

© В. О. Золотарьов, докт. техн. наук,
професор кафедри,
ORCID: 0000-0003-2132-9289,
e-mail: kafedratdsm@gmail.com
(Харківський національний
автомобільно-дорожній університет)

© Viktor Zolotaryov, Doctor of Technical Sciences,
Engineering (Dr.),
Professor of the Department
ORCID: 0000-0003-2132-9289,
e-mail: kafedratdsm@gmail.com
(Kharkiv National Automobile and Highway
University)

ПРО ДОЦІЛЬНІСТЬ ЗАМІНИ ІНДЕКСУ ПЕНЕТРАЦІЇ БІТУМІВ КОЕФІЦІЄНТОМ ЇХ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ЧУТЛИВОСТІ

ABOUT THE EXPEDIENCY OF REPLACING THE PENETRATION INDEX OF BITUMEN WITH THE COEFFICIENT OF ITS TEMPERATURE SENSITIVITY

Анотація. Бітум є типовим термопластичним в'язучим, яке залежно від температури може бути текучим або крихким. Критерієм його текучості є температура розм'якшеності ($T_{розм}$) за кільцем і кулю, а крихкості ($T_{кр}$) відповідна низька температура, що визначається за методом Фрааса. Інтервал пластичності за цими показниками змінюється в широких межах залежності від penetраційної марки та типу бітумів. Для оцінки такої зміни майже 100 років використовується індекс penetрації, що нормується стандартами різних країн залежності від кліматичних умов та категорій доріг.

Недоліками цього умовного показника є: обмеження температурної зони його визначення інтервалом зміни penetрації від 25 °C до температури розм'якшеності та неможливість оцінки опору зсуву бітуму в межах: температура від розм'якшеності – температура 25 °C і тим більш, від температури розм'якшеності – температура крихкості. Заміна цього критерія фізичним показником температурної чутливості бітумів дає можливість визначати опір зсуву будь-яких бітумів в будь-яких температурних умовах і передбачати їхній вплив на зсувостійкість та тріщинностійкість асфальобетонів. Показник, що пропонується, базується на попередньо встановлених закономірностях, а саме: penetрація бітуму є характеристикою опору його зсуву. Цей опір однаковий для всіх дорожніх бітумів: за температури розм'якшення він становить 0,015 МПа, а за температури крихкості – 31 МПа. Температурні залежності опору зсуву та penetрації є ідентичними. Це дає змогу визначати опір зсуву бітумів у діапазоні температур $T_{кр}$ та $T_{розм}$. Температурні залежності penetрації для різних бітумів мають різний нахил і перетинаються за середньої температури, що відповідає напруженню 0,21 МПа або penetрації 31 × 0,1 мм.

Встановлення температур, що відповідають penetрації 1,25 × 0,1 мм, 31 × 0,1 мм та 800 × 0,1 мм, дає змогу визначити напруження зсуву бітумів за будь-якої температури в межах індексу penetрації від -2,0 до +2,0.

Про дієздатність встановлених закономірностей свідчить результат обробки літературних даних, що стосуються бітумів типів «золь» та «золь-гель».

Ключові слова: температурна чутливість, індекс penetрації, інтервал пластичності, критичні температури, крихкість, розм'якшеність, напруження зсуву, надійність.

Abstract. Bitumen is a typical thermoplastic binder, which can be fluid or brittle depending on the temperature. The criterion for its flowability is the softening point ($T_{s.p.}$) according to the ring and ball experiment, and the brittleness (T_{br}) which is the corresponding to the low temperature determined by the Fraas method. The plasticity interval for these parameters varies widely depending on the penetration grade and type of bitumen. To assess this change, the penetration index has been used for almost 100 years, which is normalised by the standards of different countries depending on climatic conditions and road categories.

The disadvantages of this conditional indicator are: limiting the temperature zone of its definition to the interval of change in penetration from 25 °C to the softening point and the impossibility of assessing the shear resistance of bitumen within the range: from temperature of the softening to the temperature of 25 °C, and even more so, from softening to brittleness temperature. Replacing this criterion with a physical indicator of the temperature sensitivity of bitumen makes it possible to determine the shear resistance of any bitumen under any temperature conditions and to predict their effect on the shear resistance and crack resistance of asphalt concrete. The proposed indicator is based on regularities, namely: the penetration of bitumen which is a characteristic of its shear resistance. This resistance is the same for all road bitumen: at the softening point it is 0.015 MPa, and at the brittle point it is 31 MPa. The temperature dependence of the shear resistance and penetration is identical. It makes possible to determine the shear resistance of bitumen in the temperature range from T_{br} to $T_{s.p.}$ The temperature dependences of penetration for different bitumen have different slopes and intersect at the average temperature corresponding to a stress of 0.21 MPa or a penetration of 31 × 0.1 mm.

Setting the temperatures corresponding to the penetration of 1.25 × 0.1 mm, 31 × 0.1 mm and 800 × 0.1 mm makes it possible to determine the shear stress of bitumen at any temperature within the penetration index from -2.0 to +2.0.

The validity of the established regularities is evidenced by the result of processing the literature data concerning bitumen of the 'sol' and 'sol-gel' types.

Keywords: *temperature sensitivity, penetration index, plasticity interval, critical temperatures, brittleness, softening, shear stress, reliability.*

Індекс пенетрації бітумів є одним із найважливіших показників їхньої якості, що характеризує температурну залежність пенетрації в межах від 25 °С до температури розм'якшення (T_p). J.Ph Pfeiffer'om [1] була доведена напівлогарифмічна сутність цієї залежності: у зв'язку з труднощами визначення в той час пенетрації за температури крихкості температурна чутливість була обмежена наведеним вище інтервалом. Водночас практичної цінності набував «інтервал пластичності» в межах від температури крихкості ($T_{кр}$) до температури розм'якшеності. Коефіцієнт температурної чутливості в прийнятому діапазоні для використаних у 30-ті роки минулого століття бітумів коливався у межах 0,015-0,06. Для зручності використання J.Ph Pfeiffer і Van Doormaal P.M. [2] запропонували штучний індекс пенетрації (IP), що розраховують за формулою:

$$IP = \frac{20 - 500A}{1 + 50A}, \quad (1)$$

У ній температурну чутливість (A) визначають за формулою:

$$A = \frac{\lg \Pi_{T_p} - \lg \Pi_{25}}{T_p - T_{25}} \quad (2)$$

При цьому вперше було визнано, що температура розм'якшеності відповідає пенетрації 800x0,1 мм. Однією з причин надання переваги T_p були складнощі з визначенням температури T_{800} у виробничих лабораторіях та недостатньою дослідженістю цього показника щодо його ідентичності температурі розм'якшеності за «кільцем та кулею».

Як показав накопичений за багато десятиліть досвід кількісна однаковість цих температур не завжди виправдовувалась особливо щодо бітумів структурного типу «гель», (I-го структурного типу за А. С. Колбановською), які наразі практично не використовуються для виробництва дорожніх асфальтобетонів. Першими, хто повернувся до T_{800} через багато років були французькі науковці-бітумники [2]. Нещодавно до цього приєдналися українські фахівці [3]. Така тенденція пов'язана з меншою розбіжністю IP, визначеного за T_{800} , та з однотипністю методів випробування бітумів.

Практичне використання діючого індексу пенетрації дозволяє лише якісно оцінити «умовну» температурну чутливість бітуму, ідентифікувати його структурний тип (золь, золь-гель, гель) та орієнтовно прогнозувати його реологічну поведінку (зокрема, аномалію в'язкості), а також здатність бітумів до старіння [4]. Тим не менш, не можна бути певним у результатах оцінки якості бітумів у такий спосіб, зважаючи на обмеженість температурного діапазону вимірювань (25 °С - T_p). В такому разі близько 60 % температурного інтервалу від 25 °С до $T_{кр}$ залишається поза оцінкою. Крім того, головною хибною індексом пенетрації, що використовується майже 90 років, є його непридатність для кількісного прогнозування властивостей бітумів, (зокрема міцнісних і реологічних показників) та відповідно і асфальтобетонів.

Метою цієї роботи є відтворення первинного призначення індексу пенетрації, а саме прогнозування механічних властивостей бітумів за будь-яких температур у межах від температури розм'якшення до температури крихкості. Існує багато робіт, в яких стверджується про тотожність в'язкості та пенетрації [4, 5, 6]. Але під час прискіпливого аналізу це не можна вважати коректним, бо в'язкість є суто технологічною характеристикою, а не консистентною. Вже за температури 25 °С бітум переходить у більш-менш твердий стан, а з наближенням до температури крихкості він стає склоподібним. Ближчим до пенетрації за своєю сутністю можна було б вважати модуль зсуву, який Van der Poll використав для розробленої ним номограми [7].

Водночас, щоб оцінити ступінь наближення бітуму до певного температурно-реологічного стану доцільно скористатись температурними залежностями саме пенетрації бітуму, виходячи з того, що пенетрація, як в текучому так і в твердому стані, характеризує опір середовища зсуву – проникненню в нього голочного індентора. В роботі [8] доведено, що перехід бітуму до текучого стану відповідає пенетрації 800x0,1 мм, а до крихкого – 1,25x0,1 мм. Звідси витікає, що інтервал між цими

температурами доцільно кваліфікувати як реальний інтервал пластичності бітуму.

У [8] також показано, що в межах цього діапазону температурна залежність penetрації бітумів є ступеневою прямолінійною. Знання температури, що відповідає penetрації 1,25x0,1 мм, дає можливість прогнозувати тріщиноутворення на асфальтобетонному покритті. Подібний цьому підхід до T_{800} може бути критерієм прогнозування колієутворення на покриттях з врахуванням кліматичного фактору. Але така інтерпретація є опосередкованою і не вирішує проблеми.

Вочевидь, що температури T_{800} і $T_{1,25}$ своєю чергою відповідають penetрації (P_{800} та $P_{1,25}$), але цього недостатньо, щоб враховувати їх під час проєктування складу та для передбачення властивостей асфальтобетону. Більш плідним може бути підхід, що базується на міцнісних характеристиках. Щоб обґрунтувати та реалізувати такий перехід необхідно знайти шлях, який би дав змогу об'єктивно ідентифікувати умовні характеристики: (пенетрації, температури розм'якшення та крихкості) такими, що використовуються та адаптовані до існуючої системи SI-вимірювань. Передовсім доцільно перевести показник глибини проникнення голки пенетрометра (пенетрацію) в напруження зсуву [9]. Аргументом в цьому може слугувати той факт, що penetрація вже використовується в якості критерію оцінки реологічного стану бітуму в межах від крихкості до розм'якшеності. Температурний діапазон між цими температурами сприймається як справжній інтервал пластичності: високотемпературна його межа характеризується penetрацією, яка досягає 800x0,1 мм; а низькотемпературна – 1,25x0,1 мм. Ці загальновизнані показники беруть до уваги під час аналізу можливостей використання тих чи тих бітумів у різних дорожньо-кліматичних регіонах. Саме ці показники дають змогу диференціювати та стандартизувати різноманітні бітуми за марками. Однак цього замало, щоб визначити, який внесок в міцність асфальтобетону вносить певний бітум.

Першими, хто теоретично обґрунтував можливість трансформації цих показників в механо-реологічні характеристики були Carre G. та Laurent D. [6], які перевели penetрацію у в'язкість, не звернувши увагу, як і всі інші, на те, що penetрація за своєю сутністю є очевидною характеристикою опору бітуму зсуву під

час проникнення в нього індентора. Ця прикра не обачність через 50 років була виправлена в роботах [9].

У ній автори не врахували аномалії опору (в'язкості) залежно від глибини проникнення голки. Робота [9] призвела до усвідомлення і сприйняття науковцями того факту, що глибина проникнення голки може бути трансформована в напруження зсуву. У ній була наведена перша кореляційна залежність між напруженням зсуву при зануренні голки та когезією бітуму, визначеною методом одноплщинного зсуву за швидкості 1с^{-1} в діапазоні температур від 5°C до 25°C . Пряма залежність опору зсуву, визначеного двома методами, засвідчила, що penetрацію можна і треба сприймати, як характеристику напруження зсуву. Дослідженнями багатьох послідовників Carre G. та Laurent D. [5, 8, 10] було визнано, що напруження за температури розм'якшення (T_{800}) близьке до 0,0015 МПа, а за температури крихкості ($T_{1,25}$) – близька до 2,2 МПа. Відомості про граничні значення напружень обмежують можливості щодо прогнозування поведінки в бітуму та його консистенції лише «полюсними» точками. Вочевидь, така інформація є неповною і недостатньою.

Більш повне уявлення про зміну консистенції бітуму з температурою дає номограма зображена на рис. 1-а, та 1-б. Її особливість полягає в тому, що вона охоплює температурні залежності напружень зсуву в повному температурному діапазоні від крихкості до розм'якшення. На ній можна виділити чотири зони напружень зверху до низу: еквінапруження до температури крихкості $T_{1,25}$; цією температурою та між цією температурою та розм'якшеності T_p або T_{800} . В якості ілюстративних об'єктів прийнято 3 структурних типи бітумів з різними інтервалами пластичності.

Бітум гель має найширший інтервал пластичності 92°C ; золь-гель – 70°C , золь – 60°C . Прямі між полюсними точками пересікаються за температури, близькій до $(14-17)^\circ\text{C}$. Цій температурі відповідає напруження, близьке 0,21 МПа. Отже, прямолінійна логарифмічна залежність напруження від температури проходить через знакові напруження: близько 31 МПа за температури крихкості: 0,21 МПа за умови середньої температури T_{31} , що відповідає penetрації 31x0,1 мм; 0,0015 МПа, що відповідає penetрації 800x0,1 мм за температури розм'якшення.

Напруження на зсув, що відповідають пенетрації за 25 °С, визначені за методом Carre G. та Laurent D. для бітумів трьох структурних типів становлять золь – 0,05 МПа, золь-гель – 0,063 МПа, гель – 0,089 МПа. Отже, наведені дані свідчать про можливість переведення показника пенетрації в напруження зсуву. Більше того, для будь-якого бітуму можна визначити його напруження зсуву (міцність на зсув) за температури, притаманній будь-якій порі року, або температурі покриття. У [10] було доведено, що кожний із розглянутих тут температур відповідає властиве їм напруження зсуву. Згідно з [10] за температури T_{800} воно дорівнює 0,0015 МПа, а за $T_{1,25}$ його значення близькі 31 МПа. Згідно з літературними джерелами воно може коливатись в межах 5 %. У [11] також показано, що на прямолінійній логарифмічній залежності між цими крайніми температурами існує серединна температура, за якої пенетрація дорівнює $31 \times 0,1$ мм. Саме за

цієї пенетрації пересікаються прямі бітумів однієї пенетрації при 25 °С, але різних структурних типів.

За експериментальними даними цій пенетрації відповідає напруження одноплщинного зсуву близько до 0,21 МПа під час швидкості одноплщинного зсуву $\approx 1 \text{ с}^{-1}$. Таким чином, встановлена W.Heukelom'ом [8] прямолінійна залежність, що названа ним DRB (діаграма репрезентації бітуму), доповнена температурою T_{31} , яка може вважатись узагальненою еквіпенетраційною температурою бітумів різних типів структури (T_{31}). Її можна визначити за рекомендацією Б. С. Радовського за формулою $T_{31} = (T_p + T_{кр}) / 2$. Виходячи з наведених вище співвідношень, напруження зсуву у цій точці можна визначити за формулою

$$\tau_{31} = \sqrt{\tau_{1,25} \cdot \tau_{800}}.$$

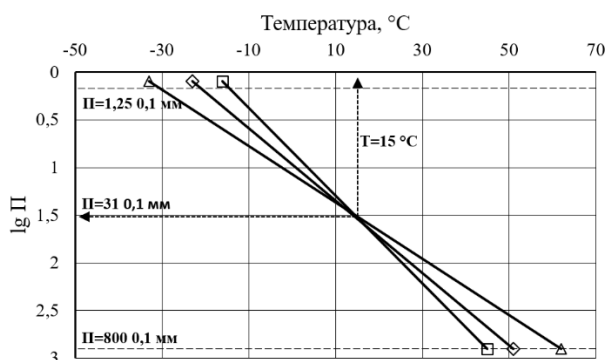


Рис. 1-а. Визначення еквіпенетраційної температури T_{31} за показниками температур крихкості ($\Pi=1,25 \times 0,1$) за розмішеності ($\Pi=800 \times 0,1$ мм бітумів трьох структурних типів

Отримані розрахункові результати з наведеною вище похибкою погоджуються з експериментальними даними: принаймні бітумам золь та золь-гель відповідає температура зсувного напруження 0,21 МПа. Таким чином, фундаментальна залежність DRB доповнена третьою фундаментальною точкою, в якій напруження зсуву названих бітумів у межах індексу пенетрації від $-2,0$ до $+2,0$ дорівнює 0,21 МПа.

Із викладеного вище витікає, що існують теоретично обґрунтовані та експериментально достатньо достовірні показники якості бітумів, які дозволяють визначити опір зсуву бітуму в межах критичних температур від

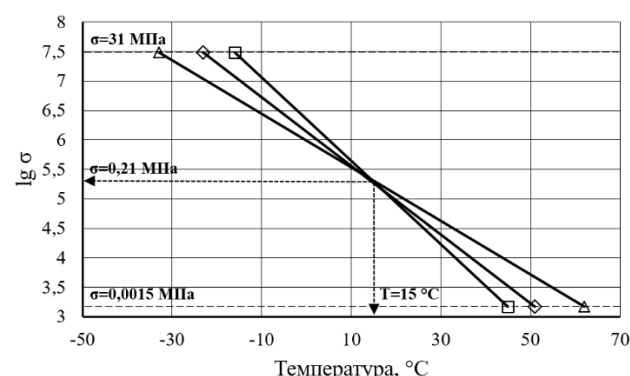


Рис. 1-б. Визначення еквіпенетраційної температури T_{31} за показниками напружень зсуву при температурі крихкості (31 МПа) та розміякшеності (0,0015 МПа) бітумів трьох структурних типів

крихкості до розміякшення (T_{800} , T_{31} , та $T_{1,25}$), а також відповідні їм напруження зсуву: 0,0015; 0,21; 31 (МПа). На разі найменш надійним серед наведених вище напружень зсуву є напруження, яке відповідає $T_{1,25}$, тобто крихкому стану. Аналіз різних джерел та результатів досліджень автора зі співробітниками відносно цього свідчать, що воно може коливатись значною мірою в залежності від методу випробування.

Крім того, причиною цього є також недостатнє та поверхневе вивчення переходу бітуму в крихкий чи засклований стани. Існує, принаймі, п'ять більш менш поширених

методів таких випробувань: традиційний Фрааса; кінетика зміни лінійних розмірів при розтязі зразків за методом TSRST; BBR–критерій SHRP за згином та ABCD за критичними деформаціями та напруженнями тріщиноутворення в бітумному кільці; класичний метод ділатометрії за зміною вільного об'єму. Умовні температури тріщиностійкості, визначені за цими методами наведені в табл. 1. [12, 13, 14].

Згідно з цими даними, найвищими є температури крихкості з Фраасом та BBR. Найнижчими, порівняно з результатами за Fraas'ом є температури, визначені методом ABCD та методом ділатометрії (різниця між цими групами коливається в межах (14-16) °С. Показники, визначені за ABCD та методом ділатометрії, відрізняються в межах похибки. Для конкретного висновку наведена вибірка звісно недостатня. Але на користь та про об'єктивність двох цих методів свідчить факт фізичної сутності обох. Існує ще один метод ймовірного визначення температури тріщиноутворення. Це метод механічного склування, який полягає у визначенні температури, за якої модуль пружності за її зниження виходить на плато, що свідчить про механічне склування бітуму. Однак, у цьому випадку результат залежить від багатьох факторів, зокрема від схеми напруженого стану та швидкості деформування.

В історичному аспекті треба підкреслити, що спроби придати пенетрації фундаментальний характер були здійснені R.N Saall [15] та G.Care і D.Lorent [6] у зв'язку її (пенетрації) з в'язкістю [6], Van der G. Poll'e відносно модуля жорсткості [7]. Випробування, щодо взаємозв'язку пенетрації з в'язкістю, модулем жорсткості та індексом пенетрації стали стартовим аргументом на користь прямого співвідношення пенетрації з напруженням.

Крім цього, на користь використання такого підходу (принципу), існує пряма аналогія з визначення опору зсуву за глибиною проникнення конічного індентора в різноманітні суміші та матеріали. Жодних досліджень щодо інтерпретації пенетрації як показника напруження зсуву довгий час не було здійснено, бо такий зв'язок навіть не передбачався.

Викладені вище аргументи на користь заміни традиційного індексу пенетрації таким, що охоплює інтервал пластичності від $T_{кр}$ до $T_{розм}$ спонукають до порівняння в цій роботі залежностей коефіцієнтів ТЧБ, отриманих за традиційним методом та методом, що охоплює інтервал від температури розм'якшенності до температури крихкості.

Таблиця 1

Температури тріщиностійкості бітумів за даними Груднікова Б. І.

| Бітуми | Пенетрація при 25 °С, 0,1 мм | Метод визначення, °С | | | | |
|--------|------------------------------|----------------------|-------|-------|-------------|--------------|
| | | Фрааса | TSRST | ABCD | BBR-300 E/m | Ділатометрія |
| 20/30 | 23 | -11 | -18,6 | -24,8 | -12,3/-13,3 | -22,5 |
| 35/50 | 43 | -11 | -23,4 | -26,7 | -16,6/-18,2 | -27,5 |
| 50/70 | 54 | -14 | -24,2 | -27,6 | -16,5/-19,2 | |

Примітка: E – за модулем жорсткості; m – за коефіцієнтом пластичності.

Для з'ясування цієї проблеми були використані літературні дані, за якими можна порівняти схожимість двох показників температурної чутливості, які визначали за наведеними формулами:

$$TЧБ_{25} = \frac{\lg \Pi_p - \lg \Pi_{25}}{T_p - T_{25}} \quad (3)$$

$$TЧБ_{кр} = \frac{\lg \Pi_p - \lg \Pi_{кр}}{T_p - T_{кр}} \quad (4)$$

У випадку невідповідності цих результатів будь-яка заміна існуючої системи оцінки температурної чутливості бітумів була б неможливою, бо це означало б повну дискредитацію знань, накопичених за останні 90 років науковцями та практиками.

Узагальнений графік (рис. 2) показує, що температурна чутливість з достатньою надійністю (стандартне відхилення становить 0,884) відповідає рівнянню $y = -0,043x + 0,0413$.

Загальна кількість винесених на рисунок об'єктів становить 53, з них інтервалу 25 °С – T_p відповідає 41 бітум. Їхня залежність

описується рівнянням $y = -0,044x + 0,48$ зі стандартним відхиленням 0,87. Аналізуючи **рис. 1**, можна зазначити, що узагальнена залежність розташовується в межах індексу penetрації рівній нулю $-2,0 \dots +2,2$, тобто вона охоплює діапазон бітумів, близька до нормованих стандартами EN та ДСТУ.

На графіку відзначається одна точка з індексом penetрації нуль та відповідною температурою чутливості, близькою 0,04. Про цю особливу точку у [8] сказано наступне: «індекс penetрації рівній нулю, відповідає температурній чутливості, рівній 0,04». Там також підкреслено, що значення коефіцієнта температурної чутливості коливається в межах 0,015-0,06.

Друга характерна деталь проблеми полягає у тому, що винахідники методу оцінки ТЧБ визнали за необхідне замінити температуру

«КіК» температурою, що відповідає penetрації 800x0,1 мм [2]. На перший погляд, це не є принциповим і необхідним. Однак, під час більш глибокого розгляду сутності ТЧБ треба визнати, що такий підхід дає можливість використовувати подібний за сутністю показник – опір бітуму зсуву. Бо в цьому випадку стає можливим перевести penetрацію в напруження зсуву [9] та описати ТЧБ узагальненою степеневою прямолінійною залежністю. Крім того, як уже підкреслено, не можна нехтувати тим експериментальним фактом, що ця залежність (**рис. 3**), близька до наведеної на **рис. 2**, названа W. Nekelem'ом DRB- діаграмою презентції бітуму. У [8] вона розповсюджується на область високих технологічних температур (перемішування).

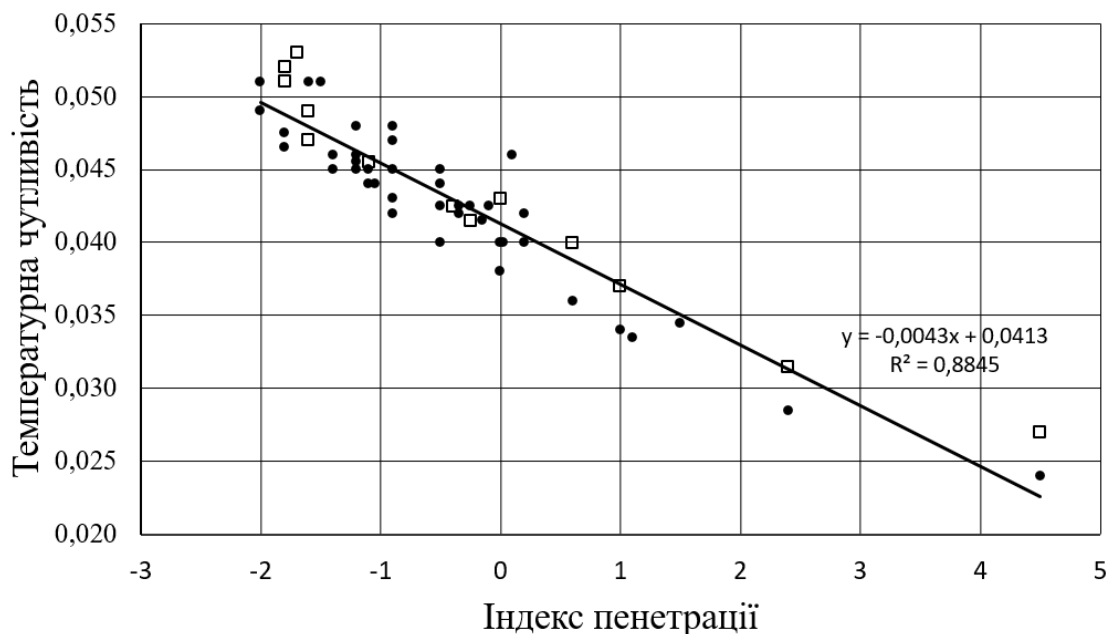


Рис. 2. Залежність розрахункових коефіцієнтів температурної чутливості (ТЧБ) від індексів penetрації (PI) для діапазону температур: $25\text{ }^{\circ}\text{C} - T_{\text{кін}}$ та $T_{\text{кр}} - T_{\text{кін}}$ (за даними: Van Der Poll [7], F. Corte [16]; F. Migliori [17]; V. Eckman [14], V. Zolotarev [19]).

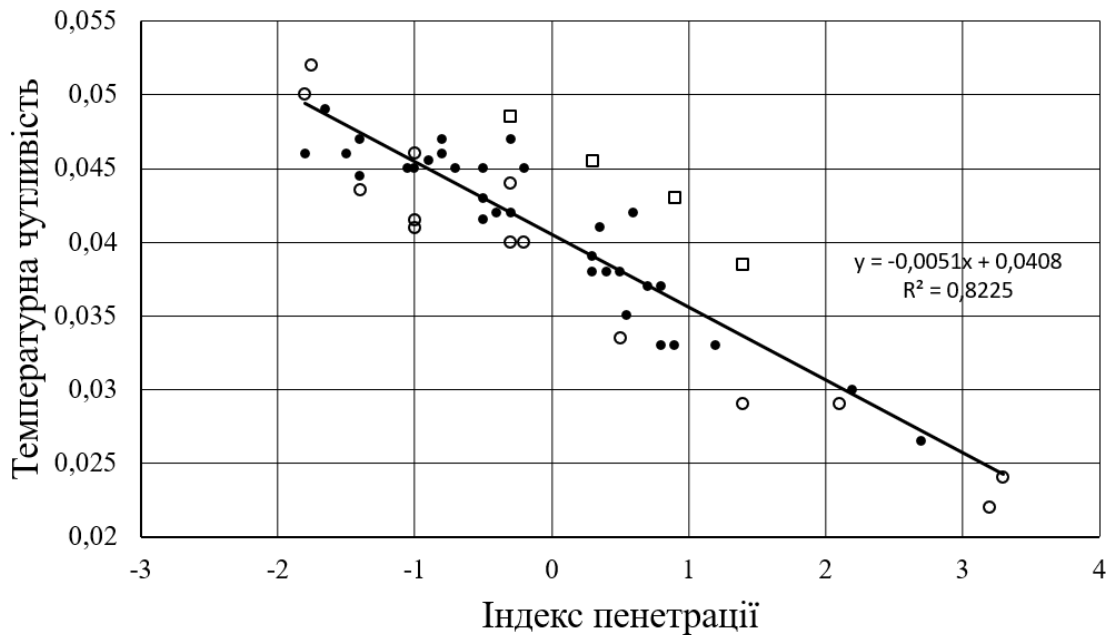


Рис. 3. Залежність температурної чутливості (ТЧБ) від індексу пенетрації дистиляційних бітумів, компаундованих і з низькою пенетрацією за даними [7], [16], [17], [18], [19].

Із метою встановлення прийнятності цієї залежності щодо бітумів, отриманих за різними технологіями, були розглянуті бітуми: дистиляційні, компаундовані та низькопенетраційні. Відповідна залежність температурної чутливості від індексу пенетрації наведена на **рис. 3**. Серед 50 бітумів звертають на себе увагу 12 бітумів, досліджених у [7], та 4 бітуми, використаних у J. F. Corte. Ці бітуми здебільшого тверді з пенетрацією від 13x0,1 мм до 22x0,1 мм. У випадку таких бітумів температури T_p та T_{800} , зазвичай, можуть істотно відрізнятися, бо їхня структура і склад (тип «гель») не є прийнятними для дорожніх бітумів і за іншими ознаками. Саме для них характерне найбільше відхилення коефіцієнту температурної чутливості від загальної лінійної залежності. Наразі важко пояснити, чому такі бітуми, маючи однаковий темп зниження ТЧБ, притаманний бітумам: золь-гель, золь однаково відрізняються від генеральної залежності по обидві її сторони. Посилаючись на W. Nekelom'a [8], можна припустити, що це викликано значним вмістом у них парафіну. Ця залежність (**рис. 2**) близька до наведеної на **рис. 1**: $y=0,051x+0,04$. Вона характеризується стандартним відхиленням $R^2=0,82$. Як і попередня, вона проходить через нульове значення індексу пенетрації за умови мінімального відхилення від значення коефіцієнта температурної чутливості, рівного 0,04, про важливість якого було наголошено вище.

Характер залежностей, наведених на **рис. 1** та **2**, свідчить на користь необхідності визначення коефіцієнту ТЧБ, базуючись на дійсному інтервалі, на відміну від T_p до T_{25} , як було раніше, та залишається до цього часу в діючих стандартах всіх країн світу.

Вище було показано на реальних прикладах, що температурні залежності, визначені за пенетрацією та критичними напруженнями зсуву $\tau_{1,25}$, близьким до 31-32 МПа, τ_{31} – (0,21 МПа) та τ_{800} – (0,0015 МПа), є практично ідентичними такої же пенетраційній залежності, отриманій з використанням $P_{1,25}$, P_{31} , і P_{800} та коефіцієнту ТЧБ. Це відкриває можливості визначати напруження зсуву або пенетрації за будь-якої температури в межах температур розм'якшення (T_p) та крижкості ($T_{кр}$).

$$TЧБ = \frac{\lg \tau_{1,25} - \lg \tau_x}{T_x - T_{1,25}} \quad (5)$$

Так стає можливим враховувати вклад бітуму у міцність на зсув асфальтобетону в будь-якому кліматичному регіоні за будь-якої температури. Опір бітуму зсуву може також бути визначеним графічно за діаграмою (DRB) (**рис. 1**).

Встановлені в [10] залежності дають змогу визначити серединну міцність бітуму на зсув за формулою: $\tau_{cp} = \sqrt{\tau_{1,25} \cdot \tau_{800}}$.

Вона практично однакова для всіх серединних температурних зон і відповідає напруженню 0,20-0,22 МПа. Це підтверджується експериментальними даними.

Викладений вище математично-графічний спосіб визначення стандартних властивостей бітумів може бути поглиблений аналізом впливу складових на їхні технічні характеристики. Щоб розкрити цей вплив можна скористатись принципом М. Гордона та Дж. Тейлора [12], який полягає у врахуванні впливу кожної складової (її величини та дольового вмісту) на показники кінцевого продукту. Отже, для реалізації цього принципу необхідно знати показники властивостей кожної складової, що входить до бітуму (табл. 2).

Тоді температура крихкості чи розм'яшеності може бути розрахована за формулою:

$$T_{кр(p)} = \frac{C_1 \times T_{кр}^1 + C_2 \times T_{кр}^2 + \dots + C_n \times T_{кр}^n}{C_1 + C_2 + \dots + C_n} \quad (6),$$

де $C_1, C_2 \dots C_n$ частка компонентів у мальтеновій складності бітуму; $T_{кр}^1, T_{кр}^2, T_{кр}^n$ – температура крихкості складових (ПНУ, МЦА, БЦА, ПБС, СБС – парафіно-нафтових моноциклічних, біциклічних, поліциклічних, ароматичних, ароматичні вуглеводнів, смоли петролейно-бензолні, смоли спиртобензолні).

Користуючись принципом адитивності, були розраховані температури розм'яшеності та крихкості бітумів трьох структурних типів, виготовлених Львівським інститутом «МАСМА» (табл. 3) під керівництвом О. М. Бодана.

Таблиця 2

Властивості компонентів мальтенової складової бітумів (за даними [12])

| Показники властивостей | Складові | | | | | |
|-------------------------------|----------|-----|-----|-----|-------|-----|
| | масла | | | | смоли | |
| | ПНВ | МЦА | БЦВ | ПЦВ | ПСБ | СБС |
| Температура розм'яшеності, °С | 39 | 20 | 10 | 11 | 37 | 73 |
| Температура крихкості, °С | -70 | -50 | -30 | -32 | 1 | 2 |

Таблиця 3

Експериментальні та розраховані за принципом адитивності температури розм'яшення та крихкості бітумів типів

| Бітуми типів | Температура розм'яшеності, °С | | | Бітум | Температура крихкості, °С | | | Бітум |
|--------------|-------------------------------|-------|-------|---------------------|---------------------------|-------|-------|----------------------|
| | асфальтени | оливи | смоли | | асфальтени | оливи | смоли | |
| | | | | | | | | |
| Гель | 21,6 | 21 | 13,3 | <u>56,9</u> 63,0 | 14,0 | -41,3 | 1,8 | <u>-25,5</u> -33 |
| Золь-гель | 13,2 | 16,6 | 21,8 | <u>51,6</u> 54,0 | 10,5 | -33,7 | 4,7 | <u>-18,5</u> -24 |
| Золь | 7,8 | 19,8 | 25,8 | <u>44,0</u> 46,0 | 6,5 | -23,8 | 4,6 | <u>12,7</u> -14,0 |

Примітка: У знаменнику наведені експериментально визначені температури бітумів

Показаний тут зв'язок між температурами крихкості, розм'якшеності із залученням еквіпенетраційної температури (що відповідає пенетрації 31x0,1 мм) фактично свідчить про принципову обумовленість стандартних показників діапазоном інтервалу пластичності між температурою крихкості та розм'якшеності, власно значенням індексу пенетрації в його класичній трактовці. Логічно, що це призвело до виявлення кількісного зв'язку між критеріями температурного стану [20].

$$T_{кр} = 2T_{31} - T_p \quad (7)$$

$$T_{31} = \frac{T_{кр} + T_p}{2} \quad (8)$$

До того ж температура T_{31} може розглядатись як температура рівних комплексних модулів, а головне – значень когезійної міцності бітумів. Особливо це стосується бітумів типу «золь» [18]. Водночас такі співвідношення, як і будь-які інші показники, безумовно мають ґрунтуватись на врахуванні групового складу бітумів. Бо саме він зумовлює структурний тип (золь, золь-гель, гель) в трактуванні європейських дослідників або 1-го, 2-го та 3-го структурних типу в інтерпретації А. С. Колбановської.

Зважаючи на це, є сенс викласти початкові передбачення щодо розтяжності. Вони базуються на тому, що за температури розм'якшеності (T_p) та крихкості ($T_{кр}$) розтяжність не є вимірюваною. Отже, необхідно звести діапазон вимірювань до рівня максимальної розтяжності. Температурна залежність (рис. 4)

розтяжності (дуктильності) має куполоподібний симетричний характер. Максимальне значення розтяжності за 25 °С відповідає рівнянню:

$$T_g^{max} = T_p + T_{кр} \quad (9)$$

Вона коливається у межах (32-11) °С для бітумів типу «золь» з пенетрацією від 90x0,1 мм до 224x0,1 мм. Із переходом від бітуму «золь» до бітуму «гель» вона знижувалась на (16-22 °С). При цьому отримано практично повний збіг між розрахунковою температурою та експериментально визначеною в діапазоні від 11 °С до 37 °С.

Виявлений зв'язок між розтяжністю та інтервалом пластичності дає підставу щодо його обумовленості груповим складом. Для підтвердження цього передбачення було проаналізовано властивості 31 бітуму із різних джерел. Зміна вмісту смол від 15 до 40 % супроводжувалась прямолінійним зростанням розтяжності з коефіцієнтом кореляції 0,92. Виходячи з аналізу впливу складових на зміну структурного типу бітумів, було проведено порівняльний аналіз із врахуванням ролі ароматичних вуглеводнів, які не забезпечують розтяжність, але сприяють набряканню асфальтенів, переводячи їх в еластичний стан. Більш того, у випадку ліофільних асфальтенів утворюється розчин, згідно з Л. М. Гохманом, близький за властивостями до смол. Це підтверджується залежністю наведеною на **рис. 4** ($\tau_{xy}=0,88$). Наявність такої залежності була доведена в роботі [7].

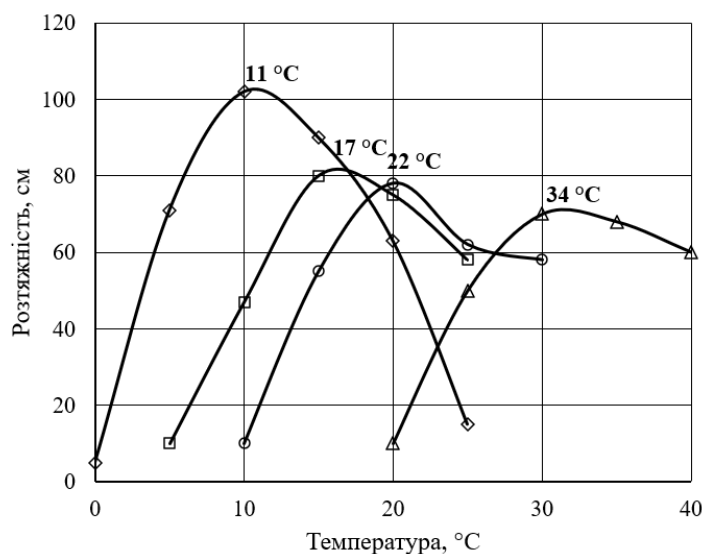


Рис. 4. Температурна залежність розтяжності бітумів із пенетрацією за температури 25 °С (0,1 мм): △ – 74; ○ – 78; □ – 167; ◇ – 224

На разі також встановлено, що збільшення індексу колоїдної нестабільності за умови зниження вмісту смол та ароматичних вуглеводнів супроводжується зменшенням розтяжності бітуму. Цей приклад є ще одним аргументом на користь того, що механічні (реологічні) властивості бітумів, як і будь-яких матеріалів, залежить від їхнього складу.

Внесок асфальтенової складової в температуру крихкості та розм'якшеності враховується за методикою, запропонованою Б. Г. Печеним. Вона базується на тому, що кожний відсоток асфальтенів (після 10 %) підвищує температуру розм'якшеності на 1,2 °С, а температуру крихкості на 0,5 °С.

Результати, отримані завдяки використанню принципу адитивності, дають змогу прослідкувати тенденції, які мають місце в формуванні ключових показників якості бітумів. Асфальтени залежно від структурного типу бітумів (золь, золь-гель) підвищують температуру розм'якшеності на (20-40) %, вклад смол для тих же типів бітумів становить (60-25) %; вклад оливи становить (23-35) %. Керуючись цим та накопиченим досвідом, можна регулювати властивості бітумів в заданому напрямі, тобто згідно з термінологією акад. П. А. Ребіндера «із наперед заданими властивостями»

для конкретних кліматичних і транспортних умов їхнього використання.

Виходячи з розглянутого вище принципу адитивності, були розраховані температури розм'якшеності та крихкості бітумів однієї пенетрації, отриманих з різної сировини **табл. 3**. Метою експерименту був пошук сировини, з якої можна було б виготовити бітум типу «золь-гель», тобто 3-го структурного типу. Це досягається завдяки збільшенню ваги сировини через підвищення вмісту смол. Отримано низку бітумів від типу «гель» до типу «золь-гель». При цьому: індекс пенетрації зменшувався від +0,3 до -1,3, інтервал пластичності зменшувався від 78 °С до 59 °С, вміст смол зростав від 20 % до 33,8 %, а асфальтенів знижувався від 24 % до 16,2 %.

Наведені в **табл. 3** та **4** дані чітко показують, що груповий склад бітуму можна змінювати в заданому напрямі й так передбачити не лише стандартні, а й реологічні властивості, що вкрай необхідно для отримання довговічних асфальтобетонів.

Наведений тут приклад є істотним аргументом на користь уваги до первинної сировини – нафт, найбільш придатних для виготовлення бітумів із передбаченими можливостями. Цього принципу неухильно дотримуються ведучі виробники в Європі та США.

Таблиця 4

Керована зміна властивостей бітумів шляхом регулювання консистенції сировини за даними Груднокова І. Є.

| Показники | Бітуми | | | | |
|---|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Пенетрація 0,1 мм | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| Температура °С: розм'якшеності крихкості | 51/49,8 | 49/50,2 | 48/47,5 | 47/46,6 | 46/45,2 |
| | -24/-19 | -20/-16 | -17/-15,6 | -15/-14,4 | -13/-14,1 |
| Індекс пенетрації | +0,3 | -0,7 | -0,9 | -1,1 | -1,3 |
| Вміст % оливи смол | 56 | 53 | 51,6 | 51,3 | 50,0 |
| | 20 | 23,5 | 27 | 29,9 | 33,8 |
| Асфальтенів | 24,0 | 23,5 | 20,8 | 18,8 | 16,3 |

Примітка: В чисельнику наведені експериментальні дані, в знаменнику – розрахункові

Висновки

1. Прийнятий більше 80 років для оцінки температурної чутливості бітуму індекс пенетрації є безрозмірним показником, обмеженим температурним діапазоном (25°С–T_p), непридатним для кількісного врахування зміни

властивостей бітумів при зміні температури. Замість нього пропонується кількісний показник зміни пенетрації та напруження зсуву бітумів у межах температур від температури розм'якшення до температури крихкості, названий коефіцієнтом температурної

чутливості бітумів ТЧБ. Цей показник дає змогу визначити penetрацію або опір бітуму зсуву в усьому визначеному вище діапазоні температур. Ідентичний показник ТЧБ може бути визначений за penetрацією або за опором бітуму зсуву. В основі такого збігу лежить один механізм – опір бітуму зсуву.

2. Визначено чотири стани деформування бітуму в межах інтервалу пластичності: крихкий нижче температури крихкості або вище напруження зсуву 31 МПа, чи penetрації меншій 1,25x0,1 мм; пружньо-в'язкий між напруженнями зсуву 31 МПа та 0,21 МПа або penetрацією 1,25x0,1 мм та penetрацією 31x0,1 мм; в'язко-пружній між напруженнями зсуву 0,21 МПа та 0,0015 МПа або penetрацією 31x0,1 мм та 800x0,1 мм, в'язкий під час напруження нижчого 0,0015 МПа або penetрації вищій 800x,1 мм.

3. Встановлено ідентичність показників температурної чутливості бітумів від -2,0 до +2,0 за діючою системою оцінки та 0,05 до 0,02 за пропонуємою системою. Експериментальні доведена відповідність нульового значення індексу penetрації (за старою системою) показнику ТЧБ рівному 0,04. Ця відповідність є основоположною в розробці індексу penetрації Pfeiffer'ом і Van Doormal'ем та його наукового обґрунтування Heukel'ом W.

4. Логарифмічна залежність penetрації від температури встановлена «батьками-розробниками» доповнена точкою еквіпенетраційної температури T_{31} та межею еквізсувної температури, що дорівнює 0,21 МПа. Співвідношення між межами температурних зон в обох випадках близьке до 2.5.

5. Практична цінність результатів досліджень підтверджується прийнятністю для розрахунку температур розм'якшення та крихкості бітумів принципу адитивності Гордона-Тейлора, що полягає у визначенні цих температур за співвідношенням вмісту та властивостей складових бітумів. Можливість прогнозування властивостей за цим принципом підтверджена розрахунками полюсних температур інтервалу пластичності бітумів різного групового складу та різних марок.

6. Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що співвідношення розрахункових та експериментальних даних виявляється краще для бітумів типів золь та золь-гель. Воно погіршується у випадку бітумів типу гель із великим індексом penetрації або малим індексом

температурної чутливості менше 0,025-0,03. Саме із цим пов'язано використання в країнах з розвиненою інфраструктурою важких смолих малопарафінових нафт.

References

1. Pfeiffer J. Ph, Van Doormal P.M. (1936). The reological properties of asphaltique bitumens. Journal of the Institute of Petroleum Thechnologi USA, 22, 414-440.
2. Gerritsen A. (1995). Les liants hydrocarbonnes. Bitume fabrication, caracteristiques et selection ENPCh, 19.
3. Zolotariov V. O., Pyrih Ya. I. (2018). Standartization of oil paving. Ving viscous bitumen in Ukraine. Dorogy i Mosty Journal, 91-105.
4. Mai Lan NGUYEN. (2009). Les enrobes bitumineux. Tom 1. Paris. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, RGRA, 228. Reterieved from https://www.researchgate.net/profile/Mai-Lan-Nguyen-2/publication/38320624_Etude_de_la_fissuration_et_de_la_fatigue_des_enrobes_bitumineux/links/545c93620cf27487b44b34e6/Etude-de-la-fissuration-et-de-la-fatigue-des-enrobes-bitumineux.pdf
5. Molenaar J. M. M., Hagos E. T., Van Yen M. E. C. (2004). An investigation into the specification on rheological properties of polymer modified bitumen. Proceedings 3rd Europhalt & Eurobitume Congress. Vienna, 2, 2080-2087.
6. Carre G., Lorent D. (1964). Relation entre la penetration et la viscosite des bitumes. Bulletin de L'Association Francaise de Techniciens du Petrole, 157.
7. Van der Poel. (1954). A general system describing the viscoelastic proprieties of bitymens and ITS relation to routine test data. J. Appl. Chem, 4, 221.
8. Heukelom W. (1975). Une methode ameliee de caracterisation des bitumes pas leurs proprietes mecaniques. Bull. Liaison Labo. P.et Ch, 76, 55-63.
9. Zolotarev V. (2021). Bitumen penetration and shear resistance relation, IN: 7th Europhalt & Eurobitume Congress, 39.
10. Zolotarev V. (2022). Methods de termining stresses at key temperatures. Construction and Building Materials, 345, 128365.
11. Zolotarev V. (2001). Relations generalisees liant la penetration aux points de ramollissement et de fragilite des bitumes routiers RGRA, 794, 37-40.
12. Quedeveille A. (1972). La transition vitreuse du bitume. Bull. Liaison labo. P.et Ch., 61, 125-135.
13. Sang-Soo Kim. A. (2018). New Test for Asphalt Quality: Asphalt Binder Cracking Device (ABCD). Ohio Asphakt Paving Conference, 6-2, 30.
14. Eckmann B. (2016). New bitumen performance indicators. A feasibility study. E&E Congres Prague. Czech Republic, 11.
15. Saal R.N.I. (1955). Mechanical testing of asphaetic bitumen. 4th World Petroleum Congress. Rome. Section V. A. Paper 3, 1-17.
16. Corte J.-F. Brosseud Y., Simoncelli J.-P., Caroff G. (1994). Investigation rutting of asphalt surface layers: influence of binder and loading configuration. Transportation research Record. 1436.1, 28-37.
17. Migliori F., Daligault, A.Moginengo J-Ch (1996). Etude du comportement basse temperature des bitumes routiers. Application du Bending Beam Rheometer. Bulletin de liaison des laboratoires ponts et chaussées.
18. Zolotarev V. (2022). Methodes for determining stresses at key temperatures. Construction and Buildin Materials, 345, 128365.
19. Zolotarev V. O. (2024). On the convergence of quality indicators of road bitumen for penetration and Superpave Systems. Avtoshiakhovyk Ukrainy Journal, 77-90. DOI: 10.33868/0365-8392-2024-2-279-86-99
20. Chappat M., et Plaut, J. (1982). Bitume un peu de mathematiques. Revue General des routes et de l'amenagement, 765, 87-8.

