https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.27.091

УДК 691.16

Копинець І. В., *канд. техн. наук, https://orcid.org/0000-0002-0908-4795*
Соколов О. В., *https://orcid.org/0000-0002-4694-9647*
Желтобрюх А. Д., *https://orcid.org/0000-0003-0764-8793*
Головченко В. С., *https://orcid.org/0000-0001-5078-8682*

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

ЗАЛЕЖНІСТЬ ОБ'ЄМНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АСФАЛЬТОБЕТОНУ ВІД НАЙБІЛЬШОГО НОМІНАЛЬНОГО РОЗМІРУ ЗЕРЕН ЗАПОВНЮВАЧА ТА МЕТОДУ УЩІЛЬНЕННЯ

Анотація

Вступ. Одним з аспектів євроінтеграції України є впровадження європейських підходів до проєктування складу асфальтобетонних сумішей. В Україні, як і в інших європейських країнах, під час проєктування складу асфальтобетонних сумішей виготовляють зразки асфальтобетону ущільненням в лабораторних умовах, однак з цією метою використовують різні методи ущільнення.

Проблематика. В Україні для ущільнення асфальтобетонних сумішей в лабораторних умовах використовують метод пресування за тиску (30,0 ± 0,3) МПа, якщо вміст щебеню у суміші більше або дорівнює 35 %, або за тиску (40,0 ± 0,4) МПа, якщо вміст щебеню в суміші становить до 35 %. У країнах Європейського Союзу з цією метою переважно використовують метод ударного ущільнення Маршала за 100 ударів (по 50 ударів з кожного боку). Тому, доцільно установити вплив методу ущільнення асфальтобетонних сумішей на об'ємні властивості асфальтобетону залежно від найбільшого номінального розміру зерен заповнювача та методу ущільнення.

Мета. Встановити залежність об'ємних властивостей асфальтобетону від найбільшого номінального розміру зерен заповнювача та методу ущільнення.

Матеріали і методи. Аналізування літературних джерел та проведення лабораторних досліджень.

Результати. Під час збільшення вмісту бітуму має місце зменшення максимальної щільності асфальтобетонної суміші та зростання об'ємної щільності асфальтобетону. Збільшення об'ємної щільності асфальтобетону пов'язано як із поліпшенням ущільнення асфальтобетонної суміші в результаті збільшення вмісту бітуму, так і з більшим заповненням повітряних пор, про що свідчать значення вмісту пор у мінеральному заповнювачі. Винятком є тільки асфальтобетонна суміш АС 16, для якої значення вмісту пор у мінеральному заповнювачі є незмінними, тобто у даному випадку збільшення об'ємної щільності відбувається виключно заповненням пор у мінеральному заповнювачі. Найбільший номінальний розмір заповнювача у складі асфальтобетонної суміші впливає на загальний вміст пор у мінеральному заповнювачі. Це дозволяє стверджувати, що збільшення необхідного вмісту бітуму в асфальтобетонній суміші із зменшенням найбільшого номінального розміру заповнювача значним чином пов'язане з необхідністю заповнення більшої кількості пор, а не із збільшенням загальної питомої поверхні заповнювача.

Висновки. Об'ємні властивості асфальтобетонів залежать від вмісту бітуму в асфальтобетонній суміші та найбільшого номінального розміру заповнювача. Збільшення вмісту бітуму призводить до зменшення максимальної щільності асфальтобетонної суміші, залишкової пористості та водонасичення асфальтобетону, а також збільшення вмісту пор, заповнених в'яжучим. При цьому вміст бітуму практично не впливає на відсоток пор у мінеральному

заповнювачі. Зменшення найбільшого номінального розміру заповнювача призводить до збільшення відсотку пор у мінеральному заповнювачі.

Ключові слова: асфальтобетон, бітум, заповнювач, об'ємні властивості, оптимальний вміст бітуму.

Вступ

Одним з аспектів євроінтеграції України є впровадження європейських підходів до проєктування складу асфальтобетонних сумішей. В Україні, як і в інших європейських країнах, під час проєктування складу асфальтобетонних сумішей виготовляють зразки асфальтобетону ущільненням в лабораторних умовах, однак з цією метою використовують різні методи ущільнення. В Україні для ущільнення асфальтобетонних сумішей в лабораторних умовах використовують метод пресування за тиску (30,0 ± 0,3) МПа, якщо вміст щебеню у суміші більше або дорівнює 35 %, або за тиску (40,0 ± 0,4) МПа, якщо вміст щебеню в суміші становить до 35 %. У країнах Європейського Союзу з цією метою переважно використовують метод ударного ущільнення Маршала за 100 ударів (по 50 ударів з кожного боку). Тому, доцільно установити вплив методу ущільнення асфальтобетонних сумішей на об'ємні властивості асфальтобетону залежно від найбільшого номінального розміру зерен заповнювача та методу ущільнення.

Основна частина

Складники

Для проведення дослідження використовували заповнювачі у вигляді дрібного заповнювача із відсівів подрібнення фракції 0/2, крупного заповнювача фракції 2/4, 4/8 та 8/16, а також наповнювача. Показники властивостей заповнювачів наведено в **табл. 1 – 3**.

Таблиця 1

Результати визначення показників властивостей заповнювача фракції 4/8 та 8/16

Ч.ч.	Назва властивості, одиниця вимірювання	Фактичні значення показників фракції	
		4/8	8/16
1	Вміст дрібних фракцій, % за масою	0,96	0,89
2	Категорія за максимальним вмістом дрібних фракцій	f_1	f_1
3	Коефіцієнт пластинчастості	2,4	3,2
4	Категорія за максимальним значенням коефіцієнта пластинчастості	FI_{10}	FI_{10}
5	Коефіцієнт форми	3,6	6,0
6	Категорія за максимальним значенням коефіцієнта форми	SI_{15}	SI_{15}
7	Опір подрібненню	8,2	9,5
8	Категорія за максимальним значенням коефіцієнта Los Angeles	LA_{15}	LA_{15}
9	Очевидна густина зерен, г/см^3	2,642	2,643
10	Густина зерен, висушених у сушильній шафі, г/см^3	2,635	2,637
11	Густина насичених та поверхнево-осушених зерен, г/см^3	2,637	2,639
12	Водопоглинання, % за масою	0,10	0,09

Таблиця 2

Результати визначення показників властивостей заповнювача фракції 0/2 та 2/4

Ч.ч.	Назва властивості, одиниця вимірювання	Фактичні значення показників фракції	
		0/2	2/4
1	Очевидна густина зерен, г/см^3	2,676	2,691
2	Густина зерен, висушених у сушильній шафі, г/см^3	2,652	2,672
3	Густина насичених та поверхнево-осушених зерен, г/см^3	2,661	2,679
4	Водопоглинання, % за масою	0,35	0,27

Таблиця 3

Результати визначення показників властивостей наповнювача

Ч.ч.	Назва властивості, одиниця вимірювання	Фактичні значення показників
1	Зерновий склад – вміст частинок, відсоток за масою:	
	– дрібніше ніж 0,063 мм	85,4
	– дрібніше ніж 0,125 мм	93,8
	– дрібніше ніж 2,0 мм	100,0
2	Дійсна густина, г/см^3	2,630
3	Структурувальна здатність, °С	14,0

У якості в’яжучого було прийнято бітум марки БНД 70/100, показники властивостей якого наведено в **табл. 4**.

Таблиця 4

Результати визначення показників властивостей бітуму

Ч.ч.	Назва властивості, одиниця вимірювання	Результати випробування
1	Пенетрація за температури 25 °С, 0,1 мм	78
2	Температура розм’якшеності за кільцем і кулею, °С	47
3	Температура крихкості, °С	мінус 23
4	Інтервал пластичності, °С	70
5	Зміна маси після прогрівання, % за масою	0,12
6	Залишкова пенетрація, %	65
7	Зміна температури розм’якшеності, °С	3,5
8	Індекс пенетрації	мінус 0,91

Склад асфальтобетонних сумішей

Для проведення досліджень було прийнято асфальтобетонні суміші з найбільшим номінальним розміром зерен 16 мм (АС 16), 8 мм (АС 8) та 4 мм (АС 4). Підібраний зерновий склад асфальтобетонних сумішей наведено в **табл. 5** та на **рис. 1 – 3**. На **рис. 1 – 3** також зображено межі граничних кривих відповідно до ДСТУ Б В.2.7-119 [3].

Таблиця 5

Результати визначення показників властивостей бітуму

Вид суміші	Вміст зерен мінерального матеріалу, % за масою, менших даного розміру, мм											
	22,4	16	11,2	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
АС 16	100,0	97,3	83,7	65,2	–	50,5	32,4	23,6	16,3	12,1	7,8	7,1
Вимоги ДСТУ EN 13108-1 до АС 16	100	90	–	–	–	–	10	–	–	–	–	0
	100	100	–	–	–	–	50	–	–	–	–	12
АС 8			100,0	98,6	–	60,5	42,4	31,4	22,3	17,1	11,7	10,4
Вимоги ДСТУ EN 13108-1 до АС 8			100	90	–		10	–	–	–	–	2
			100	100	–		72	–	–	–	–	13
АС 4					100,0	100,0	65,0	46,3	30,7	21,8	13,0	12,0
Вимоги ДСТУ EN 13108-1 до АС 4					100	90	50	–	–	–	–	5
					100	100	85	–	–	–	–	17

Виробництво асфальтобетонних сумішей

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.

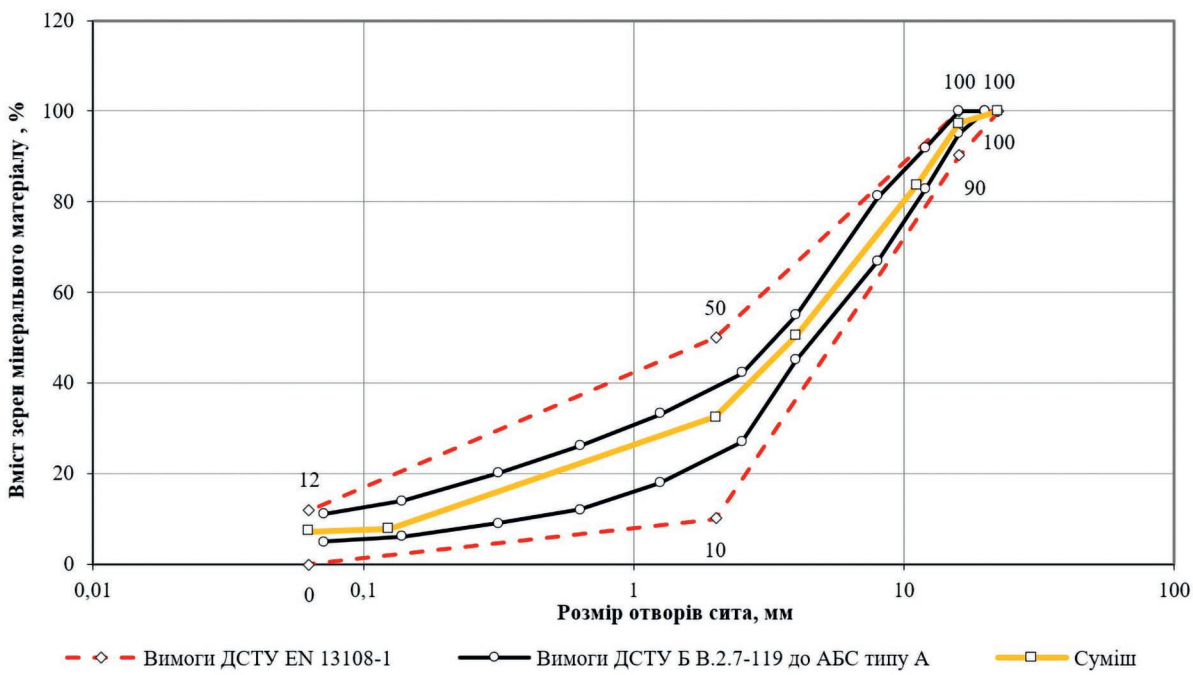

Рисунок 1 — Графічне зображення результатів підбирання зернового складу асфальтобетонної суміші з найбільшим номінальним розміром зерен 16 мм

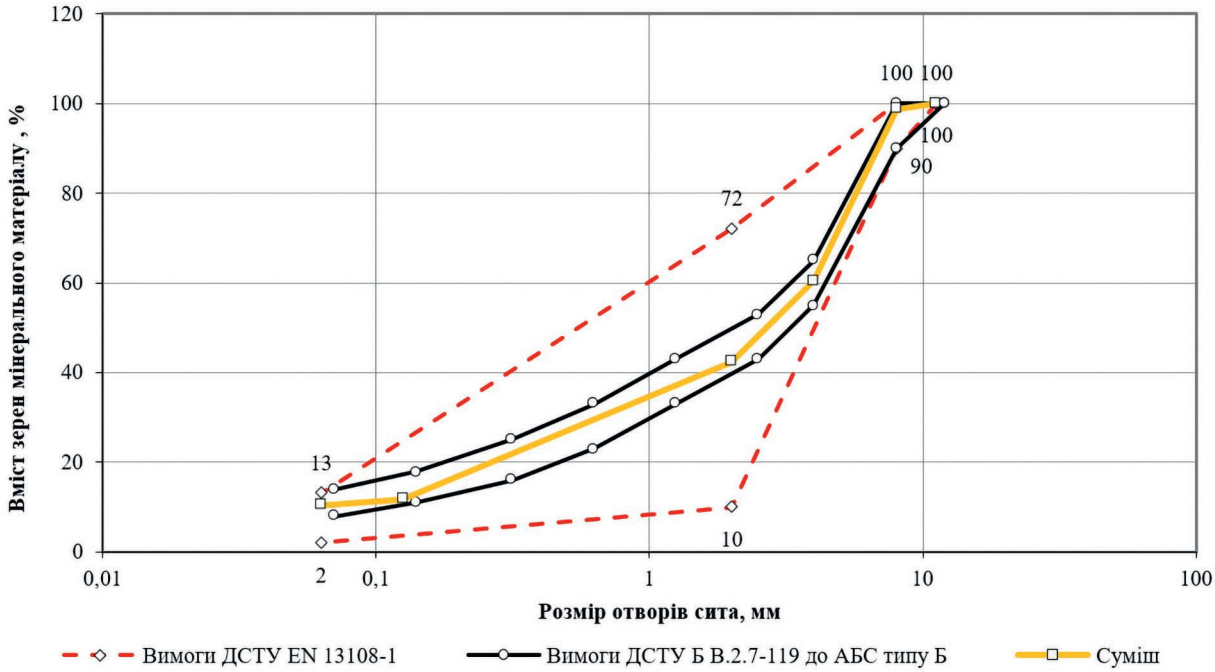

Рисунок 2 — Графічне зображення результатів підбирання зернового складу асфальтобетонної суміші з найбільшим номінальним розміром зерен 8 мм

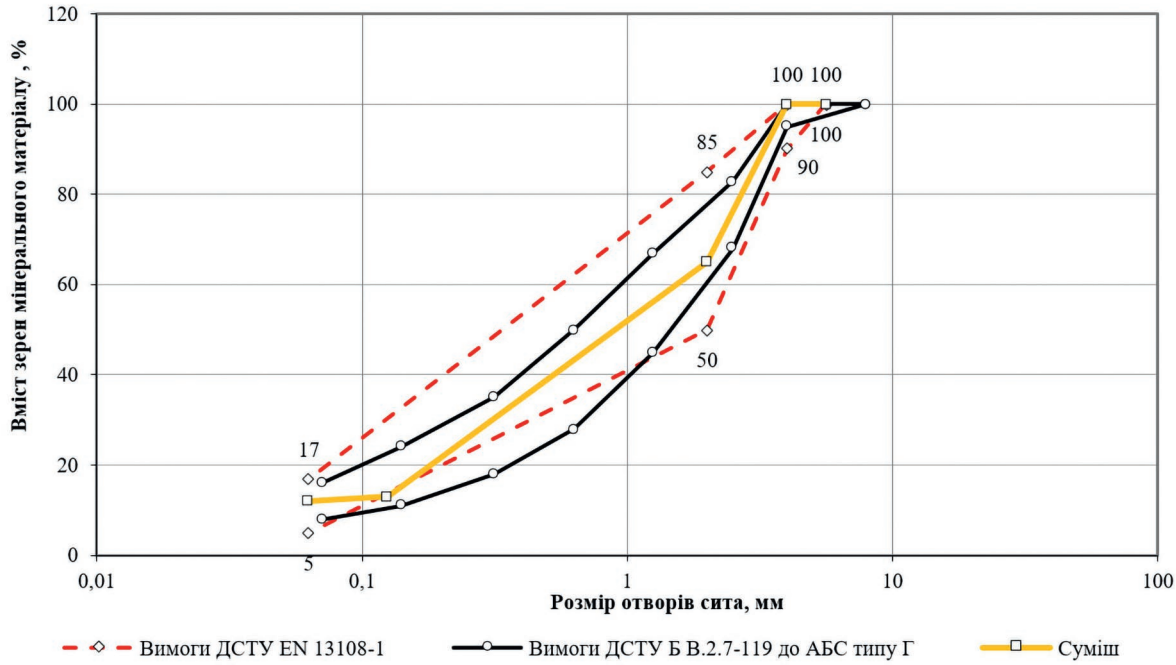

Рисунок 3 — Графічне зображення результатів підбирання зернового складу асфальтобетонної суміші з найбільшим номінальним розміром зерен 4 мм

У ДСТУ EN 12697-35 [4] зазначено, що найвища лабораторна температура змішування (температура виробництва асфальтобетонних сумішей у лабораторних умовах) повинна

бути не більше ніж на 20 °С вищою за опорну температуру ущільнення. Значення заданої лабораторної температури змішування потрібно обирати так, щоб на момент початку процесу ущільнення суміш охолола до опорної температури ущільнення з допуском до ± 5 °С, та не перевищувала найвищу лабораторну температуру змішування. При цьому зазначається, що задана лабораторна температура змішування є температурою за якої в'яжуче має динамічну в'язкість (0,17 ± 0,02) Па·с, а опорну температуру ущільнення може бути визначено як температуру, за якої в'яжуче має динамічну в'язкість (0,28 ± 0,03) Па·с.

У цих дослідженнях температуру нагрівання бітуму під час змішування з мінеральним матеріалом та температуру асфальтобетонної суміші на початку ущільнення було установлено на основі температурно-в'язкістної залежності (**рис. 4**).

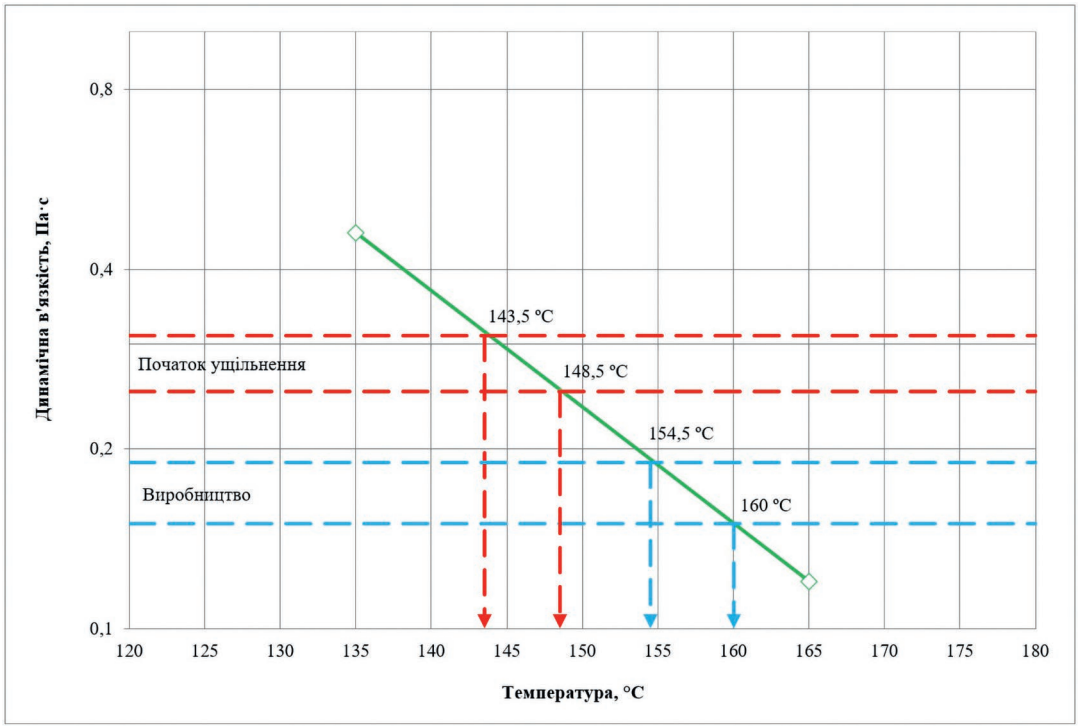

Рисунок 4 — Залежність в'язкості бітуму марки БНД 70/100 від температури

Для встановлення температури виробництва та ущільнення застосовано критерії відповідно до ДСТУ EN 12697-35 [4]. Результати визначення температур наведено в **табл. 6**.

Таблиця 6

Результати визначення температури виробництва й ущільнення асфальтобетонної суміші

Марка бітуму	Опорна температура ущільнення асфальтобетонної суміші, °С	Визначена температура ущільнення асфальтобетонної суміші, °С	Задана температура змішування бітуму з мінеральним матеріалом, °С	Визначена температура змішування бітуму з мінеральним матеріалом, °С
БНД 70/100	145 ± 5	від 143,5 до 148,5	не вище ніж 165	від 154,5 до 160

Визначені температури виробництва та ущільнення асфальтобетонної суміші добре узгоджуються з установленими в ДСТУ EN 12697-35 [4] опорними температурами.

Ущільнення асфальтобетонних сумішей

Ущільнення асфальтобетонних сумішей з метою отримання досліджуваних зразків асфальтобетону виконували відповідно до ДСТУ EN 12697-30 [6] з використанням ударного ущільнювача Маршала. Відповідно до цього методу для виготовлення зразків брали термостабілізовану асфальтобетонну суміш вироблену в лабораторії згідно з ДСТУ EN 12697- 35 [4] та розміщували її у спеціальній сталевій формі для ущільнення. Температуру виробництва асфальтобетонної суміші та температуру її ущільнення визначали на основі залежності в'язкості від температури. Асфальтобетонну суміш ущільнювали за 50 ударів або 75 ударів з кожної сторони. Після чого охолоджували до кімнатної температури та виймали зразок асфальтобетону.

З метою встановлення впливу методу ущільнення на об'ємні властивості асфальтобетонів також виконували ущільнення асфальтобетонних сумішей методом пресування за тиску (30,0 ± 0,3) МПа.

Методи випробування

Об'ємна щільність асфальтобетону

Об'ємну щільність асфальтобетону визначали за його масою та об'ємом відповідно до методу В ДСТУ EN 12697-6 [9] (водонасичений стан із осушеною поверхнею). Масу зразка визначали зважуванням сухого зразка в повітряному середовищі (у повітрі). Об'єм зразка встановлювали за його масою в повітряному середовищі та воді.

Визначення об'ємної щільності асфальтобетону виконували в такій послідовності:

а) визначали масу сухого зразка (m_1);

б) визначали густину води (ρ_w) за температури випробування з точністю до 0,0001 Мг/м^3 за формулою:

$$\rho_w = 1,00025205\left(\frac{7,59\cdot t - 5,32\cdot t^2}{10^6}\right), \quad (1)$$

де t — температура води, в градусах Цельсія (°С);

ρ_w — густина води за температури випробування, в мегаграмах на кубічний метр (Мг/м^3);

в) зразок занурювали у водяну баню, у якій підтримували температуру випробування та витримували впродовж не менше ніж 30 хв;

г) визначали масу насиченого зразка у воді (m_2), стежачи за тим, щоб під час зважування бульбашки повітря не прилипали до поверхні зразка чи не виходили із нього;

д) виймали зразок з води і осушували його поверхню від залишків води, протираючи його вологою тканиною;

е) одразу після осушування поверхні зразка визначали масу насиченого зразка з осушеною поверхнею у повітряному середовищі (m_3);

є) розраховували об'ємну щільність зразка (ρ_{bssd}) з точністю до 0,001 Мг/м^3 за формулою:

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2}\cdot \rho_w, \quad (2)$$

де ρ_{bssd} — об'ємна щільність, в мегаграмах на кубічний метр (Мг/м^3);

m_1 — маса сухого зразка, у грамах (г);

m_2 — маса насиченого зразка у воді, у грамах (г);

m_3 — маса насиченого зразка з осушеною поверхнею, у грамах (г);

ρ_w — щільність води за температури випробування, у мегаграмах на кубічний метр (Мг/м^3).

Вміст повітряних пор (залишкова пористість)

Повітряні пори є пустотами між зернами заповнювача, які вкриті бітумом, в ущільненому асфальтобетонному зразку.

Вміст повітряних пор є об'ємом повітряних пор у асфальтобетонному зразку, визначений у відсотках від загального об'єму цього зразка.

Вміст повітряних пор в асфальтобетонному зразку розраховували з використанням максимальної щільності асфальтобетонної суміші та об'ємної щільності асфальтобетону з точністю до 0,1 % за формулою:

$$V_{\text{m}} = \frac{\rho_{\text{m}} - \rho_{\text{b}}}{\rho_{\text{m}}} \cdot 100, \tag{3}$$

де V_{m} — вміст повітряних пор, % за об'ємом;

p_{m} — максимальна щільність суміші, у мегаграмах на кубічний метр (Мг/м^3);

p_{b} — об'ємна щільність зразка, у мегаграмах на кубічний метр (Мг/м^3).

Пори, заповнені в'яжучим

Пори, заповнені в'яжучим, є відсотком пор у мінеральному заповнювачі, що заповнені в'яжучим.

Відсоток пор у мінеральному заповнювачі, заповнених в'яжучим, розраховували за вмістом в'яжучого та пор у мінеральному заповнювачі, а також об'ємної щільності асфальтобетону та густини в'яжучого з точністю до 0,1 % за формулою:

$$VFB = \left(\left(B \cdot \frac{\rho_{\text{b}}}{\rho_{\text{B}}} \right) \cdot VMA \right) \cdot 100\ \%\ , \tag{4}$$

де VFB — відсоток пор в мінеральному заповнювачі, заповнених в'яжучим, % за об'ємом;

B — відсоток в'яжучого в зразку (в 100 % суміші), % за об'ємом;

ρ_{b} — об'ємна щільність зразка, у мегаграмах на кубічний метр (Мг/м^3);

ρ_{B} — густина в'яжучого, у мегаграмах на кубічний метр (Мг/м^3);

VMA — вміст пор в мінеральному заповнювачі, % за об'ємом.

Вміст пор у мінеральному заповнювачі

Вміст пор в мінеральному заповнювачі є об'ємом міжзернових пустот між зернами заповнювача ущільненої асфальтобетонної суміші, що складається з об'єму повітряних пор та об'єму бітумного в'яжучого у зразку асфальтобетону, визначений у відсотках від загального об'єму зразка. Вміст пор в мінеральному заповнювачі з точністю до 0,1 % розраховували за формулою:

$$VMA = V_{\text{m}} + B \cdot \frac{\rho_{\text{b}}}{\rho_{\text{B}}}, \tag{5}$$

де VMA — вміст пор в мінеральному заповнювачі, визначається з точністю до 0,1 % (за об'ємом);

V_{m} — вміст повітряних пор в зразку, % за об'ємом;

B — вміст в'яжучого в зразку (у 100 % суміші), % за масою.

Максимальна щільність

Максимальною щільністю є маса асфальтобетонної суміші на одиницю об'єму без повітряних пустот за заданої температури випробування. Максимальну щільність у поєднанні з

об'ємною щільністю використовують для розрахунку вмісту повітряних пор в ущільненому зразку та інших об'ємних властивостей ущільненої асфальтобетонної суміші.

Максимальну щільність розраховували з точністю до 0,001 Мг/м^3 за формулою (6):

$$\rho_{mc} = \frac{100}{\left(\frac{p_{a1}}{\rho_{a1}}\right) + \left(\frac{p_{a2}}{\rho_{a2}}\right) + \ldots + \left(\left(\frac{p_b}{\rho_{b1}}\right)\right)}, \quad (6)$$

де ρ_{mc} — максимальна щільність матеріалу, у мегаграмах на кубічний метр (Мг/м^3);
p_{a1} — вміст у суміші мінерального заповнювача 1, % за масою;
ρ_{a1} — об'ємна щільність мінерального заповнювача 1, у мегаграмах на кубічний метр (Мг/м^3);
p_{a2} — вміст у суміші мінерального заповнювача 2, % за масою;
ρ_{a2} — об'ємна щільність мінерального заповнювача 2, у мегаграмах на кубічний метр (Мг/м^3);
p_b — вміст у суміші в'яжучого, % за масою;
ρ_b — густина в'яжучого, у мегаграмах на кубічний метр (Мг/м^3);
$p_{a1} + p_{a2} + \ldots + p_b = 100{,}0$ % (за масою).

Водонасичення

Водонасичення визначали згідно з розділом 14 ДСТУ Б В.2.7-319 [8]. Дане випробування полягає у визначенні кількості води, яку поглинає зразок при заданому режимі насичення.

Дослідження впливу найбільшого номінального розміру зерен заповнювача на об'ємні властивості асфальтобетону

Для даного дослідження було прийнято асфальтобетони ущільнені за методом Маршала за 50 ударів з кожного боку. Результати випробування асфальтобетонів залежно від найбільшого номінального розміру зерен заповнювача та вмісту бітуму наведено в **табл. 7**.

Таблиця 7

Результати випробування асфальтобетонів

Ч.ч.	Властивість	Результати випробування асфальтобетону											
		АС 16				АС 8				АС 4			
1	Вміст бітуму (понад 100 %), %	5,0	5,5	6,0	6,5	6,0	6,5	7,0	7,5	7,0	7,5	8,0	8,5
2	Максимальна щільність асфальтобетонної суміші, Мг/м^3	2,469	2,452	2,436	2,420	2,435	2,419	2,404	2,389	2,414	2,399	2,384	2,369
3	Об'ємна щільність асфальтобетону, Мг/м^3	2,320	2,332	2,343	2,354	2,286	2,306	2,311	2,321	2,268	2,288	2,292	2,299
4	Максимальна щільність суміші мінеральних матеріалів, Мг/м^3	2,659	2,659	2,659	2,659	2,658	2,658	2,658	2,658	2,672	2,672	2,672	2,672
5	Вміст пор у мінеральному заповнювачі, % за об'ємом	16,9	16,9	16,9	16,9	18,9	18,5	18,7	18,8	20,7	20,3	20,6	20,7
6	Вміст повітряних пор, % за об'ємом	6,0	4,9	3,8	2,7	6,1	4,7	3,9	2,8	6,1	4,6	3,9	3,0
7	Водонасичення, % за об'ємом	4,5	3,6	2,5	1,5	4,9	3,6	2,8	1,7	4,7	3,4	2,7	1,9

Кінець таблиці 7

Ч. ч.	Властивість	Результати випробування асфальтобетону											
		АС 16				АС 8				АС 4			
8	Різниця між залишковою пористістю та водонасиченням, % за об'ємом	1,5	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,4	1,2	1,2	1,1
9	Пори, заповнені в'яжучим, %	64,4	71,0	77,4	83,8	67,5	74,7	79,4	84,9	70,7	77,3	81,3	85,7
10	Пори, заповнені в'яжучим, % за об'ємом	10,9	12,0	13,1	14,1	12,7	13,9	14,9	15,9	14,6	15,7	16,7	17,7

Результати випробування показали, що із збільшенням вмісту бітуму має місце зменшення максимальної щільності асфальтобетонної суміші (**рис. 5**). У всіх випадках залежність зменшення максимальної щільності від вмісту бітуму має лінійний характер. Зворотну тенденцію має залежність об'ємної щільності асфальтобетону від вмісту бітуму (**рис. 6**). У даному випадку збільшення вмісту бітуму призводить до зростання об'ємної щільності асфальтобетону. Збільшення об'ємної щільності асфальтобетону пов'язано як із поліпшенням ущільнення асфальтобетонної суміші в результаті збільшення вмісту бітуму, так і з більшим заповненням повітряних пор, про що свідчать значення вмісту пор у мінеральному заповнювачі (**рис. 7**). Винятком є тільки асфальтобетонна суміш АС 16, для якої значення вмісту пор у мінеральному заповнювачі є незмінними, тобто у даному випадку збільшення об'ємної щільності відбувається виключно заповненням пор у мінеральному заповнювачі.

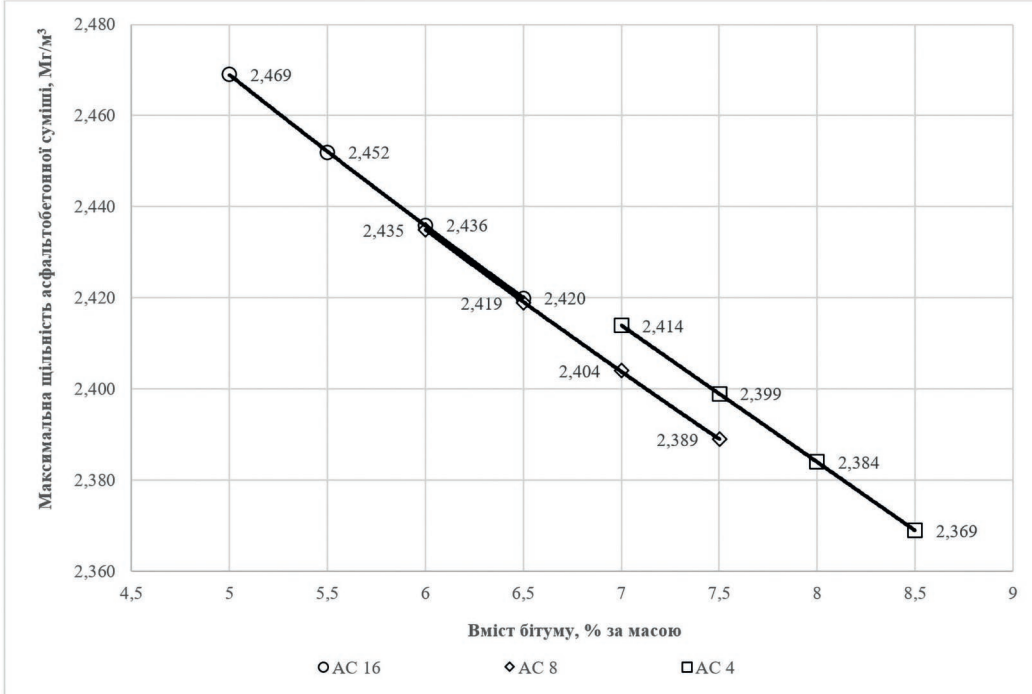

Рисунок 5 — Залежність максимальної щільності асфальтобетонної суміші від вмісту бітуму та найбільшого номінального розміру зерен заповнювача

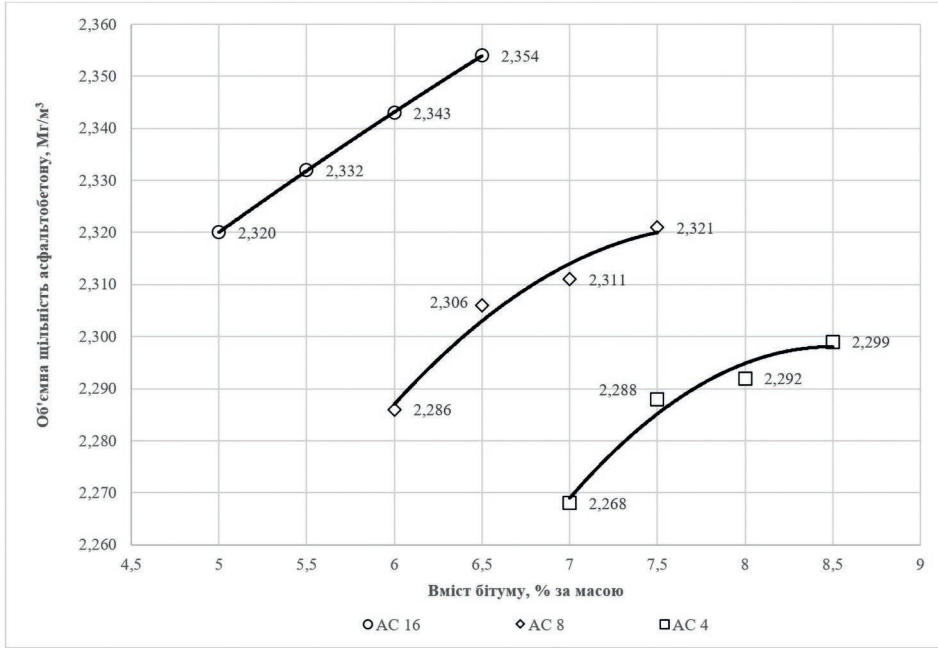

Рисунок 6 — Залежність об'ємної щільності асфальтобетону від вмісту бітуму та найбільшого номінального розміру зерен заповнювача

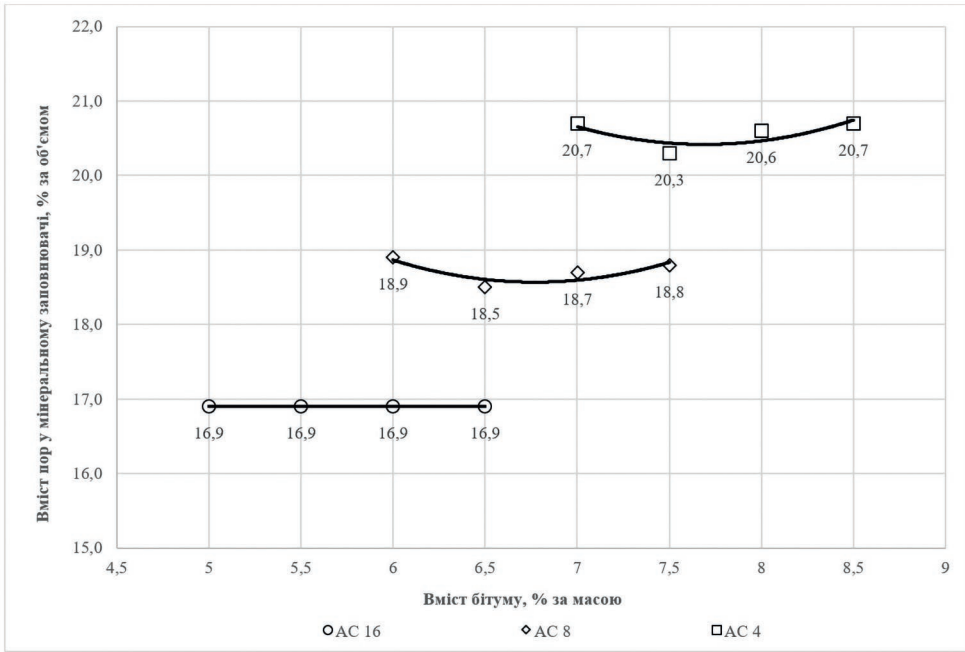

Рисунок 7 — Залежність вмісту пор у мінеральному заповнювачі від вмісту бітуму та найбільшого номінального розміру зерен заповнювача

Найбільший номінальний розмір заповнювача у складі асфальтобетонної суміші впливає на загальний вміст пор у мінеральному заповнювачі. Так, під час зменшення найбільшого

номінального розміру заповнювача з 16 мм до 4 мм вміст пор в мінеральному заповнювачі в середньому зростає з 16,9 % за об'ємом до 20,6 % за об'ємом або ж практично на 4 %. Це дозволяє стверджувати, що збільшення необхідного вмісту бітуму в асфальтобетонній суміші із зменшенням найбільшого номінального розміру заповнювача значним чином пов'язане з необхідністю заповнення більшої кількості пор, а не із збільшенням загальної питомої поверхні заповнювача. Підтвердженням цього є результати щодо пор, заповнених в'яжучим, за об'ємом. Для АС 16 збільшення вмісту бітуму з 5,0 % до 6,5 % призводить до збільшення пор, заповнених в'яжучим, з 10,9 % за об'ємом до 14,1 % за об'ємом, для АС 8 збільшення вмісту бітуму з 6,0 % до 7,5 % призводить до збільшення пор, заповнених в'яжучим, з 12,7 % за об'ємом до 15,9 % за об'ємом, а для АС 4 збільшення вмісту бітуму з 6,5 % до 8,5 % призводить до збільшення пор, заповнених в'яжучим, з 14,6 % за об'ємом до 17,7 % за об'ємом.

При цьому абсолютний відсоток пор, заповнених в'яжучим, є практично однаковим. Для АС 16 за вмісту бітуму від 5,0 % до 6,5 % відсоток пор, заповнених в'яжучим, становить від 64,4 % до 83,8 %, для АС 8 за вмісту бітуму від 6,0 % до 7,5 % відсоток пор, заповнених в'яжучим, становить від 67,5 % до 84,9 %, для АС 4 за вмісту бітуму від 7,0 % до 8,5 % відсоток пор, заповнених в'яжучим, становить від 70,7 % до 85,7 %.

Доцільно звернути увагу на абсолютний відсоток пор, заповнених в'яжучим, за нормованої в Україні залишкової пористості від 2,0 % до 5,0 %. За даної залишкової пористості вміст бітуму для АС 16 становить орієнтовно від 5,45 % до 6,8 %, для АС 8 – від 6,4 % до 8,0 %, а для АС 4 – від 7,35 % до 9,0 %. Відповідно абсолютний відсоток пор, заповнених в'яжучим, для АС 16 орієнтовно становить від 70,5 % до 88,0 %, для АС 8 – від 73,0 % до 88,0 %, а для АС 4 – від 76,0 % до 88,0 %. Тобто для всіх асфальтобетонів за залишкової пористості 2,0 % абсолютний відсоток пор, заповнених в'яжучим, становить близько 88,0 %. У випадку залишкової пористості 5,0 % маємо тенденцію щодо збільшення абсолютного відсотку пор, заповнених в'яжучим, із зменшенням найбільшого номінального розміру заповнювача.

Вміст повітряних пор та водонасичення асфальтобетону із збільшенням вмісту бітуму зменшуються (**рис. 8**). Це пов'язано з тим, що відбувається заповнення пор бітумом. При цьому у всіх випадках показники водонасичення є нижчими за показники вмісту повітряних пор. Це пов'язано з тим, що в асфальтобетоні міститься певна кількість закритих пор, що не доступні для води. Існує певна тенденція щодо зменшення різниці між вмістом повітряних пор та водонасиченням. Зокрема, із зменшенням вмісту повітряних пор різниця між ними та водонасиченням зменшується. Це виглядає дещо нелогічним, оскільки із зменшенням вмісту повітряних пор та, відповідно, збільшенням вмісту бітуму логічним було б збільшення кількості закритих пор і відповідно збільшення різниці між даними показниками. Однак доцільно розглянути дані результати з позиції відсоткової різниці. Так, для АС 16 за вмісту бітуму 5,0 %, вмісту повітряних пор 6,0 % та водонасичення 4,5 %, різниця між вмістом повітряних пор та водонасиченням становить 1,5 %, що може свідчити про 25 % закритих пор, а за вмісту бітуму 6,5 %, вмісту повітряних пор 2,7 % та водонасичення 1,5 %, різниця між вмістом повітряних пор та водонасиченням становить 1,2 %, що може свідчити про 44 % закритих пор незважаючи на меншу різницю між фактичними значеннями вмісту повітряних пор та водонасичення.

Вміст повітряних пор є важливим показником від якого залежать практично всі властивості асфальтобетону. Вважається, що асфальтобетони із вмістом повітряних пор нижче ніж 5,0 % є водонепроникними, а у разі зменшення вмісту повітряних пор нижче ніж 2,0 % асфальтобетон різко стає пластичним, що призводить до утворення колії. Саме ці межі залишкової пористості встановлені в ДСТУ Б В.2.7-119 [3] відповідно до щільного асфальтобетону. Очевидно, що верхнє граничне значення залишкової пористості 5,0 % має бути установлено і для асфальтобетонів для шару покриття відповідно до ДСТУ EN 13108-1 [5], а нижнє граничне значення може бути встановлено нижчим за 2,0 %, зокрема для ділянок з незначною інтенсивністю руху важких транспортних засобів, що дозволить підвищити атмосферостійкість такого асфальтобетону.

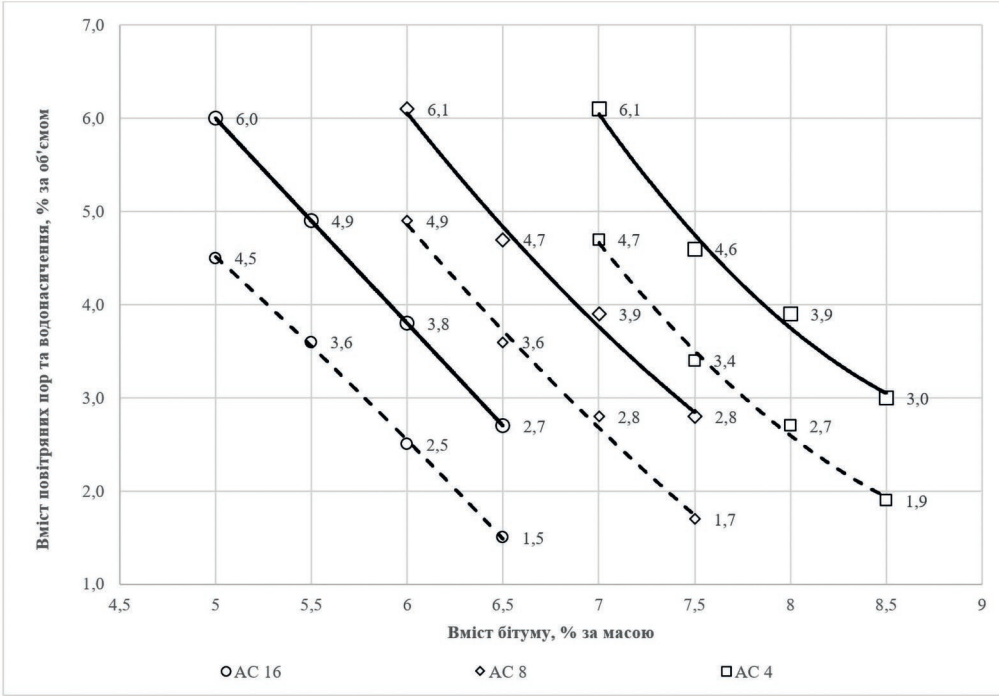

Рисунок 8 — Залежність вмісту повітряних пор та водонасичення від вмісту бітуму та найбільшого номінального розміру зерен заповнювача

Для підбору складу вмісту бітуму в асфальтобетонній суміші доцільно орієнтуватися на середнє значення діапазону можливої залишкової пористості. Це дозволить залишитись в межах граничних вимог як у разі недоущільнення асфальтобетонної суміші під час влаштування шару дорожнього одягу, так і у разі її доущільнення під рухом транспортних засобів під час експлуатації. Розглянемо отримані результати дослідження. Для асфальтобетону АС 16 середнє значення діапазону залишкової пористості (3,5 %) досягається за вмісту бітуму 6,15 %, тобто з урахуванням вимог ДБН В.2.3-4 [7] можливе значення вмісту бітуму в асфальтобетонній суміші може становити від 5,85 % до 6,45 %. Оскільки залежність залишкової пористості від вмісту бітуму є прямолінійною, то за вмісту бітуму 5,85 % залишкова пористість асфальтобетону буде становити близько 4,1 %, а за вмісту бітуму 6,45 % – 2,9 %. Отже, у разі допустимого відхилення в'яжучого 0,3 % від підібраного складу, діапазон можливої залишкової пористості буде становити від 2,9 % до 4,1 %. Наразі вимогам ДБН В.2.3-4 [7] установлено коефіцієнт ущільнення асфальтобетонних сумішей для шару покриття на рівні 0,99. За такого коефіцієнта ущільнення залишкова пористість збільшується на 1,0 % або ж до 5,1 %, що фактично є верхньою границею вимог до залишкової пористості (5,0 %). Однак потрібно враховувати, що коефіцієнт ущільнення 0,99 включає і заокруглений коефіцієнт ущільнення 0,985, тобто можливе збільшення залишкової пористості ще на 0,5 % до 5,6 %, тому доцільно встановлювати граничну межу залишкової пористості влаштованого шару асфальтобетону з урахуванням похибки випробування на рівні 6,0 % для розглянутого випадку. При цьому тільки значення залишкової пористості 6,0 % не може бути єдиним критерієм якості ущільненого шару і повинно використовуватися у поєднанні з коефіцієнтом ущільнення.

Важливим показником довговічності асфальтобетону є його водостійкість. Наразі в Україні для визначення водостійкості використовують зразки, виготовлені з асфальтобетонної суміші з оптимальним вмістом бітуму, тобто фактично за максимально можливого її ущільнення

(коефіцієнт ущільнення 1,0). Однак для шару покриття дозволяється коефіцієнт ущільнення 0,99, що призведе до збільшення кількості пор на 1,5 %, а з урахуванням допустимого відхилу за вмістом бітуму – на всі 2,0 %. Тобто вплив води на властивості влаштованого шару асфальтобетону в реальних умовах буде більшим ніж за лабораторних умов. Тому доцільно визначати водостійкість за найбільшого допустимого рівня залишкової пористості або ж 6,0 % для розглянутого випадку. Зразки з регульованим значенням залишкової пористості легко може бути отримано з використанням гіраторного ущільнювача.

Дослідження впливу методу ущільнення на об'ємні властивості асфальтобетону

Для даного дослідження було прийнято асфальтобетонну суміш з найбільшим номінальним розміром заповнювача 8 мм. Результати випробування наведено в **табл. 8**.

Таблиця 8

Результати випробування асфальтобетонів, виготовлених за різними методами

Ч. ч.	Властивість	Результати випробування асфальтобетону						
		виготовленого ударним ущільненням				виготовленого пресуванням		
1	Вміст бітуму (понад 100 %), %	6,0	6,5	7,0	7,5	6,0	6,5	7,0
2	Максимальна щільність асфальтобетонної суміші, Мг/м^3	2,435	2,419	2,404	2,389	2,435	2,419	2,404
3	Об'ємна щільність асфальтобетону, Мг/м^3	2,286	2,306	2,311	2,321	2,332	2,350	2,362
4	Максимальна щільність суміші мінеральних матеріалів, Мг/м^3	2,658	2,658	2,658	2,658	2,658	2,658	2,658
5	Вміст пор у мінеральному заповнювачі, % за об'ємом	18,9	18,5	18,7	18,8	17,2	17,0	16,9
6	Вміст повітряних пор, % за об'ємом	6,1	4,7	3,9	2,8	4,2	2,9	1,7
7	Водонасичення, % за об'ємом	4,9	3,6	2,8	1,7	3,4	2,3	1,1
8	Різниця між залишковою пористістю та водонасиченням, % за об'ємом	1,2	1,1	1,1	1,1	0,8	0,6	0,6
9	Пори, заповнені в'яжучим, %	67,5	74,7	79,4	84,9	75,4	83,1	89,8
10	Пори, заповнені в'яжучим, % за об'ємом	12,7	13,9	14,9	15,9	13,0	14,1	15,2

Метод ущільнення має суттєвий вплив на об'ємну щільність асфальтобетону (**рис. 9**). В обох випадках із збільшенням вмісту бітуму має місце зростання об'ємної щільності асфальтобетону, що, як вже зазначалося, пов'язане із заміщенням повітряних пор бітумом. Однак, у всіх випадках об'ємна щільність асфальтобетонних зразків, виготовлених пресуванням є більшою за об'ємну щільність асфальтобетонних зразків, виготовлених ударним ущільненням. Навіть для асфальтобетонних зразків, виготовлених ударним ущільненням, з асфальтобетонної суміші з 7,5 % бітуму не досягнуто об'ємної щільності асфальтобетонних зразків, виготовлених пресуванням, з асфальтобетонної суміші з 6,0 % бітуму. Насамперед це пов'язано з тим, що асфальтобетон, отриманий пресуванням має більшу середню густину мінеральної частини, тобто зерна мінерального матеріалу розташовані більш щільно. Так, за вмісту бітуму 6,0 % середня густина мінеральної частини зразків, виготовлених ударним ущільненням, становить 2,157 Мг/м^3, а для зразків, виготовлених пресуванням, – 2,200 Мг/м^3.

Такі відмінності в середній густині мінеральної частини є причиною суттєвих відмінностей у вмісті пор у мінеральному заповнювачі (**рис. 10**). У середньому різниця між вмістом пор у мінеральному заповнювачі становить близько 1,7 % за об'ємом або ж практично 10 %. Оскільки

бітум заповнює пори між зернами заповнювача, то для досягнення одного рівня залишкової пористості для асфальтобетону з меншим вмістом пор у мінеральному заповнювачі необхідно менше бітуму.

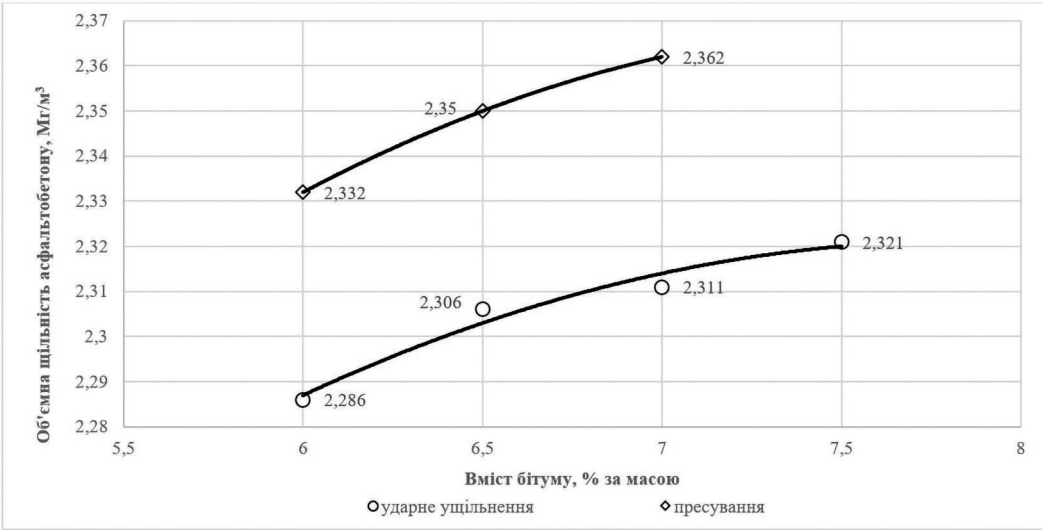

Рисунок 9 — Залежність об'ємної щільності асфальтобетону від вмісту бітуму та методу ущільнення

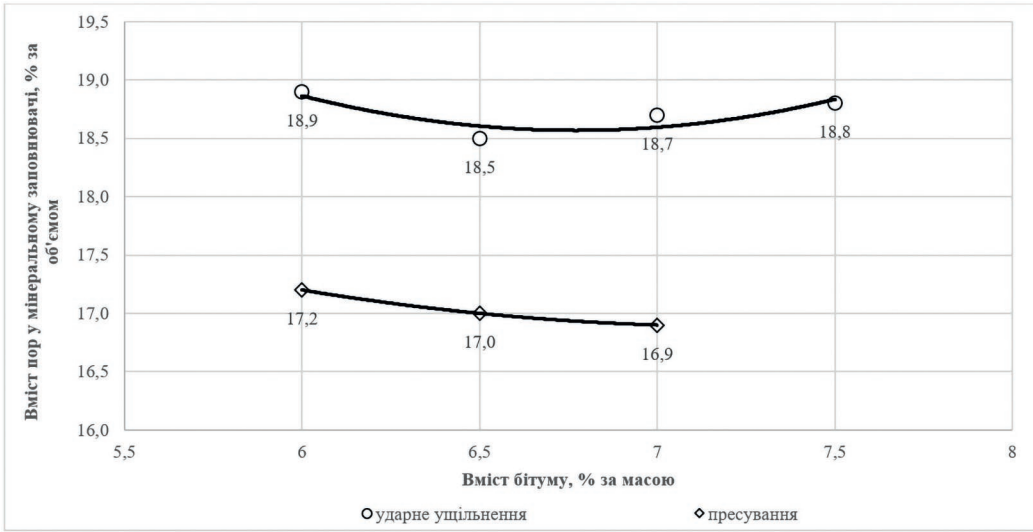

Рисунок 10 — Залежність вмісту пор у мінеральному заповнювачі від вмісту бітуму та методу ущільнення

Підтвердженням цього є і результати щодо пор, заповнених в'яжучим. Так, різниця між відсотком пор, заповнених в'яжучим, становить близько 0,2 % за об'ємом, в той час я за абсолютним значенням така різниця становить близько 9 %.

Такі результати не могли не позначитися на значеннях залишкової пористості та водонасичення асфальтобетону (**рис. 11**). У всіх випадках залишкова пористість та водонасичення є вищими у зразків, ущільнених ударним ущільнювачем.

Якщо значення залишкової пористості розглядати як критерій оптимального вмісту бітуму в асфальтобетонній суміші, то за ущільнення пресуванням абсолютне значення оптимального вмісту бітуму буде нижчим. Так, для асфальтобетонної суміші, ущільненої пресування, оптимальний вміст бітуму, визначений як вміст бітуму за якого залишкова пористість становить 3,5 %, буде становити близько 6,25 %, тоді як для асфальтобетонної суміші, ущільненої ударним ущільнювачем, оптимальний вміст бітуму за аналогічними критеріями буде становити 7,1 %.

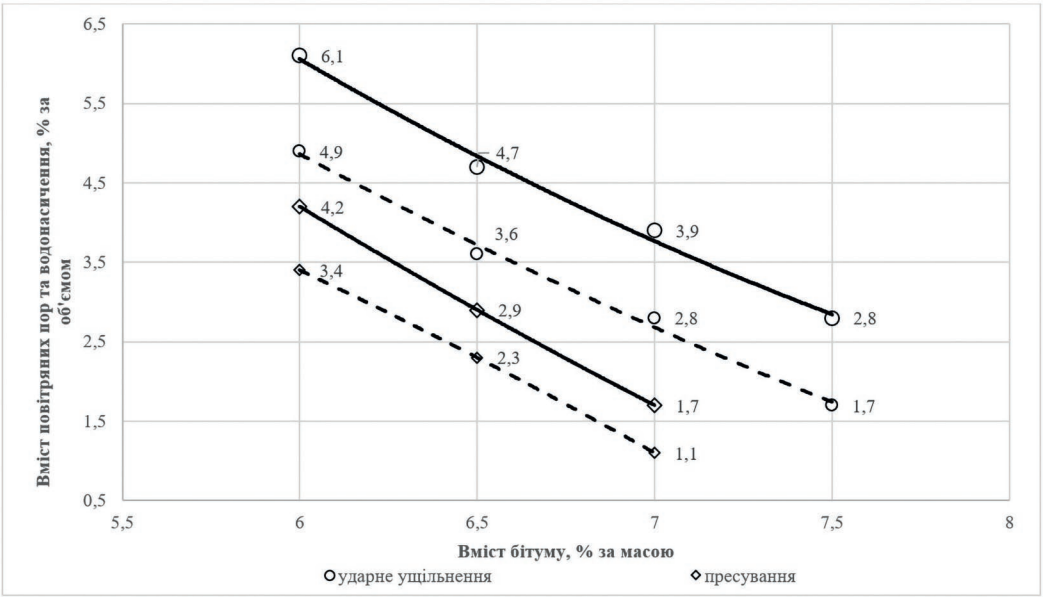

Рисунок 11 — Залежність вмісту повітряних пор та водонасичення від вмісту бітуму та методу ущільнення

Це суттєво вплине на вартість асфальтобетонної суміші, оскільки призведе до перевитрат бітуму орієнтовно на 7,5 кг на тонну асфальтобетонної суміші. Це служить хорошим аргументом для віддання переваги ущільненню пресуванням. Якщо враховувати дослідження ХНАДУ [1], то ще більш економічним буде ущільнення асфальтобетонної суміші секторним або гіраторним ущільнювачем, оскільки за такого ущільнення оптимальний вміст бітуму є ще нижчим за оптимальний вміст бітуму, що встановлений під час ущільнення пресуванням. Тобто з даної точки зору проєктування складу асфальтобетонної суміші з використанням пресування є економічним. Тим не менше, доцільно все ж таки оцінювати методи за комплексом властивостей асфальтобетону, зокрема його довговічністю, що на разі не є можливим у зв'язку з поганою укомплектованістю дослідної лабораторії.

Можна припустити, що зменшення оптимального вмісту бітуму є економічно вигідним, однак чи не погіршиться при цьому стійкість асфальтобетону до старіння в результаті зменшення товщини плівки бітуму на заповнювачі, чи не зменшиться його атмосферостійкість та втомна довговічність у зв'язку з тим же зменшенням товщини плівки бітуму.

Підвищити об'ємну щільність асфальтобетону можна шляхом використання добавок на основі поверхнево-активних речовин або шляхом збільшення навантаження. Саме другий спосіб використовують у США для проєктування складу асфальтобетонних сумішей, що використовують для влаштування шарів дорожнього одягу на автомобільних дорогах з високим транспортним навантаженням [2]. Для даного випадку рекомендованим є ущільнення асфальтобетонної суміші за 75 ударів з кожного боку. Порівняльні результати визначення властивостей асфальтобетонів наведено в **табл. 9**.

Збільшення кількості ударів за ударного ущільнення приводить до зростання об'ємної щільності асфальтобетону. Підвищення об'ємної щільності асфальтобетону можна охарактеризувати за коефіцієнтом ущільнення, а саме відношенням об'ємної щільності асфальтобетону, отриманого ущільненням за 50 ударів, до об'ємної щільності асфальтобетону, отриманого ущільненням за 75 ударів. Відповідно до отриманих результатів він буде становити 0,982.

Збільшення кількості ударів приводить до отримання співставних результатів об'ємної щільності асфальтобетону, тобто під час ударного ущільнення за 75 ударів отримуємо таку ж об'ємну щільність асфальтобетону як і за ущільнення пресуванням. Це дозволяє припустити, що вітчизняний метод ущільнення відповідає ударному методу, що використовують під час проєктування складу асфальтобетонних сумішей для доріг з високим транспортним навантаженням.

Таблиця 9

Порівняльні результати визначення об'ємних властивостей асфальтобетонів

Ч.ч.	Властивість	Результати випробування асфальтобетону		
		виготовленого пресуванням		виготовленого пресуванням
		50 ударів з кожного боку	75 ударів з кожного боку	
1	Вміст бітуму (понад 100 %), %	6,5	6,5	6,5
2	Максимальна щільність асфальтобетонної суміші, Мг/м^3	2,419	2,419	2,419
3	Об'ємна щільність асфальтобетону, Мг/м^3	2,306	2,348	2,350
6	Максимальна щільність суміші мінеральних матеріалів, Мг/м^3	2,658	2,658	2,658
7	Вміст пор у мінеральному заповнювачі, % за об'ємом	18,5	17,0	17,0
8	Вміст повітряних пор, % за об'ємом	4,7	2,9	2,9
9	Водонасичення, % за об'ємом	3,6	1,9	2,3
10	Різниця між залишковою пористістю та водонасиченням, % за об'ємом	1,1	1,0	0,6
11	Пори, заповнені в'яжучим, %	74,7	82,7	83,1
12	Пори, заповнені в'яжучим, % за об'ємом	13,9	14,1	14,1

Зростання об'ємної щільності пов'язане із збільшенням середньої густини мінеральної частини. У зв'язку з цим відбувається зменшення вмісту пор у мінеральному заповнювачі. Оскільки відбувається зменшення вмісту пор у мінеральному заповнювачі, то відповідно для заповнення цих пор необхідна менша кількість бітуму для досягнення необхідного значення залишкової пористості.

Збільшення кількості ударів не приводить до зростання відсотку пор, заповнених в'яжучим. Відповідно для усіх трьох випадків маємо практично однакові результати. Однак, зменшення загального вмісту пор у заповнювачі приводить до більшого абсолютного заповнення пор бітумом. Різниця між двома методами ущільнення становить 8 %.

Вищенаведені зміни властивостей асфальтобетонів приводять і до зміни залишкової пористості. Із збільшенням кількості ударів з 50 до 75 відбувається зниження залишкової пористості з 4,7 % до 2,9 %, тобто залишкова пористість досягає значення залишкової пористості асфальтобетону, ущільненого пресуванням. При цьому зберігається різниця між залишковою пористістю та водонасиченням.

Варто зазначити, що водонасичення асфальтобетону, отриманого ущільненням на гідравлічному пресі, є завжди нижчим за водонасичення асфальтобетону, отриманого ударним ущільнювачем. Це свідчить про більшу кількість закритих пор не доступних для води в асфальтобетоні, отриманого з використанням гідравлічного преса.

Висновки

Об'ємні властивості асфальтобетонів залежать від вмісту бітуму в асфальтобетонній суміші та найбільшого номінального розміру заповнювача.

Збільшення вмісту бітуму приводить до зменшення максимальної щільності асфальтобетонної суміші, залишкової пористості та водонасичення асфальтобетону, а також збільшення вмісту пор, заповнених в'яжучим. При цьому вміст бітуму практично не впливає на відсоток пор у мінеральному заповнювачі.

Зменшення найбільшого номінального розміру заповнювача призводить до збільшення відсотку пор у мінеральному заповнювачі. Відповідно це призводить до збільшення необхідного вмісту бітуму для заповнення пор з метою досягнення потрібної залишкової пористості.

Різниця між значеннями залишкової пористості та водонасиченням становить від 1,1 % за об'ємом до 1,5 % за об'ємом, що свідчить про утворення значної кількості закритих пор та неможливість оцінювання реальної пористості асфальтобетону за показником водонасичення.

На оптимальний вміст бітуму в асфальтобетонній суміші суттєво впливає метод та параметри їх ущільнення. Вітчизняний метод ущільнення пресуванням відповідає ударному методу ущільнення з використанням ущільнювача Маршала, що використовують для проєктування складу асфальтобетонних сумішей для влаштування шарів дорожнього одягу автомобільних доріг з великим навантаженням.

Проведення наступних лабораторних досліджень дозволить встановити вплив вмісту бітуму та найбільшого номінального розміру заповнювача на властивості асфальтобетонів, отриманих з використанням гіраторного ущільнювача, а також характеристики ущільнюваності асфальтобетонних сумішей і, відповідно, запропонувати найбільш оптимальний метод ущільнення асфальтобетонних сумішей під час проєктування їх складу.

Список літератури

1. Звіт про науково-дослідну роботу «Провести комплексні дослідження з установлення оптимального методу лабораторного ущільнення асфальтобетонних сумішей та визначення ступеня їх ущільнення в шарах дорожнього одягу та підготувати пропозиції щодо необхідності внесення змін у відповідні нормативно-технічні документи». ДП «ДерждорНДІ». Київ, 2021.
2. Asphalt Design Mix Methods. 7th Edition. USA, 2014. 188 p.
3. ДСТУ Б В.2.7-119:2011 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови. Київ, 2012. 49 с. (Інформація та документація).
4. ДСТУ EN 12697-35:2019 Бітумомінеральні суміші. Методи випробування. Частина 35. Лабораторне змішування. Київ, 2019. (Інформація та документація).
5. ДСТУ EN 13108-1:2019 Бітумомінеральні суміші. Технічні вимоги до матеріалів. Частина 1. Асфальтобетон. Київ, 2019. (Інформація та документація).
6. ДСТУ EN 12697-30:2020 Бітумомінеральні суміші. Методи випробування. Частина 30. Готування зразків ударним ущільнювачем. Київ, 2020. 22 с. (Інформація та документація).
7. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. Київ, 2016. 91 с. (Інформація та документація).

8. ДСТУ Б В.2.7-319:2016 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Методи випробувань. Київ, 2016. 87 с. (Інформація та документація).

9. ДСТУ EN 12697-6:2019 Бітумомінеральні суміші. Методи випробування гарячих асфальтобетонних сумішей. Частина 6. Визначення об'ємної щільності бітумомінеральних зразків. Київ, 2019. 13 с. (Інформація та документація).

References

1. Zvit pro naukovo-doslidnu robotu «Provesty kompleksni doslidzhennya z vstanovlennya optymal′noho metodu laboratornoho ushchilnennya asfaltobetonnykh sumishey ta vyznachennya stupenya yikh ushchilnennya v sharakh dorozhn′oho odyahu ta rozrobyty propozytsiyi shchodo neobkhidnosti vnesennya zmin u vidpovidni normatyvno-tekhnichni dokumenty» [Report on the research work «Conduct comprehensive studies to establish the optimal method of laboratory compaction of asphalt concrete mixtures and determine the degree of their compaction in road wear layers and prepare proposals on the need to make changes to the relevant regulatory and technical documents»]. DerzhdorNDI SE. Kyiv, 2021 [in Ukrainian].

2. Asphalt Design Mix Methods. 7th Edition. USA, 2014. 188 p. [in English].

3. DSTU B V.2.7-119:2011 Sumishi asfaltobetonni i asfaltobeton dorozhniy ta aerodromnyy. Tekhnichni umovy [Asphalt concrete mixers and road and airfield asphalt concrete concrete. Specifications]. Kyiv, 2011. 49 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

4. DSTU EN 12697-35:2019 Bitumomineralni sumishi. Metody vyprobuvannya. Chastyna 35. Laboratorne zmishuvannya [Bituminous-mineral mixtures. Test methods. Part 35. Laboratory mixing]. Kyiv, 2019. (Information and documentation) [in Ukrainian].

5. DSTU EN 13108-1:2019 Bitumomineralni sumishi. Tekhnichni vymohy do materialiv. Chastyna 1. Asfaltobeton [Bituminous-mineral mixtures. Technical requirements for materials. Part 1. Asphalt concrete]. Kyiv, 2019. (Information and documentation) [in Ukrainian].

6. DSTU EN 12697-30:2020 Bitumomineralni sumishi. Metody vyprobuvannya. Chastyna 30. Hotuvannya zrazkiv udarnym ushchilnyuvachem [Bituminous-mineral mixtures. Test methods. Part 30. Preparation of samples by impact compactor]. Kyiv, 2020. 22 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

7. DBN V.2.3-4:2015 Avtomobilni dorohy. Chastyna I. Proektuvannya. Chastyna II. Budivnytstvo [Automobile roads. Part I. Design. Part II. Construction). Kyiv, 2015. 91 p. (Information and documentation] [in Ukrainian].

8. DSTU B V.2.7-319:2016 Sumishi asfaltobetonni i asfaltobeton dorozhniy ta aerodromnyy. Metody vyprobuvan [Asphalt concrete mixtures and road and airfield asphalt concrete. Test methods]. Kyiv, 2016. 87 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

9. DSTU EN 12697-6:2019 Bitumomineralni sumishi. Metody vyprobuvannya haryachykh asfaltobetonnykh sumishey. Chastyna 6. Vyznachennya obyemnoyi shchilnosti bitumomineralnykh zrazkiv [Bituminous-mineral mixtures. Methods of testing hot asphalt concrete mixtures. Part 6. Determination of bulk density of bituminous mineral samples]. Kyiv, 2019. 13 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

Ivan Kopynets, *Ph.D., https://orcid.org/0000-0002-0908-4795*
Vasyl Holovchenko, *https://orcid.org/0000-0001-5078-8682*
Anton Zheltobriukh, *https://orcid.org/0000-0003-0764-8793*
Oleksii Sokolov, *https://orcid.org/0000-0002-4694-9647*

M.P. Shulgin State Road Research Institute – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine

DEPENDENCE OF ASPHALT CONCRETE VOLUMETRIC PROPERTIES ON THE LARGEST NOMINAL AGGREGATE GRAIN SIZE AND COMPACTION METHOD

Abstract

Introduction. One of the aspects of Ukraine's European integration is the introduction of European approaches to the design of asphalt mixtures. In Ukraine, as in other European countries, when designing the asphalt mixtures, asphalt concrete samples are made by compaction in the laboratory; however, different compaction methods are used for this purpose.

Statement of the problem. In Ukraine, the method of compaction of asphalt mixtures in the laboratory at a pressure of (30.0 ± 0.3) MPa is used if the crushed stone content in the mixture is higher than or equal to 35%, or at a pressure of (40.0 ± 0.4) MPa if the crushed stone content in the mixture is up to 35%. In the countries of the European Union, the Marshall impact compaction method of 100 strokes (50 strokes on each side) is mainly used for this purpose. Therefore, it is advisable to determine the effect of the method of compaction of asphalt mixtures on the volumetric properties of asphalt concrete, depending on the largest nominal grain size of the aggregate and the compaction method.

Objective. To determine the dependence of the volumetric properties of asphalt concrete on the largest nominal grain size of the aggregate and the compaction method.

Materials and methods. Analysis of literature sources and laboratory research.

Results. With an increase in the bitumen content, there is a decrease in the maximum density of the asphalt mixture and an increase in the bulk density of asphalt concrete. The increase in the bulk density of asphalt concrete is associated with both improved compaction of the asphalt mixture as a result of an increase in the bitumen content and more filling of air pores, as evidenced by the values of the pore content in the mineral aggregate. The only exception is the AC 16 asphalt mixture, for which the values of the pore content in the mineral aggregate remain unchanged, i.e. in this case, the increase in bulk density is due exclusively to the filling of pores in the mineral aggregate. The largest nominal size of the aggregate in the asphalt mixture affects the total pore content of the mineral aggregate. This suggests that the increase in the required bitumen content in the asphalt mixture with a decrease in the largest nominal size of the aggregate is largely due to the need to fill more pores, rather than to an increase in the total specific surface area of the aggregate.

Conclusions. The volumetric properties of asphalt concrete depend on the bitumen content in the asphalt mixture and the largest nominal aggregate size. An increase in the bitumen content leads to a decrease in the maximum density of the asphalt mixture, residual porosity and water saturation of the asphalt concrete, as well as an increase in the content of pores filled with binder. At the same time, the bitumen content has virtually no effect on the percentage of pores in the mineral aggregate. A decrease in the largest nominal size of the aggregate leads to an increase in the percentage of pores in the mineral aggregate.

Keywords: asphalt concrete, bitumen, aggregate, volumetric properties, optimal bitumen content.