

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 665.775+539.563

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.102.0.48

АНАЛІЗ РОЗРАХУНКОВИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ
ТЕМПЕРАТУРИ КРИХКОСТІ БІТУМНИХ В'ЯЖУЧИХ

Пиріг Я. І.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У статті розглянуто принцип, що використовується в багатьох розрахункових методах визначення температури крихкості бітумних в'язучих. На основі експериментально визначених за методом Фраасу значень температур крихкості немодифікованих та модифікованих бітумних в'язучих, що використовуються в дорожній галузі України, здійснено перевірку різноманітних розрахункових методик визначення їхніх низькотемпературних характеристик.

Ключові слова: бітум, penetрація, температура крихкості, взаємозв'язок.

Вступ

Експлуатаційні властивості та термін експлуатації асфальтобетонного покриття автомобільних доріг значною мірою визначаються якістю вихідних матеріалів, що використовуються для приготування асфальтобетонних сумішей. Однією з поширених причин передчасного руйнування дорожніх покриттів є незадовільні низькотемпературні властивості бітумних в'язучих та асфальтобетонів. Внаслідок низькотемпературного розтріскування асфальтобетону, що виникає в зимовий період року, порушується цілісність та монолітність дорожнього одягу, у конструктив дорожнього покриття потрапляє вода, яка знижує зчеплюваність бітумних в'язучих з поверхнею зерен кам'яного матеріалу, що призводить до зниження міцнісних характеристик дороги. З огляду на це, питання забезпечення задовільних низькотемпературних характеристик дорожніх бітумів та асфальтобетонів є актуальним.

Аналіз публікацій

Достовірне оцінювання низькотемпературних властивостей дорожніх матеріалів та прогнозування процесів під час експлуатації асфальтобетонного покриття є складним завданням, оскільки потребує врахування чисельних факторів, що так само позначається на точності та достовірності отриманих результатів.

Лабораторні дослідження низькотемпературних характеристик нафтових дорожніх бітумів почали проводити в 20-ті роки минулого століття [1, 2]. На сьогодні суттєво змінились як підходи, так і методи визначення

температури крихкості – від органолептичних до методів, оснований на положеннях механіки суцільних середовищ та механіки руйнування твердих тіл. Найвні методи визначення низькотемпературних властивостей дорожніх бітумних в'язучих та асфальтобетонів оснований на використанні складного та кошторисного лабораторного обладнання та передбачають залучення до проведення випробування та інтерпретації отриманої інформації високопрофесійних фахівців. Крім того, для попереднього аналізу низькотемпературних характеристик в'язучих, наприклад для здійснення вхідного контролю бітумів на асфальтобетонному заводі, виникає потреба в експрес-оцінюванні матеріалів, яке можна здійснити, використовуючи розрахункові методи визначення температури крихкості бітумів та бітумних в'язучих.

Розрахункові методи визначення температур крихкості дорожніх бітумів були актуальними у вітчизняній дорожній галузі через невелику кількість лабораторного обладнання.

Визначати температуру крихкості розрахунковими методами почали в 30-ті роки минулого століття, коли Pfeiffer J. P. та Van Doormaal P. M. під час розроблення показника температурної чутливості бітумів, який отримав назву «індекс penetрації» [3], визначили, що в межах позитивних температур, які не перевищують 60 °С, залежність логарифма penetрації від температури є прямолінійною, її можна записати таким рівнянням:

$$\log P = A \cdot T + C, \quad (1)$$

де A – показник температурної чутливості, T – температура випробування, C – показник, що визначає твердість бітуму та ϵ логарифмом пенетрації за температури 0°C .

1936 р. R. N. J. Saal [4] зазначив, що логарифм пенетрації бітумів збільшується пропорційно логарифму дії часу навантаження під час визначення показника пенетрації, з огляду на це формула (1) була модифікована:

$$\log P = A \cdot T + B \cdot \log t + C, \quad (2)$$

де B – показник, що визначає міру сприйнятливості часу випробування, t – час випробування, T – температура випробування.

Крім того, R. N. J. Saal [4, 5] вивів формулу пенетрації (P) та в'язкості (η) в широкому температурному режимі:

$$\eta = \frac{5,13 \cdot 10^9}{P^{1,93}}. \quad (3)$$

Використовуючи вищенаведені залежності, наприкінці 60-х років минулого століття W. Neuckelom [6] запропонував номограму, що отримала назву «Графік результатів випробувань бітуму» (VTDC – Bitumen Test Data Chart), в якій більшість прийнятих на той час стандартних показників якості в'язучих (пенетрація за температури 25°C (P_{25}), температура крихкості за методом Фраасу ($T_{кр}$), температура розм'якшеності за методом «Кільця і Кулі» (T_p), динамічна в'язкість за температур 60°C (η_{60}) та 135°C (η_{135})) були визначені лінійною залежністю (рис. 1).

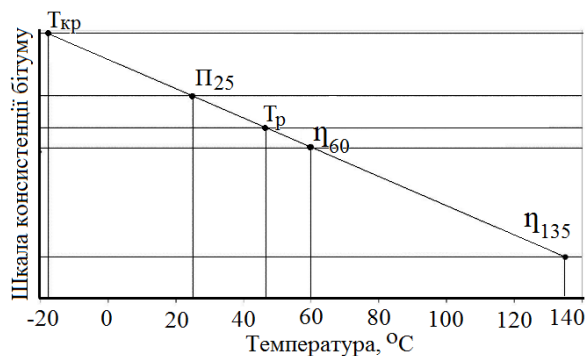


Рис. 1. Номограма VTDC [7]

Для побудови номограми VTDC автором було прийнято:

- що пенетрація за температури розм'якшеності дорівнює $800 \times 0,1$ мм (розраховано за форм. 3, використовуючи значення в'язкості за цієї температури, що згід-

но з даними Saal R. N. J. [5] дорівнює 13000 пуаз);

- що пенетрація за температури крихкості дорівнює $1,25 \times 0,1$ мм (розраховано за форм. 3, використовуючи значення в'язкості за цієї температури, що згідно з даними Lee A. R. та Rigden P. J. [7] дорівнює 4×10^9 пуаз).

Номограма VTDC використовувалась проєктувальниками та виробничниками різних країн світу для експрес-оцінювання стандартних показників якості бітумів за експериментально визначеним значенням пенетрації за 25°C і температури розм'якшеності та призначення технологічних температур нагрівання в'язучих під час виробництва та укладання в покриття асфальтобетонних сумішей.

Залежно від відповідності показників якості лінійній залежності, наведеній на номограмі VTDC, W. Neuckelom [6] класифікував всі в'язучі на три класи:

- клас S – дистиляційні бітуми різного походження (для цих в'язучих всі показники якості розташовуються на прямій лінії),

- клас B – окислені бітуми (для цих в'язучих показники розташовуються на двох прямих, що мають різний кут нахилу та перетинаються вище температури розм'якшеності),

- клас W – високопарафіністі бітуми (для цих в'язучих показники розташовуються також на двох прямих, що мають майже однаковий кут нахилу та між якими є криволінійна перехідна ділянка).

Neuckelom W. [6] зазначив, що використання номограми VTDC має певні особливості залежно від класу бітуму:

- для бітумів класу S для визначення всіх показників якості достатньо експериментально визначити лише два будь-яких показники;

- для бітумів класів B та W необхідно визначити два показники на високотемпературній ділянці (наприклад два значення в'язкості за технологічних температур) та два показники на низькотемпературній ділянці (наприклад два значення пенетрації, визначених за різних температур);

- для бітумів класу B пенетрація, що відповідає температурі крихкості, є вищою ніж $1,25$ мм, а для бітумів класу W визначення інших параметрів та температура крихкості мають визначатися експериментально.

Крім того, було зазначено, що значення температури крихкості, визначені за номограмою VTDC, навіть для дистиляційних бітумів, які належать до класу S, мають похиб-

ку, яка становить 6–7 °С [8], а для модифікованих бітумів, зокрема модифікованих значною концентрацією полімеру, використання номограми ВТДС є недоцільним через відсутність лінійної залежності між пенетрацією, температурою розм'якшеності та в'язкістю [9]. Незважаючи на це, низькотемпературна частина номограми ВТДС (від температури крихкості до температури розм'якшеності) навіть на сьогодні використовується для визначення температури крихкості бітумних в'язучих. Так, наприклад, у Китайській Народній Республіці (КНР) є стандартизованим метод визначення еквівалентної температури крихкості (JTG E20–2011 Standard Test Methods of Bitumen and Bituminous Mixture for Highway Engineering) – температури, за якої пенетрація дорівнює $1,2 \times 0,1$ мм ($T_{1,2}$) [11–13]. Ця температура застосовується для аналізу низькотемпературної тріщиностійкості бітумних в'язучих, зокрема модифікованих різноманітними домішками). Визначення цієї температури здійснюється під час експериментального встановлення пенетрації в'язучого за температур $+ 15$ °С, $+ 25$ °С та $+ 35$ °С (або інших, що відрізняються на 10 °С чи 20 °С) та побудові на їхній основі лінійної залежності логарифма пенетрації від температури, що записується рівнянням

$$\lg P = K + A_{\lg Pen} \cdot T, \quad (4)$$

де T – температура випробування, K – коефіцієнт регресії, $A_{\lg Pen}$ – температурний індекс пенетрації.

Коефіцієнт кореляції лінійної залежності, побудованої відповідно до експериментально отриманих даних, має бути вище ніж 0,997, в іншому випадку експериментальні дані є помилковими. Еквівалентна температура крихкості визначається за формулою (5):

$$T_{1,2} = \frac{\lg 1,2 - K}{A_{\lg Pen}}. \quad (5)$$

Мета та постановка завдання

Метою нашої роботи є аналіз принципу, що використовується в розрахункових методах визначення температури крихкості бітумних в'язучих, аналіз можливості та доцільності застосування різноманітних методів для аналізу низькотемпературних характеристик в'язучих, що використовуються в дорожній галузі України. Для досягнення мети здійс-

нено аналіз літературних джерел, де розглядалися розрахункові методи аналізу низькотемпературних характеристик бітумних в'язучих, та проведено порівняльний аналіз значень температури крихкості, визначених експериментальним та розрахунковими методами.

Вітчизняні розрахункові методи визначення температури крихкості бітуму

На початку 70-х років минулого століття Вдовіченко С. Л. розробив графоаналітичний метод визначення температури крихкості дорожніх бітумів. Розрахунок здійснювався за допомогою пари номограм: спочатку за відомими експериментально визначеними значеннями температури розм'якшеності та пенетрації (25 °С) було визначено показник теплочутливості, а потім за значеннями температури розм'якшеності та показника теплочутливості визначалась температура крихкості, значення якої за даними, що отримали Ремез М. І. та Ковалев Я. М., відрізнялись від експериментально отриманих результатів на 0,5 °С. Пактер М. К. на основі експериментальних даних довів наявність кореляційної залежності між значеннями температури крихкості, отриманими експериментально та за допомогою графоаналітичного методу Вдовіченко С. Л., що визначався коефіцієнтом детермінації 0,92 для немодифікованих бітумів та 0,6 для бітумів, модифікованих полімерами типу СБС.

У 80-ті роки минулого століття Фролов А. Ф. для визначення температури крихкості запропонував номограму, яка була модифікованою низькотемпературною ділянкою номограми W. Neuckelom'a (рис. 2).

Фролов А. Ф. зазначив, що для окислених бітумів залежність логарифма пенетрації від температури є лінійною у випадку, якщо температурі крихкості відповідає пенетрація $1 \times 0,1$ мм, а температурі розм'якшеності – пенетрація $1060 \times 0,1$ мм з використанням поправочного коефіцієнта $K = 4$.

Під час експериментальної перевірки зробленої номограми на дорожніх бітумах Фролов А. Ф. визначив, що найменший розкид експериментально та графічно визначених значень спостерігається для бітумів, температури розм'якшеності яких знаходяться в межах 45–50 °С, а температури крихкості – від мінус 15 °С до мінус 26 °С.

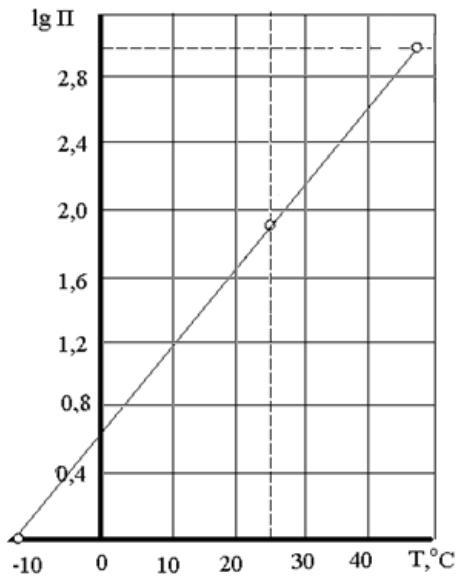


Рис. 2. Номограма А.Ф. Фролова

Ще одна номограма для розрахунку температури крихкості була розроблена Печеним Б. Г. [14]. Визначення температури крихкості є можливим за експериментально визначеними значеннями пенетрації 25 °C та низькотемпературним індексом пенетрації (Π_n), що є співвідношенням значень пенетрацій 0 °C та 25 °C. Згідно з даними розробника середнє значення різниці між експериментально визначеними значеннями температури крихкості методом Фраасу та визначеними за номограмою є в межах $\pm 2,1$ °C, що є нижче, ніж нормовані значення точності визначення температури крихкості за методом Фраасу. На основі цих значень розроблена номограма була використана як додаток до ГОСТ 22245-75 «Бітуми нафтові дорожні в'язкі. Технічні умови».

Точність визначення температури крихкості потребує досліджень, оскільки, наприклад, за даними Фролова А. Ф., розкид значень пенетрації за температури 0 °C зазвичай становить до 25 %, що так само суттєво впливає на визначення низькотемпературного індексу пенетрації.

Питання розрахункових методів визначення температури крихкості бітумів почали досліджувати з 90-х років минулого століття. Саме тоді Богомолів О. В. та Черняков А. В. вивели формули таких стандартних показників якості бітумів, як пенетрація за 0 °C (Π_0), пенетрація за 25 °C (Π_{25}), температура розм'якшеності (T_p) з температурою крихкості ($T_{кр}$):

$$T_{кр} = 99,02 - 0,52 \cdot T_p - 10,59 \cdot \ln \Pi_{25} - 11,41 \cdot \ln \Pi_0 \quad (6)$$

$$T_{кр} = 66,37 - 0,32 \cdot T_p - 18,48 \cdot \ln \Pi_0 \quad (7)$$

$$T_{кр} = 89,89 - 0,55 \cdot T_p - 18,21 \cdot \ln \Pi_{25} \quad (8)$$

Коефіцієнти кореляції між експериментально визначеними значеннями температури крихкості методом Фраасу та розрахунковими значеннями згідно з вищезазначеними формулами становлять 0,81, 0,75 та 0,74. Однак під час перевірки відповідності розрахункових значень температур крихкості визначеним експериментально методом Фраасу (рис. 3) для бітумних в'язучих (немодифікованих та модифікованих), що використовуються в дорожній галузі України, було визначено таке:

- розрахункові значення, визначені за форм. 6–8, є вищими, ніж температури крихкості, визначені експериментально;

- найменші різниці між експериментально визначеними температурами крихкості та розрахунковими спостерігаються у випадку використання для розрахунку форм. 8, тобто підтверджується доцільність використання принципу визначення розрахунковим методом температури крихкості, що запропонував W. Neuckelom [6].

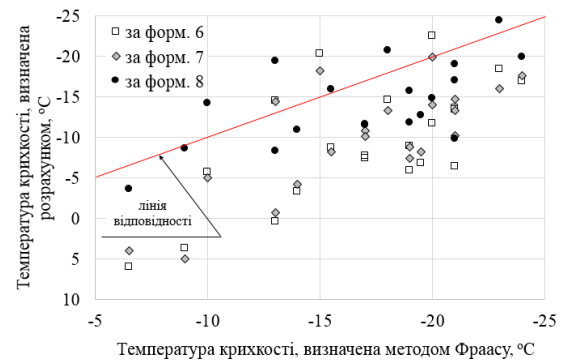


Рис. 3. Перевірка співвідношення значень температур крихкості, визначених експериментально та за форм. 6–8

З 90-х років минулого століття питання розроблення розрахункового методу визначення температури крихкості бітумних в'язучих досліджувалось на кафедрі Технології дорожньо-будівельних матеріалів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, зокрема було розроблено декілька підходів до розрахунку температури крихкості:

- Деуджа Х. С. [15] запропонував розрахунковий метод, оснований на використанні експериментально визначених температури

розм'якшеності (T_p) та penetрації за 25 °C ($П_{25}$):

$$T_{кр} = 119,2 - T_p - 45,7 \cdot \lg П_{25}, \quad (9)$$

- розроблено графоекспериментальний метод [16], відповідно до якого за експериментально отриманими даними penetрації за температур +5 °C, +15 °C, +25 °C, +35 °C будується температурно-пенетраційна залежність та визначаються температури, за якими penetрація дорівнює 31 × 0,1 мм (T_{31}) та 800 × 0,1 мм (T_{800}):

$$T_{кр} = 2 \cdot T_{31} - T_{800}, \quad (10)$$

- вдосконалено вищезазначений метод [18] – за допомогою побудованої за експериментально визначеними значеннями penetрації температурно-пенетраційної залежності визначається температура T_{800} та індекс penetрації, визначений за цією температурою ($П_{T_{800}}$):

$$T_{кр} = T_{800} - 7,12 \cdot П_{T_{800}} - 69,29. \quad (11)$$

Згідно з даними, наведеними в [16], середнє значення різниці між значеннями температури крихкості в'язких дорожніх бітумів, визначеними експериментально методом Фраасу та розрахунком за форм. 10, не перевищує 3 °C. Порівняння різниць між експериментально визначеними значеннями температури крихкості ($T_{кр}^{\phi}$) немодифікованих та модифікованих бітумних в'язучих та значеннями температури крихкості, розрахованими за форм. 9 та 11 ($T_{кр}^p$), наведені в табл. 1 (під час визначення температури крихкості за форм. 9 використовувались як значення температури розм'якшеності (T_p), так і T_{800}).

Таблиця 1 – Аналіз похибок визначення температури крихкості бітумних в'язучих

В'язуче	Формула	Кількість об'єктів	Середнє значення	
			$T_{кр}^{\phi} - T_{кр}^p, \text{ } ^\circ\text{C}$	
			за T_p	за T_{800}
бітум	9	70	3,4	3,2
	11		-	2,7
бітум, модифікований полімером	9	19	11,2	2,5
	11		-	2,7
бітум, модифікований комплексом домішок	9	21	8,5	2,8
	11		-	4,0

Згідно з даними в табл. 1 більш точним є розрахунок температури крихкості за

форм. 11. У випадку використання в форм. 9 температури, за якої penetрація дорівнює 800 × 0,1 мм, замість температури розм'якшеності (T_p), точність розрахунку температури крихкості за форм. 9 та 11 стає майже однаковою як для немодифікованих, так і для модифікованих бітумів.

Було здійснено дослідження щодо можливості визначення температури крихкості бітумних в'язучих, що використовуються в дорожній галузі України, за допомогою графоекспериментального методу, який застосовується в КНР. Для кожного з бітумних в'язучих визначались експериментальним способом значення penetрації за температур +15 °C, +25 °C, + 35 °C, після чого, використовуючи метод найменших квадратів, визначались рівняння лінійної залежності між логарифмом penetрації та температурою. Використовуючи отримане рівняння, була визначена температура, що відповідає penetрації 1,25 × 0,1 мм.

За допомогою методу найменших квадратів, по-перше, можна уникнути суб'єктивності в побудові penetраційно-температурної залежності, а по-друге, досягти підвищення точності визначення температури, що відповідає penetрації 1,25 × 0,1 мм, оскільки це значення визначається математичним засобом. На рис. 4–6 наведені результати порівняльного аналізу значень температури крихкості в'язучих, визначених експериментально методом Фраасу та графо-експериментальним методом. Згідно з цими даними для переважної більшості бітумних в'язучих різниця між експериментально визначеними значеннями та значеннями, отриманими графоекспериментальним методом, температура крихкості не перевищує 6 °C, що відповідає значенню відтворюваності, зазначеної у ДСТУ EN 12593:2018 «Визначення температури крихкості за методом Фраасу».

Середні різниці між значеннями температури крихкості, визначеними експериментально та графічними методом, становлять 2,9 °C для в'язких дорожніх бітумів, 3,0 °C для бітумів, модифікованих полімерами, та 3,7 °C для бітумів, модифікованих комплексами домішок. Найбільші різниці між значеннями температури крихкості спостерігаються для бітумів, модифікованих значною кількістю полімеру, та для бітумів, модифікованих комплексом домішок, до складу яких належить значна кількість полімерів.

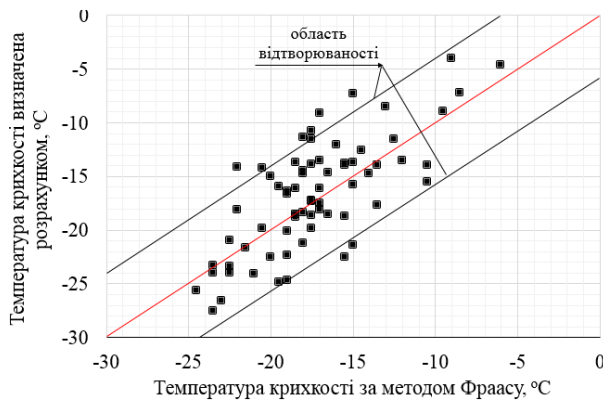


Рис. 4. Порівняння значень температури крихкості бітумів, визначених експериментально та графічним методом

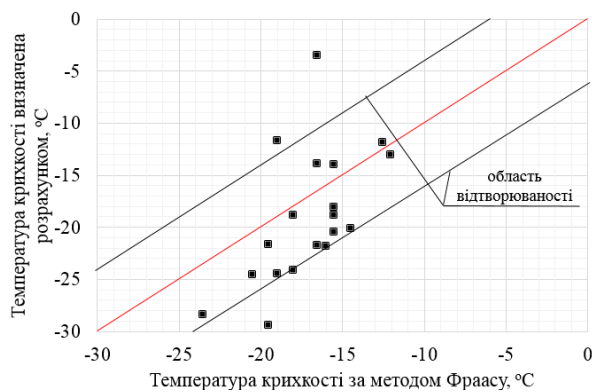


Рис. 5. Порівняння значень температури крихкості бітумів, модифікованих полімером, визначених експериментально та графічним методом

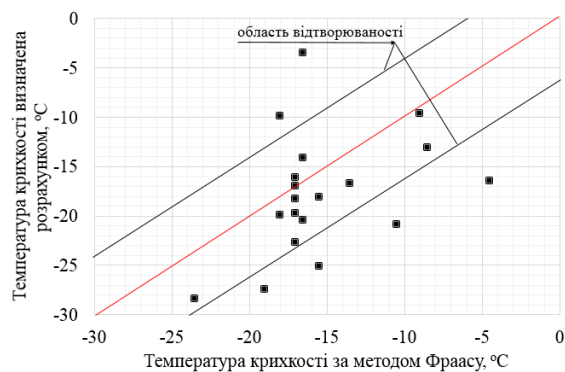


Рис. 6. Порівняння значень температури крихкості бітумів, модифікованих комплексом до домішок, визначених експериментально та графічним методом

Висновки

Проаналізувавши літературні джерела, можна дійти висновку, що переважна більшість розрахункових методів визначення температури крихкості бітумних в'язучих побудована на встановленні співвідношення між стандартними показниками їхньої якос-

ті – пенетрацією за 25 °С, температурою крихкості (температура, за якої пенетрація дорівнює 1,25 × 0,1 мм) та температурою розм'якшеності (температура, за якої пенетрація дорівнює 800 × 0,1 мм). В основі розрахункових методів визначення температури крихкості лежить принцип, який запропонував W. Neuskelom, тобто температурно-пенетраційна залежність, що є лінійною в широкому температурному діапазоні.

Під час застосування методів, основаних на температурно-пенетраційній залежності, точність розрахунку температури крихкості суттєво залежить від точності визначення за різних температур значень пенетрацій та точності побудови на визначених даних залежності.

Оскільки значення температури крихкості, визначені розрахунковими методами, відрізняються від експериментально встановлених за методом Фраасу, зокрема у випадку оцінювання бітумних в'язучих, модифікованих різноманітними домішками (полімерами, домішками, що структурують, комплексами доміок тощо), основною метою застосування розрахункових методів є попереднє оцінювання температури крихкості в'язучих; встановлення температури крихкості, що є нижчою за температурні межі, зазначені в методі Фраасу; випробування в'язучих, для яких не може бути визначена температура крихкості через конструктивні особливості приладу Фраасу; визначення орієнтовної температури початку згинання зразка під час випробування методом Фраасу, що дасть змогу уникнути впливу утомленості в'язучих та підвищити точність визначення температури крихкості експериментальним методом.

Література

- Gražulytė J., Vaitkus A. Analysis of methods and criteria for evaluation of bitumen performance at low temperatures. *Environmental Engineering. Proceedings of the 10th International Conference Vilnius Gediminas Technical University*. 2017. Т. 10. Р. 1–8.
- Methods and criteria for evaluation of asphalt mixture resistance to low temperature cracking / Gražulytė J. et al. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2017. 12(2), Р. 135–144.
- Pfeiffer J. P., Van Doormaal P. M. Betrachtungen über die rheologischen Eigenschaften von Asphaltbitumina und Arbeitshypothesen über die innere Struktur dieser Produkte. *Kolloid-Zeitschrift*. 1936. Т. 76. №. 1. Р. 95–111.
- Saal R. N. J., Labout J. W. A. The relation between absolute viscosity and penetration of asphaltic bitumens. *Physics*. 1936. 7(11), Р. 408–412.

5. Пиріг Я. І. Аналіз підходів до визначення в'язкісно-пенетраційних залежностей бітумних в'язучих. *Вісник ХНАДУ*. 2023. Вип. 100. С. 113–119.
6. Heuckelom W. An improved method of characterizing asphaltic bitumens with the air of their mechanical properties. *Association of Asphalt Paving Technologists Proc.* 1973. Т. 42. Р. 67–98.
7. Besamusca J. Th. M., Willemsen A. J., Van de Ven M. F. C. A plea for the introduction of performance related bitumen specification. In view of limitations of the penetration grading system. *Road materials and pavement design*. 2010. Vol. 11. P. 355–377.
8. Rigden P. J., Lee A. R. The Brittle fracture of tars and bitumens. *Journal of Applied Chemistry*. 1953. Vol. 3. P. 62–70.
9. Dongre R., Sharma M. G., Anderson D. A. Development of fracture criterion for asphalt mixes at low temperatures. *Transportation Research Record*. 1989. Т. 1228. P. 94–105.
10. Airey G. D. Viscosity-Temperature Effects of Polymer Modification as Depicted by Heuckelom's Bitumen Test Data Chart. *International Journal of Pavement Engineering*. 2001. Т. 2. №. 4. P. 223–242.
11. Improvement of low-temperature performance of Buton rock asphalt composite modified asphalt by adding styrene-butadiene rubber / Fan X. et al. *Materials*. 2019. Т. 12. №. 15. P. 1–19.
12. Study on performance damage and mechanism analysis of asphalt under action of chloride salt erosion / Zhou P. et al. *Materials*. 2021. Т. 14. №. 11. P. 1–14.
13. The study of producing SBS modified asphalt by using liaoshu high viscous crude oil / Weizhen S. et al. *Petroleum science and technology*. 2001. Т. 19. №. 9–10. P. 1187–1196.
14. Pechenyi B. G., Fryazinov V. V., Akhmetova R.S. Relationship between penetration and breaking point of asphalts. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 1980. Т. 16. P. 414–417.
15. Деуджа Х. С., Золотарьов В. О. Визначення температури крихкості бітуму розрахунковим методом. *Збірник праць з технічної хімії*. 1997. С. 395–398.
16. Пиріг Я. І. Встановлення кількісних співвідношень між технічними та технологічними властивостями дорожніх бітумів: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Харків, 2013. 254 с.
17. Пиріг Я. І. Розрахунковий метод оцінки температури крихкості дорожніх бітумів: *збірник трудів всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні технології будівництва й експлуатації автомобільних доріг»*, 3–4 листопада 2016 р. С. 162–167.
1. Gražulytė J., Vaitkus A. Analysis of methods and criteria for evaluation of bitumen performance at low temperatures. *Environmental Engineering Proceedings of the 10th International Conference Vilnius Gediminas Technical University*. 2017. Т. 10. P. 1–8.
2. Methods and criteria for evaluation of asphalt mixture resistance to low temperature cracking / Gražulytė J. et al. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2017. 12(2), P. 135–144.
3. Pfeiffer J. P., Van Doormaal P. M. Betrachtungen über die rheologischen Eigenschaften von Asphaltbitumina und Arbeitshypothesen über die innere Struktur dieser Produkte. *Kolloid-Zeitschrift*. 1936. Т. 76. №. 1. P. 95–111.
4. Saal R. N. J., Labout J. W. A. The relation between absolute viscosity and penetration of asphaltic bitumens. *Physics*. 1936. 7(11), P. 408–412.
5. Pyrig, Y. (2023). Analiz pidhodiv do viznachennja v'jazkisno-penetracijnih zalezhnostej bitumnih v'jazhuchih [Review of approaches to determining the viscosity-penetration dependence of bituminous binders]. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. № 100. P. 113–119. [in Ukrainian].
6. Heuckelom W. An improved method of characterizing asphaltic bitumens with the air of their mechanical properties. *Association of Asphalt Paving Technologists Proc.* 1973. Т. 42. Р. 67–98.
7. Besamusca J. Th. M., Willemsen A. J., Van de Ven M. F. C. A plea for the introduction of performance related bitumen specification. In view of limitations of the penetration grading system. *Road materials and pavement design*. 2010. Vol. 11. P. 355–377.
8. Rigden P. J., Lee A. R. The Brittle fracture of tars and bitumens. *Journal of Applied Chemistry*. 1953. Vol. 3. P. 62–70.
9. Dongre R., Sharma M. G., Anderson D. A. Development of fracture criterion for asphalt mixes at low temperatures. *Transportation Research Record*. 1989. Т. 1228. P. 94–105.
10. Airey G. D. Viscosity-Temperature Effects of Polymer Modification as Depicted by Heuckelom's Bitumen Test Data Chart. *International Journal of Pavement Engineering*. 2001. Т. 2. №. 4. P. 223–242.
11. Improvement of low-temperature performance of Buton rock asphalt composite modified asphalt by adding styrene-butadiene rubber / Fan X. et al. *Materials*. 2019. Т. 12. №. 15. P. 1–19.
12. Study on performance damage and mechanism analysis of asphalt under action of chloride salt erosion / Zhou P. et al. *Materials*. 2021. Т. 14. №. 11. P. 1–14.
13. The study of producing SBS modified asphalt by using liaoshu high viscous crude oil / Weizhen S. et al. *Petroleum science and technology*. 2001. Т. 19. №. 9–10. P. 1187–1196.
14. Pechenyi B. G., Fryazinov V. V., Akhmetova R.S. Relationship between penetration and breaking point of asphalts. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 1980. Т. 16. P. 414–417.

References

1. Gražulytė J., Vaitkus A. Analysis of methods and criteria for evaluation of bitumen performance at low temperatures. *Environmental Engineering*.

15. Deudzha, H. S. & Zolotarov, V. O. (1997). Vyznachennja temperaturi krihkosti bitumu rozrahunkovim metodom [Determination of the brittleness temperature of bitumen by the calculation method]. Zbirnik prac' z tehnicnoi himii. P. 395–398. [in Ukrainian].
16. Pirig, Y. I. (2013). Vstanovlennja kil'kisnih spivvidnoshen' mizh tehnicnimi ta tehnologichnimi vlastivostjami dorozhnih bitumiv [Establishing quantitative relationships between technical and technological properties of road bitumens]: diss. ... kand. tehn. nauk: 05.23.05. Harkiv, 254 p. [in Ukrainian].
17. Pirig, Y. I. (2016). Rozrahunkovij metod ocinki temperaturi krihkosti dorozhnih bitumiv [Calculation method for estimating the brittleness temperature of road bitumens]: zbirnik trudiv vseukraïns'koï naukovo-prakticnoi konferencii «Suchasni tehnologii budivnictva j ekspluatacii avtomobil'nih dorig», 3–4 listopada 2016 r. P. 162–167. [in Ukrainian].

Піріг Ян Іванович, к.т.н., ст. наук. співробітник кафедри технології дорожньо-будівельних матеріалів, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, 61002, Україна, тел. +38098-44-66-268, e-mail: pirig2000@gmail.com.

Analysis of calculation methods for determining the brittleness temperature of bituminous binders

Abstract. Problem. One of the common causes of premature destruction of road surfaces is the unsatisfactory low-temperature properties of bituminous binders and asphalt concrete. Currently existing methods of determining the low-temperature properties of road bituminous binders are based on the use of complex and expensive laboratory equipment and involve the highly professional specialists in the testing and interpretation of the obtained data. Meanwhile, calculation methods for determining the brittleness temperature of bitumen and bituminous binders can be useful quite often for the preliminary as-

essment of low-temperature characteristics of binders. **Goal.** The purpose of the completed work is to establish the principle used in calculation methods for determining the brittleness temperature of bituminous binders and to estimate the possibility and feasibility of using various methods for evaluating the low-temperature characteristics of binders used in the road industry of Ukraine. **Methodology.** To achieve the goal, an analysis of literary sources devoted to calculation methods for evaluating low-temperature characteristics of bituminous binders was carried out, and a comparison of brittleness temperature values determined by experimental and calculation methods was performed. **Results.** During the analysis of literary sources, it was established that the vast majority of currently known calculation methods for determining the brittleness temperature of bitumen are based on the establishment of a relationship between standard indicators of their quality – penetration at 25 °C, brittleness temperature (as the temperature at which penetration is equal to 1.25×0.1 mm) and the temperature of softening (as the temperature at which the penetration is equal to 800×0.1 mm). Calculation methods for determining the brittleness temperature are based on the principle proposed by W. Heuckel, namely the temperature-penetration dependence, which is linear in a wide temperature range. **Practical value.** The accuracy of determining the brittleness temperature according to domestic calculation methods was checked and the most acceptable one was established, which allows to calculate the brittleness temperatures that are the least different from those experimentally determined by the Fraas method.

Keywords: bitumen, penetration, brittleness temperature, relationship.

Pyrig Yan, S. Researcher, Ph.D. (Eng.), The department of technology of road-construction materials, Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine, tel. + 38 098-44-66-268, e-mail: pirig2000@gmail.com.
