

Ряпухін В.М., канд. техн. наук, Дорожко Є.В.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЧИСЕЛЬНОГО ЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЕФІЦІЄНТА ЛІНІЙНОГО РОЗШИРЕННЯ АСФАЛЬТОБЕТОНУ

**Анотація.** У статті наведено схему розробленого дилатометру та перевірку його працездатності. Представлені чисельні значення експериментально визначеного температурного коефіцієнта лінійного розширення асфальтобетонів різних типів для різних температурних режимів в діапазоні плюсових температур.

**Ключові слова:** температурний коефіцієнт лінійного розширення, асфальтобетон, дилатометр.

**Аннотация.** В статье представлена схема разработанного дилатометра і виконана перевірка його работоспособности. Представлены численные значения экспериментально определенного температурного коэффициента линейного расширения асфальтобетонов разных типов для разных температурных режимов в диапазоне плюсовых температур.

**Ключевые слова:** температурный коэффициент линейного расширения, асфальтобетон, дилатометр.

**Annotation.** The article presents a diagram of the developed dilatometer and test its efficiency. The numerical values of experimental determination of the temperature coefficient of linear expansion of different types of asphalt for different temperatures in the range of zero temperature.

**Key words:** temperature coefficient of linear expansion, asphalt concrete, dilatometer.

Однією з важливих задач розрахунку дорожніх конструкцій з асфальтобетонним покриттям є врахування температурних деформацій і напружень. Температурні напруження з'являються в наслідок неможливості, або обмеження температурного розширення (стискання) асфальтобетонного

шару. Прикладом такого обмеження є конструкція дорожнього одягу з цементобетонною плитою, перекритою зверху асфальтобетонним шаром. Якщо асфальтобетонний шар і цементобетонна плита омоноличені (спаяний контакт) у них будуть однакові температурні деформації. Одночасно з цим слід взяти до уваги, що температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) цементобетону відрізняється від ТКЛР асфальтобетону.

В літературних джерелах ТКЛР асфальтобетону наводиться переважно для вирішення питань температурної тріщиностійкості. Експериментально чисельні значення ТКЛР визначалися в режимі охолодження, для діапазону температур від + 20 °С до - 20 °С (- 30 °С) [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Виникає необхідність експериментального дослідження з визначення чисельного значення середнього ТКЛР для різних типів асфальтобетонів при нагріві та охолодженні в діапазоні плюсових температур від 0 °С і вище.

Згідно з існуючими правилами визначення ТКЛР різних матеріалів дилатометр повинен відповідати таким вимогам [6, 7, 8, 9]:

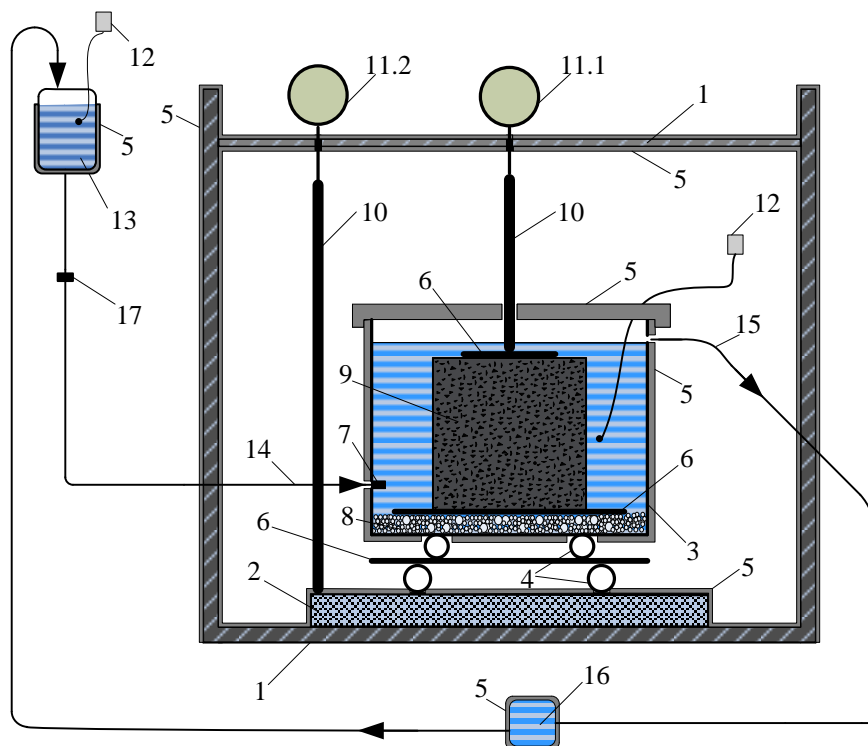
- вимірювач подовження досліджуваних зразків повинен мати високу чутливість і достатню точність;
- тиск пристрою для вимірювання подовження на зразок не повинен перевищувати 0,15 МПа;
- теплоносій має забезпечувати рівномірність нагрівання (охолодження) на всій поверхні досліджуваного зразка;
- похибка підтримання сталості температури зразка не повинна перевищувати  $\pm 1$  °С.
- пристрій для вимірювання температури зразка має володіти високою точністю і чутливістю;
- прилад повинен бути надійним і простим в експлуатації, а виготовленні для дослідження зразка не мають суперечити прийнятим для даного матеріалу нормативним документам.

З урахуванням вище викладених вимог до визначення ТКЛР твердих тіл і специфічних вимог до асфальтобетону запропонована наступна схема дилатометру, призначеного для роботи при нагріванні та охолодженні (рисунок 1).

Асфальтобетонний зразок розміщується у ємкості з кварцевого скла, заповнену теплоносієм. Зразок стоїть на пластині з кварцевого скла, яка в свою

чергу розміщена на крихах з кварцевого скла. Крихти зі скла виконують дві функції:

- дозволяють рівно встановити зразок;
- дозволяють теплоносію, проникаючи в пори між крихтами рівномірно прогрівати асфальтобетонний зразок не тільки зверху і з боків, а і знизу.



- 1 – металевий каркас установки; 2 – бетонна підставка; 3 – ємкість із кварцевого скла;  
4 – трубочки із кварцевого скла; 5 – теплоізолюючий матеріал (вспінений поліетилен);  
6 – пластинка із кварцевого скла; 7 – пристрій для розподілення теплоносія;  
8 – крихти із кварцевого скла; 9 – асфальтобетонний зразок; 10 – штовхач із кварцевого скла;  
11.1 – електронний індикатор для фіксації деформації зразка; 11.2 – контрольний індикатор;  
12 – термометр; 13 – терморегуляційна камера теплоносія;  
14 – трубочка для подачі теплоносія; 15 – трубочка для відводу теплоносія;  
16 – пристрій для перекачування теплоносія; 17 – регулятор швидкості руху теплоносія.

**Рисунок 1** – Схема установки для визначення ТКЛР асфальтобетону

Зміна розміру асфальтобетонного зразка через штовхач з кварцевого скла вимірюється електронним індикатором переміщень з точністю 0,001 мм. Між штовхачем і зразком розташована пластинка з кварцевого скла розміром 40×40 мм для того, щоб виключити можливість вдавлювання штовхача в зразок, для більш точного вимірювання зміни розміру зразка. Тиск пружини електронного

індикатора переміщення становить 0,11 кг, а віднесене до поверхні скляної пластини складе 0,0007 МПа, тобто є допустимим.

Штовхачі, пластини, трубки, крихти і ємкість виконані з кварцевого скла, оскільки цей матеріал має незначну теплопровідність і дуже малий ТКРЛ ( $0,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) в порівнянні з асфальтобетоном, цементбетоном і металом (відрізняється приблизно в 100 раз) [6]. Загальна товщина пластини під зразком, скляних крихт і дна ємкості складають 10 мм. Оскільки вони виконані з кварцевого скла, то при зміні температури теплоносія на  $40 \text{ } ^\circ\text{C}$  (максимальний діапазон температур при випробуваннях) змінять розмір на 0,00024 мм і ніяк не вплинуть на результат вимірювань.

Ємність з теплоносієм, розміщена на трубочках і пластині виконаних з кварцевого скла з метою зменшення можливості теплової деформації установки і впливу на кінцевий результат, а також зменшення передачі температури від ємкості з теплоносієм до бетонної основи.

Теплоносій доводиться до необхідної температури в терморегуляційній камері і подається до ємкості з зразком за рахунок дії сили тяжіння, з швидкістю, яку можливо регулювати. За допомогою пристрою для розподілення при попаданні в ємкість з зразком теплоносій рівномірно розподіляється навколо зразка, що дає змогу з усіх боків рівномірно нагрівати, охолоджувати або підтримувати сталу температуру досліджуваного зразка. Через отвір у верхній частині ємкості теплоносій відводиться за рахунок вільного витікання і подається до терморегуляційної камери.

Таким чином теплоносій циркулюючи між терморегуляційною камерою, в якій встановлюється необхідний температурний режим, та ємкістю з досліджуваним зразком рівномірно і поступово нагріває, охолоджує або підтримує сталу температуру асфальтобетонного зразка. Температура окремо контролюється у терморегуляційній камері і безпосередньо біля зразка.

Для випробування були використані асфальтобетонні зразки циліндричної форми з діаметром 71,4 мм та висотою  $71,4 \pm 1,5$  мм. Підготовка зразків до випробувань полягає в наступному:

- підбирається не менше 3-х зразків одного типу;
- бокова поверхня зразка змазується силіконом, для захисту від розмиву і вологонасичення;
- у кожного зразка на металевій плиті шліфуються торцеві поверхні;

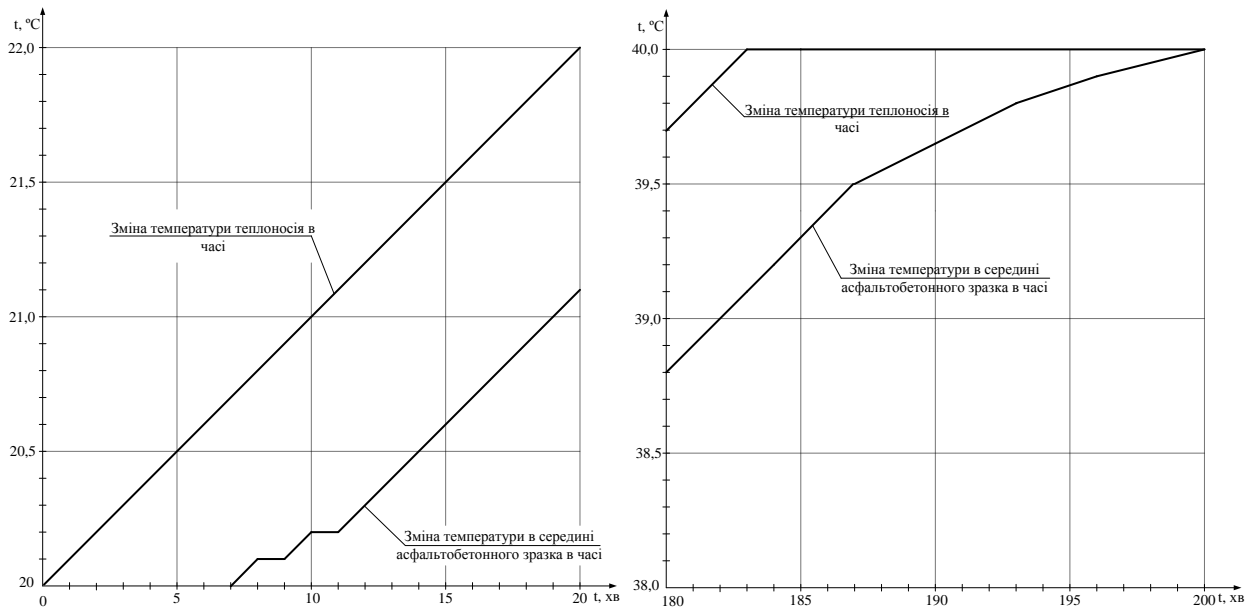
- заміряються розміри зразка (висота і діаметр) мікрометром з точністю до 0,01 мм в 4 – 5 місцях по висоті зразка та в 2 – 3 місцях при вимірюванні діаметра зразка.

Асфальтобетонний зразок на початку випробування розміщується у ємність із кварцевого скла, заповнену теплоносієм. Теплоносій повинен мати таку саму температуру, що і зразок (відхилення не більше ніж 5 °С), щоб уникнути різкої зміни температури зразка і як наслідок його можливого руйнування. Зразок витримується при постійній температурі для стабілізації температурних деформацій, оскільки асфальтобетон і теплоносій можуть мати різні температури. Випробування можна розпочинати після стабілізації деформації, коли протягом години не змінюються значення на електронному індикаторі. Після цього зі швидкістю 0,1 °С за хвилину нагрівається або охолоджується теплоносій в терморегуляційній камері і відповідно в ємності з зразком.

ТКЛР асфальтобетону різний для різних діапазонів температур [1, 2, 3, 4, 12]. В результаті аналізу попередніх дослідників і виконання пошукових експериментів прийняті наступні температурні інтервали в середині яких ТКЛР можна вважати майже незмінним: від 0 °С до + 5 °С, від + 5 °С до + 20 °С, від + 20 до + 40 °С. Максимальна температура + 40 °С обрана з тих міркувань, щоб при нагріванні зразка не перевищити температуру розм'якшення бітуму.

Для визначення часу, необхідного для стабілізації температури по всьому об'єму асфальтобетонного зразка після його нагрівання або охолодження було виконано ряд пошукових експериментів для кожного температурного інтервалу. Для цього у асфальтобетонному зразку діаметром 71,4 мм і висотою 71,4 мм на глибину 35 мм було просвердлено отвір діаметром 6 мм, в який вставлявся температурний датчик (термопара) електронного термометра. Отвір закривається теплоізолюючим матеріалом і зверху вкривається шаром силікону.

Теплоносій нагрівається зі швидкістю 0,1 °С і подається в ємність з кварцевого скла з асфальтобетонним зразком. Паралельно замірюється температура в середині зразка. Нагрів всередині зразка починається з 7 хвилини. Після 10 – 12 хвилин нагріву різниця температури теплоносія і середини асфальтобетонного складає 0,9 °С – 1,0 °С і залишається постійною.



**Рисунок 2** – Зміна температури в асфальтобетонному зразку на початковій та завершальній стадіях нагріву

Після доведення теплоносія до необхідної температури визначався час, необхідний для вирівнювання температури теплоносія і в середині зразка. В результаті серій пошукових експериментальних випробувань, виявилось, що для стабілізації температури необхідно 17 – 20 хвилин. Ця залежність спостерігається при нагріві та охолодженні для усього обраного інтервалу температур, тобто від 0  $^{\circ}\text{C}$  до + 5  $^{\circ}\text{C}$ , від + 5  $^{\circ}\text{C}$  до + 20  $^{\circ}\text{C}$ , від + 20  $^{\circ}\text{C}$  до + 40  $^{\circ}\text{C}$ .

Згідно з пошуковим експериментальним нагрівом і охолодженням асфальтобетонного зразка, прийнято, що після набуття необхідної температури теплоносія необхідно протягом 20 хвилин підтримувати цю температуру, для її вирівнювання по всьому об'єму досліджуваного зразка. За кінцевий приймається відлік, який не змінюється протягом 30 хвилин після стабілізації температури по всьому об'єму асфальтобетонного зразка.

Для визначення середнього диференційного ТКЛР асфальтобетону в інтервалі температур  $(t_i - t_{i+1})$  використовується залежність [6]:

$$\alpha = \frac{1}{L_1} \cdot \frac{L_2 - L_1}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

де  $L_1$  – розмір зразка на початку випробування, при температурі  $t_1$ , мм;

$L_2$  – розмір зразка при температурі  $t_2$ , мм.

Перед початком випробувань по визначенню ТКЛР асфальтобетону необхідно було перевірити правильність роботи обраної моделі дилатометру і переконатися у точності отриманих результатів. У відповідності до розробленої схеми повірки дилатометри можна повірити за зразковою мірою відповідного порядку та перевіркою зміщення нуля дилатометра. Зразкові міри повинні виконуватись з матеріалу, який не змінює свій коефіцієнт лінійного розширення в обраному для роботи інтервалі температур і при повторних випробуваннях. Бажано, щоб температуропровідність і коефіцієнт лінійного розширення цього матеріалу була близька до відповідних властивостей матеріалу, який буде вимірюватись на даному приладі [6].

Для вирішення цієї задачі було вирішено визначити ТКЛР матеріалів, для яких ці значення є заздалегідь відомі з довідкових даних. Порівнявши отримані в результаті експерименту значення ТКЛР з довідковими даними можна переконатись у правильності роботи системи і достовірності отриманих результатів. В якості матеріалів з відомим значенням ТКЛР було обрано алюмінієвий ливарний сплав АЛ 33 і сталь марки 45. В результаті серії випробувань на нагрів і охолодження в діапазоні температур від 0 °С до + 40 °С для алюмінію сплаву АЛ 33 отримано наступний ряд значень:  $22,9 \cdot 10^{-6}$ ,  $23,2 \cdot 10^{-6}$ ,  $23,5 \cdot 10^{-6}$ ,  $23,9 \cdot 10^{-6}$ ,  $24,6 \cdot 10^{-6}$ . Як видно з отриманого ряду значень, результат кожного наступного вимірювання не співпадає з попередніми результатами, оскільки на значення результатів впливають помилки вимірювання.

При проведенні статистичної обробки результатів вимірювань перш за все слід виключити із ряду одержаних результатів грубі помилки. Але для цього слід визначити, чи дійсно сумнівні результати відносяться до грубих помилок. При незначній кількості вимірювань (менше ніж 30) можливо використовувати для визначення грубих помилок методику, в основу якої покладені розробки акад. Н.В. Смирнова [10]. З 95 %-ю довірчою ймовірністю результатів вимірювань (надійністю результатів) і з урахуванням кількості результатів вимірювань, що підлягають статистичній обробці, максимальне і мінімальне значення ТКЛР алюмінію АЛ 33 не відносяться до грубих помилок. Їх необхідно враховувати при подальшій обробці результатів вимірювань.

В теорії ймовірності розроблений метод обробки результатів вимірювань при незначній їх кількості (від 2 до 30) на основі розподілу випадкової величини (розподілу Стюдента). Цей метод дозволяє визначити дійсне значення величини, що вимірюється, оскільки за допомогою його

встановлюють довірчий інтервал залежно від надійності результату і кількості вимірів [10].

Таким чином, визначене значення ТКЛР сплаву алюмінію АЛ 33 дорівнює  $(23,6 \pm 0,83) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  при надійності результатів вимірювань 0,95. Довірчий інтервал при цьому складає 3,5 % від середньоарифметичного значення, а коефіцієнт варіації 0,03.

Згідно з довідковими даними ТКЛР сплаву алюмінію АЛ 33 дорівнює  $23,4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Порівнявши довідкові дані з розрахованим інтервалом значень ТКЛР алюмінію можна зробити висновок, що довідкові дані попадають в розрахований інтервал значень і відрізняється від мінімального значення з розрахованого інтервалу на 2,7 %, від максимального значення на 4,4 %.

В результаті серії випробувань для зразка з сталі марки 45 отримано наступний ряд значень:  $11,3 \cdot 10^{-6}$ ,  $11,7 \cdot 10^{-6}$ ,  $12,2 \cdot 10^{-6}$ ,  $12,3 \cdot 10^{-6}$ ,  $11,3 \cdot 10^{-6}$ . З 95 %-ю довірчою ймовірністю результатів вимірювань максимальне і мінімальне значення ТКЛР сталі 45 не відносяться до грубих помилок.

При надійності результатів вимірювань 0,95 визначене значення ТКЛР сталі марки 45 дорівнює  $(11,76 \pm 0,58) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Довірчий інтервал при цьому складає 4,9 % від середньоарифметичного значення, а коефіцієнт варіації 0,04. Згідно з довідковими даними ТКЛР сталі марки 45 дорівнює  $11,9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Перевірка зміщення нуля дилатометра полягає у спостереженням за показниками контрольного датчика (11.2 на рисунку 1) і перевіркою, чи дійсно штовхачі (10 на рисунку 1) виконані з кварцового скла. Для цього була виконана серія випробувань в режимах нагрівання та охолодження в діапазоні температур від 0 °С до + 40 °С без зразків у дилатометрі, а штовхач ставився безпосередньо на дно ємкості з кварцового скла на пластину. В результаті нагрівання або охолодження штовхач відповідно подовжується або скорочується, а зміна розміру фіксуються електронним індикатором. Знаючи довжину штовхача, яка перебувала у теплоносієві, перепад температур і зафіксовану електронним індикатором зміну розміру можна перерахувати значення його ТКЛР. В результаті 5 вимірів для кожного з штовхачів та трубочок у всіх випадках виявилось, що ТКЛР дорівнює  $(0,6 \div 0,7) \cdot 10^{-6}$ , що відповідає довідковим значенням для кварцового скла [6].

В результаті перевірки зміщення нуля розробленого дилатометру, порівняння експериментально отриманих значень ТКЛР зразків з сплаву



алюмінію АЛ 33 і сталі марки 45 з довідковими даними та статистичною обробкою результатів вимірювання, можна зробити наступні висновки:

- під час проведення випробувань не відбувається зміщення нуля дилатометру;

- отримані значення ТКЛР для кварцового скла співпадають з довідковими даними [6], що свідчить про правильність роботи дилатометру і високу точність отриманих результатів (оскільки ТКЛР кварцового скла на півтора – два порядки менше ТКЛР асфальтобетону, для випробування якого розроблявся дилатометр);

- обрана модель дилатометру для прийнятої надійності результатів 0,95 не дає грубих помилок вимірювання (в подальших вимірюваннях це ствердження необхідно перевіряти для кожного отриманого ряду значень, оскільки грубі помилки можуть виникнути з ряду причин не пов'язаних з методикою проведення експерименту і принципом роботи дилатометру);

- похибка отриманих результатів не перевищує 5 % і обрану модель в подальшому можна використовувати для визначення ТКЛР в інтервалі температур від 0 °С до + 40 °С в режимах нагрівання та охолодження.

Отримані в результаті експерименту дані мають цінність лише в тому випадку, якщо з потрібною надійністю гарантується необхідна точність вимірювання. Мала кількість вимірювань може негативно вплинути на надійність і точність визначеної величини ТКЛР асфальтобетону. А велика кількість вимірювань пов'язана з збільшенням витрати часу на одну серію випробувань. Виходячи з цього до початку випробувань було встановлено мінімальну кількість вимірювань ТКЛР асфальтобетону в кожному діапазоні температур, що забезпечуватиме необхідну точність.

Для вирішення цієї задачі вимірювався ТКЛР асфальтобетону типа Г з розміром зерен до 2,5 мм з використанням 8 % бітуму БНД 40/60. В результаті серії випробувань отримано наступний ряд значень:  $35,9 \cdot 10^{-6}$ ,  $39,3 \cdot 10^{-6}$ ,  $35,5 \cdot 10^{-6}$ ,  $37,3 \cdot 10^{-6}$ ,  $32,7 \cdot 10^{-6}$ ,  $36,1 \cdot 10^{-6}$ ,  $37,2 \cdot 10^{-6}$ ,  $39,7 \cdot 10^{-6}$ ,  $34,1 \cdot 10^{-6}$ ,  $38,3 \cdot 10^{-6}$ . Спочатку необхідно виконати перевірку наявності грубих помилок, аналогічно перевірці ряду отриманих значень для сплаву алюмінію та сталі марки 45, за методикою в основу якої покладені розробки акад. Н.В. Смирнова. Для визначення необхідної кількості вимірювань ТКЛР асфальтобетонних зразків, задаємося умовою, щоб помилка середньої арифметичної з довірчою ймовірністю 0,95 % не перевищувала 5 %. Для вирішення поставленої задачі використовуємо так

званий інтеграл ймовірностей (інтеграл Лапласа), [10]. Ця величина являє собою частку від поділу довірчого інтервалу на середнє квадратичне відхилення середнього значення шуканої величини. В результаті розрахунку виявилось, що необхідно виконувати не менше 6 вимірювань кожного асфальтобетонного зразка.

При випробуванні підбирається не менше 3-х зразків одного типу, для врахування структурної неоднорідності асфальтобетону та можливого браку при формуванні. Після чого перевіривши наявність грубих помилок можна розраховувати величину довірчого інтервалу для середньоарифметичного значення ТКЛР. Результати отримані під час випробування зведені в таблиці 1.

**Таблиця 1** – Зведена таблиця експериментально отриманих значень ТКЛР асфальтобетонів

Вид асфальтобетону	Температурний режим					
	нагрів, °С			охолодження, °С		
	0 →+5	+5 →+20	+20 →+40	+40→+20	+20 →+5	+5 →0
Піщаний, тип Г з розміром зерна до 2,5 мм. БНД 40/60 8% бітуму	$(39,4 \div 42,6) \cdot 10^{-6}$	$(41,3 \div 44,7) \cdot 10^{-6}$	$(35,6 \div 38,4) \cdot 10^{-6}$	$(46,4 \div 49,6) \cdot 10^{-6}$	$(43,5 \div 46,5) \cdot 10^{-6}$	$(45,6 \div 48,4) \cdot 10^{-6}$
Дрібнозернистий, тип Б з розміром зерна до 20 мм. БНД 40/60 6% бітуму	$(28,8 \div 31,2) \cdot 10^{-6}$	$(26,9 \div 29,1) \cdot 10^{-6}$	$(19,1 \div 20,9) \cdot 10^{-6}$	$(23,0 \div 25,0) \cdot 10^{-6}$	$(30,7 \div 33,3) \cdot 10^{-6}$	$(32,7 \div 35,3) \cdot 10^{-6}$
ЩМА – 5. 60/90 7,2 % бітуму	$(32,1 \div 34,7) \cdot 10^{-6}$	$(27,9 \div 30,1) \cdot 10^{-6}$	$(21 \div 23) \cdot 10^{-6}$	$(23,7 \div 26,3) \cdot 10^{-6}$	$(31,8 \div 34,2) \cdot 10^{-6}$	$(35,6 \div 38,4) \cdot 10^{-6}$
ЩМА – 5. 90/130 7,2 % бітуму	$(30,7 \div 33,3) \cdot 10^{-6}$	$(26,9 \div 29,1) \cdot 10^{-6}$	$(18,1 \div 19,9) \cdot 10^{-6}$	$(21,9 \div 24,1) \cdot 10^{-6}$	$(30,7 \div 33,3) \cdot 10^{-6}$	$(34,8 \div 37,2) \cdot 10^{-6}$
ЩМА – 15. 60/90 6,2 % бітуму	$(24,9 \div 27,1) \cdot 10^{-6}$	$(23,8 \div 26,2) \cdot 10^{-6}$	$(17,3 \div 18,7) \cdot 10^{-6}$	$(22,0 \div 24,0) \cdot 10^{-6}$	$(25,8 \div 28,2) \cdot 10^{-6}$	$(26,8 \div 29,2) \cdot 10^{-6}$
ЩМА – 15. 90/130 6,2 % бітуму	$(24,9 \div 27,1) \cdot 10^{-6}$	$(19,8 \div 22,2) \cdot 10^{-6}$	$(13,3 \div 14,7) \cdot 10^{-6}$	$(18,9 \div 21,1) \cdot 10^{-6}$	$(23,8 \div 26,2) \cdot 10^{-6}$	$(26,8 \div 29,2) \cdot 10^{-6}$

Аналізуючи результати випробувань можна зробити наступні висновки:

1. ТКЛР асфальтобетонів різних типів при нагріві та охолодженні відрізняється. Ця різниця збільшується при зростанні температури.

2. Підтвердилося ствердження, ТКЛР відрізняється для різних інтервалів температур.. Це пояснюється тим, що при збільшенні плюсових температур змінюються властивості бітуму і як наслідок асфальтобетону.

3. ТКЛР асфальтобетону збільшується, при збільшенні в'язкості бітуму.

4. ТКЛР асфальтобетону збільшується, при збільшенні вмісту бітуму в асфальтобетоні.

### Література

1. Сюньи Г. К. К вопросу об определении коэффициента линейного расширения асфальтобетона // Труды ХАДИ сборник 7, 1941. – С. 95–102.
2. Іщенко О. М. Розробка методики розрахунку на температурну тріщиностійкість асфальтобетонного покриття штучних споруд автомобільних доріг: дис. канд. техн. наук: 05.22.11 – К., 2003.– 180 с.
3. Сюньи Г.К. Дорожный асфальтовый бетон. - К.: Госиздат лит-ры по строит. и архитектуре, 1962. – 235 с.
4. Богуславский, А. М. О деформативной способности асфальтобетона при охлаждении Текст. / А. М. Богуславский // Труды ХАДИ, вып.26. - Харьков, 1961. – С. 81–90.
5. Гезенцевей Л. Б. Дорожній асфальтобетон / Гезенцевей Л. Б., Горельшев Н. В., Богуславський А. М. и др. – М.: Транспорт, 1976. – 351 с.
6. Аматыни А. Н. Методы и приборы для определения температурных коэффициентов линейного расширения материалов. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 140 с
7. ГОСТ 10978-83 Стекло неорганическое и стеклокристаллические материалы. Метод определения температурного коэффициента линейного расширения. – М.: Изд-во стандартов, 1983.
8. ГОСТ 15173-70 Пластмассы. Метод определения среднего коэффициента линейного теплового расширения. – М.: Изд-во стандартов, 1970.
9. ГОСТ 8.018-2007 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений температурного коэффициента линейного расширения твердых тел в диапазоне температуры от 90 до 1800 К.
10. Випробування дорожньо-будівельних матеріалів: Лабораторний практикум / Золотарьов В. О., Братчун В. І., Космін О. В. та інш.; за ред. Золотарьова В. О. Навчальний посібник. – Харків: Видавництво ХНАДУ, 2006. – 352 с.