobryukh A. D., Kopynets I. V., Kaskiv V. I. Use of industrial waste in road construction // Roads and Bridges. – 2020. – Issue 21. – pp. 110-119.
3. M. W. Witzak Development of a master curve (E\*) database for lime modified asphaltic mixtures / M. W. Witzak, Javed Bari // Arizona State University Research Project, Fulton School of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering. - 2004. July. - 29 p.
4. Painter V.V. Prediction of modulus of elasticity of asphalt concrete using the rheological model of Wytkača / V.V. Painter // Roads and roads. – Kyiv, NTU, 2013. – Issue #84. - P. 72-79.
5. Kopynets I.V. Increasing the durability of the asphalt concrete coating by reducing the technological aging of bitumen. Qualifying scientific work on manuscript rights. National Transport University. Kyiv 2021
6. Zolotarev V.A. Equipenetration temperature as an alternative to bitumen softening temperature / Zolotarev V.A., Pyrig Y.I., Galkin A.V. // Science and technology in the road industry. M.: MADI. – 2007. - #2. - P. 36-39.
7. V. I. Kaskiv, I. V. Kopynets, and O. V. Sokolov. Research on fly ash of power-generating enterprises with the aim of using it as an alternative to limestone mineral powder for the production of asphalt concrete mixtures. Roads and bridges. 2021. Issue 24. C. 40–47.

*Дата надходження до редакції 02.04.2024.*