

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ВИЗНАЧЕННЯ В'ЯЗКІСНО-ПЕНЕТРАЦІЙНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ БІТУМНИХ В'ЯЖУЧИХ

Пиріг Я. І.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У статті розглянуто історичний розвиток підходів до визначення в'язкісно-пенетраційних залежностей бітумних в'язучих. Наведені формули, що були запропоновані різними дослідниками для визначення розрахунковими методами в'язкості бітумів, та критерії їх застосування.

Ключові слова: бітум, пенетрація, в'язкість, температура, взаємозв'язок.

Вступ

Неухильне зростання вантажонапруженості та інтенсивності руху на автомобільних дорогах потребує підвищення якості та довговічності асфальтобетонних покриттів. З метою забезпечення високої якості дорожніх покриттів протягом останніх 30–40 років у дорожніх галузях різних країн світу з'явилися нові типи асфальтобетонів, під час виготовлення яких застосовують бітумні в'язучі, модифіковані різноманітними домішками чи їхніми комплексами. З огляду на те, що стандартні методи оцінювання якості бітумних в'язучих залишилися майже незмінними, актуальним стає питання щодо доцільності оцінювання ними модифікованих в'язучих.

Аналіз публікацій

Одними з наслідків промислової революції, що відбувалась у провідних державах світу з середини XVIII до кінця XIX століття, є виникнення нових галузей промисловості, зокрема нафтовидобувної, нафтопереробної та автомобільної. Це зі свого боку стало поштовхом до вдосконалення дорожнього будівництва та використання більш міцних дорожніх одягів, зокрема асфальтобетонних, для виготовлення яких використовувався нафтовий в'язкий дорожній бітум.

Збільшення обсягів влаштування асфальтобетонних дорожніх покриттів потребувало застосування якісного бітумного в'язучого, що дало поштовх споживачам дорожніх бітумів до створення приладів для визначення показників, які б визначали якість в'язучих. Саме на межі XIX та XX століть були створені перші прилади для визначення якості бітумів (пенетрометр Г. Боуєна – 1889 р., прилад для визначення температури

розм'якшеності за методом «Кільце та Куля» – 1903 р., дуктилометр А. Доу – 1903 р., прилад для визначення температури крихкості за методом Фраасу – початок 30-х років минулого століття) та запропонована перша специфікація, в якій нормувалися значення показників якості (1924 р., США) [1].

Оскільки перші стандартизовані показники якості були умовними та емпіричного типу, неможливо було визначити необхідні для проектування дорожнього одягу характеристики. Деякі дослідники визначали взаємозв'язок стандартизованих показників якості (пенетрація, температура розм'якшеності, температура крихкості за Фраасом) з фундаментальними [2]. Оскільки стандартний метод визначення пенетрації є простим, швидким та не потребує складного обладнання, а крім того, дозволяє визначати характеристики бітумів у доволі широкому температурному діапазоні, його застосовували для визначення співвідношень з фундаментальною характеристикою в'язучих – в'язкістю.

На підставі чисельних експериментальних даних було визначено наявність в'язкісно-пенетраційної залежності для бітумів різної консистенції (рис. 1), яку можна записати таким рівнянням:

$$\eta = A \cdot \Pi^{-b}, \quad (1)$$

де η – в'язкість, пуаз; Π – пенетрація бітуму, 0,1 мм; A , b – коефіцієнти.

Першими в чисельному виді залежність між в'язкістю та пенетрацією визначили R. N. J. Saal та J. Koenigs, які 1933 р. вивели формулу [2]:

$$\eta = \frac{1,58 \cdot 10^9}{\Pi^{2,16}}. \quad (2)$$

Через низьку точність розрахованих зна-

чень в'язкості з експериментально визначеними автори внесли уточнення до запропонованої формули та отримали залежність, що стала класичною [3]:

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

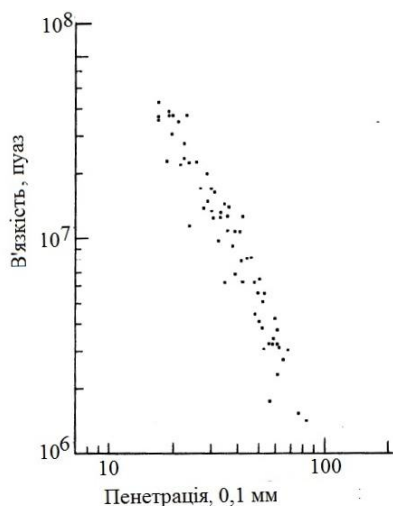


Рис. 1. Приклад в'язкісно-пенетраційної залежності бітумів [4]

Розробники формули зазначали, що вона може застосовуватися лише для матеріалів, які визначаються ньютонівською поведінкою, водночас похибка розрахунку в'язкості не перевищувала 5 ... 10 %.

Відповідно до наявної ще на початку минулого століття концепції, що всі бітуми за температури розм'якшеності визначаються ньютонівською поведінкою та мають однакову в'язкість [5–7] (за даними різних дослідників, в'язкість була в межах від 8000 до 30000 та навіть 50000 пуаз [5–9]), J. P. Pfeiffer і P. M. Van Doormaal, прийнявши значення в'язкості за цієї температури в 13000 пуаз (згідно з даними, що використовував R. N. J. Saal), встановили значення еквіпенетраційної температури:

$$P = \frac{1}{1,93} \sqrt[1,93]{\frac{5,13 \cdot 10^9}{1,2 \cdot 10^4}} = 827 \times 0,1 \text{ мм}. \quad (4)$$

Округливши це значення до $800 \times 0,1$ мм, J. P. Pfeiffer і P. M. Van Doormaal використали його в запропонованому 1939 р. показнику температурної чутливості бітумів – індексі пенетрації [10]. На думку розробників, цей показник може використовуватися для оцінювання лише бітумів, які визначаються

ньютонівською поведінкою, тобто бітумів зі структурно-реологічним типом «золь».

Після розроблення методу визначення температури крихкості за Фраасом та поширення використання цього показника для оцінювання низькотемпературних властивостей бітумів була розрахована друга еквіпенетраційна температура: у 50-ті роки минулого століття канадські дослідники P. J. Rigden та A. R. Lee визначили, що температура крихкості за Фраасом є еквів'язкою температурою, за якою в'язкість бітумних в'язучих складає 4×10^9 пуаз [11]. Відповідно до цього пенетрація за температури крихкості має становити

$$P = \frac{1}{1,93} \sqrt[1,93]{\frac{5,13 \cdot 10^9}{4 \cdot 10^9}} = 1,14 \times 0,1 \text{ мм}, \quad (5)$$

що є близьким до значення в 1,25 м, яке було прийнято в [12] як пенетрація для температури крихкості за Фраасом.

Мета та постановка завдання

Метою роботи є розгляд на основі літературних даних підходів до визначення в'язкісно-пенетраційних залежностей бітумних в'язучих. Для досягнення поставленої мети було здійснено пошук літературних джерел щодо питання розрахування в'язкості, їхній критичний аналіз та визначені критерії їх застосування.

Пенетраційно-в'язкісні залежності бітумів

Формулу (3), що запропонували R. N. J. Saal та J. Koens розкритикували через те, що вона не була точною та не враховувала зчеплюваність поверхні пенетраційної голки з бітумом й еластичні властивості в'язучого, що також позначалось на точності розрахування в'язкості [13]. Недоліком запропонованої формули було й те, що пенетраційна голка розглядалась як циліндричний стрижень без врахування її конусної частини. Через це формула (3) містила значні похибки під час розрахування в'язкості за значеннями пенетрації, що є меншими ніж $60 \times 0,1$ мм [14]. Крім того, критикували основний принцип, що полягав у рівності значень в'язкості всіх бітумів за температури розм'якшеності, а також саму можливість опису в'язкісно-пенетраційної залежності таким простим рівнянням [13, 14]. Незважаючи на це та з огляду на необхідність у простому методі визначення в'язкісних характеристик бітумів у широкому температурному діапазоні, вчені

продовжували вирішувати проблему пошуку залежностей між в'язкістю та стандартними показниками бітумів продовжився.

1937 р. Е. О. Rhodes та Е. W. Volkmann [15] розглянули процес занурення пенетраційної голки в бітумі як рух коаксіального циліндра, що падає, у віскозиметрі та на основі цього запропонували формулу, що дозволяла визначати в'язкість за дискретних визначень пенетрації протягом будь-якого часу:

$$\eta = \frac{1,25 \cdot 10^9}{(P_\phi + P_n - 46) \cdot (P_\phi - P_n)} \cdot \Delta t, \quad (6)$$

де P_ϕ – фінальне значення пенетрації; P_n – початкове значення пенетрації; Δt – час занурення пенетраційної голки в бітум, с.

Якщо $P_n = 0$, а $\Delta t = 5$ с, формула (6) можна записати як

$$\eta = \frac{6,25 \cdot 10^9}{P^2 - 46 \cdot P}. \quad (7)$$

На відміну від формули, що запропонував R. N. J Saal., Е. О. Rhodes та Е. W. Volkmann у процесі виведення формули спробували врахувати конусну частину пенетраційної голки. Завдяки цьому під час визначення в'язкості за формулою (6) за значеннями пенетрації, що менша ніж $10 \times 0,1$ мм, спостерігається різниця між значеннями, визначеними за цією формулою та формулою (3). Е. О. Rhodes та Е. W. Volkmann також розробили формули, за якими можна визначати середнє напруження зсуву на поверхні пенетраційної голки та відповідну середню швидкість зсуву для будь-якого інтервалу часу випробування.

Згідно з [16], крім того, що запропонована формула не мала міцної теоретичної основи, розрахунок в'язкості за малих та надто високих значеннях пенетрації містив суттєві помилки.

Незважаючи на критику, розрахунковий метод визначення в'язкості [2, 6, 13, 14] досить часто застосовувався виробничниками, його було використано як основу номограми визначення жорсткості бітумів, яку розробив на початку 50-х років минулого століття С. D. Van Poel [17]. На його думку, «реологічні властивості бітумів настільки точно визначаються за допомогою пенетрації та температури розм'якшеності, що їхня механічна поведінка, якщо її визначити в одиницях жо-

рсткості, може бути розрахована з високою точністю за всіх температур та часових вимірів» [17]. У запропонованій номограмі жорсткість бітумних в'язучих розглядалась як функція температури розм'якшеності, пенетрації та її індексу. Протягом наступних 40 років ця номограма використовувалась проєктувальниками різних країн світу.

1963 р. французькі науковці G. Carre та D. Laurent [18] на основі даних випробувань бітумів у діапазоні температур від 15°C до 50°C запропонували свій підхід до розрахування в'язкості бітумів, який визначав геометрію пенетраційної голки, тобто форму її кінцівки, як усічений конус, висотою 5,4 мм. Внаслідок цього використовувалось дві формули:

– для пенетрації, що є меншою ніж $60 \times 0,1$ мм:

$$\eta = \frac{9,5 \cdot 10^9}{P^{2,60}}, \quad (8)$$

– для пенетрації, що є більшою ніж $60 \times 0,1$ мм:

$$\eta = \frac{1,45 \cdot 10^9}{P^{2,15}}. \quad (9)$$

Суттєвою перевагою дослідження G. Carre та D. Laurent, крім врахування форми пенетраційної голки, було співставлення будь-якого значення пенетрації з відповідною швидкістю зсуву, яка визначалась як рівнов'язкісна. Однак і ці формули не забезпечували достатньо високу точність розрахунку в'язкості, зокрема для бітумів низької пенетрації та окислених в'язучих, тобто у випадку в'язучих, що визначалися неньютонівською поведінкою. Підтвердженням цього є результати випробування 35 різноманітних бітумів у діапазоні температур від 5°C до 60°C , згідно з якими спостерігалась різниця в експериментально визначених та розрахованих значеннях в'язкості, що досягала 25 % [2]. Автором [2] зазначено, що збіжність експериментальних та розрахованих значень в'язкості спостерігалось лише у випадку визначення в'язкості за допомогою віскозиметра з рухомою пластиною, у випадку ж застосування віскозиметрів інших конструкцій спостерігалась суттєва різниця в значеннях в'язкості. Згідно з висновком, який зробив Н. Е. Schweyer, значення в'язкості, визначені за формулами, що запропонували G. Carre та D. Laurent, майже нічим не відрізняються від

значень в'язкості, що розраховані за формулою (2), яку ще 1933 р. вивів R. N. J. Saal.

Аналізуючи формули, що запропонували G. Carreta та D. Laurent, W. Heuckelom, визначивши, що за температури розм'якшеності в'язкість складає 13000 пуаз, а пенетрація дорівнює $800 \times 0,1$, запропонував свою формулу, яка, на його думку, не залежала від температурної чутливості бітумів, тобто могла використовуватися для будь-яких бітумів, незалежно від їхнього структурно-реологічного стану [19]:

$$\log \frac{\eta}{13000} = \frac{-8,5 \cdot \log \Pi / 800}{5,42 + \log \Pi / 800}. \quad (10)$$

За даними W. Heuckelom, запропонована ним формула містила похибки за низьких значень пенетрації, тобто за температури, коли пружна поведінка переважала над в'язкою [19]. Використовуючи запропоновану залежність, а також через те, що за температури крихкості пенетрація дорівнює $1,25 \times 0,1$ мм, W. Heuckelom побудував графік BTDC (Bitumen Test Data Chart – Таблиця даних випробувань бітумів) майже всіх основних стандартних характеристик бітумів (температура крихкості, пенетрація за 25 °C, температур розм'якшеності, в'язкість за 60 °C та в'язкість за 135 °C), розглядаючи їх як функції від температури. Запропонований графік BTDC дозволяв за значеннями будь-яких двох стандартних показників визначати інші та встановити технологічні температури нагрівання бітумів для створення та ущільнення асфальтобетонних сумішей. Крім цього, відповідно до типу лінії було запропоновано класифікувати бітуми за 3 типами: S (дистиляційні бітуми різного походження з обмеженим вмістом парафінів), B (blown – окислені бітуми) та W (waxu – бітуми, що в своєму складі містять значну кількість парафінів). Кожна група бітумів визначається певною поведінкою. Особливістю бітумів класу B є невідповідність пенетрації за температури крихкості значенню 1,25 мм.

Графік BTDC використовувався виробниками для оцінювання стандартних показників якості в'язких нафтових дорожніх бітумів, але його не можна використовуватися для модифікованих бітумів, оскільки для них не дотримано залежності між в'язкістю, пенетрацією та температурою розм'якшеності [20].

На початку 70-х років минулого століття H. J. Fromm та W. A. Phang [21] зробили свій внесок у встановлення чисельного взає-

мозв'язку між пенетрацією та в'язкістю, що визначена за швидкості $0,05 \text{ c}^{-1}$, запропонувавши формулу

$$\eta = \frac{7,75 \cdot 10^9}{\Pi^2}, \quad (11)$$

у випадку визначення в'язкості за рівнозсувної швидкості

$$\eta = \frac{1,85 \cdot 10^9}{\Pi^{2,198}}. \quad (12)$$

За даними розробників [21], ця формула забезпечувала розрахунок в'язкості з точністю 95 %, що спростував H. E. Schwyer [2], визначивши, що розрахунок в'язкості за формулою (11) дає похибку в 40 %.

Ще одну в'язкісно-пенетраційну залежність запропонував у 70-ті роки минулого століття S. C. Shah [4]:

$$\eta = \frac{1,72 \cdot 10^{10}}{\Pi^{2,09}}. \quad (13)$$

Згідно з даними розробника [4] запропонована ним формула дозволяє розраховувати в'язкість з точністю 95 %.

Майже в цей самий час японськими науковцями було запропоновано формулу, використовуючи яку, за даними її розробників, можна розрахувати значення в'язкості (у пуазах) [22]:

$$\eta = \frac{W \cdot g \cdot 10^4}{\pi \cdot \Pi^2} \cdot t \cdot \ln \frac{a}{b}, \quad (14)$$

де $g = 9,807 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння; Π – пенетрація, 0,1 мм; $\pi = 3,1416$ – математична константа; W – навантаження, г; t – час випробування, с; a – зовнішній радіус ємності, в якій здійснюється випробування пенетрації, см; b – радіус пенетраційної голки, см.

Особливістю запропонованої формули було врахування форми пенетраційної голки. Розробники стверджували, що за допомогою цієї формули можна з високою точністю визначати в'язкість у тому випадку, коли пенетрація перевищує $59 \times 0,1$ мм. Якщо пенетрація менше ніж $59 \times 0,1$ мм, необхідно під час випробування пенетрації збільшити час самого випробування або навантаження.

У 90-ті роки минулого століття M. W. Witczak запропонував прогностичну модель визначення комплексного (динаміч-

ного) модуля асфальтобетону [23], відповідно до якої можна розраховувати модуль асфальтобетону з огляду на його гранулометричний склад та в'язкість вихідного бітумного в'язучого.

Для розрахування в'язкості за значенням пенетрації в [24] запропоновано використувати формулу

$$\eta = \exp \left[\frac{\ln \left(\frac{2m_n g t_f}{\delta \pi x_f^2} \right) - 7,917}{0,87} \right], \quad (15)$$

де η – в'язкість, Па·с; $m_n = 0,1$ кг – вага пенетраційної голки; $g = 9,80655$ м/с² – прискорення сили тяжіння; $t_f = 5$ с – час вимірювання пенетрації; $\delta = 0,001$ м – діаметр пенетраційної голки; x_f – пенетрація бітумного в'язучого, м.

Для визначення пенетрації за визначеними значенням в'язкості можна скористатися формулою

$$x_f = \sqrt{\frac{2m_n g t_f e^{0,173 \cdot \ln \eta - 7,917}}{\delta \pi \eta}}. \quad (16)$$

За даними розробників цієї формули, існує залежність між значеннями в'язкості, розрахованими за нею та визначеними експериментально, водночас коефіцієнт кореляції становить 0,993, а середньоквадратична похибка складає 1,49 % [24].

З огляду на те, що модель, яку запропонував М. W. Witczak, наведена в посібнику з проектування конструкцій дорожнього покриття AASHTO 2002 та використовується для проектування дорожніх одягів у системі Superpave, можна спрогнозувати, що визначення в'язкісно-пенетраційних залежностей бітумів є на сьогодні актуальною проблемою та в майбутньому буде предметом багатьох досліджень через нагальну необхідність визначення в'язкісно-пенетраційних залежностей для модифікованих різноманітними домішками бітумних в'язучих, оскільки немодифіковані бітуми для виготовлення асфальтобетонних сумішей, що використовуються для влаштування асфальтобетонних покриттів автомобільних доріг, нині майже не використовуються.

Висновки

Аналіз літературних джерел демонструє актуальність проблеми визначення значень в'язкості бітумних в'язучих розрахунковим методом, ґрунтуючись на експериментально визначених значеннях пенетрації. Поясненням цього є те, що, незважаючи на можливість сучасних методів оцінювання якості бітумних в'язучих експериментально встановлювати з великою точністю значення реологічних показників якості, визначення цих показників потребує певного часу та наявності доволі складного обладнання. Водночас для потреб виробничників та проектувальників доволі часто можна розрахувати ці значення з допустимою похибкою. Ще більш актуальним у сучасних умовах є проблема розрахування в'язкості за значенням пенетрації через використання, замість немодифікованих бітумів, модифікованих різноманітними домішками, для яких визначені залежності не є дієвими.

Література

1. Welborn J. Y. State of the Art in Asphalt Pavement Specification, Report № FHWA/RD-84/075. Federal Highway Administration, Office of Engineering and Highway Operations, Research and Development. Washington, DC, 1984. 184 p.
2. Schwyer H. E., Davis R. L. Asphalt rheology in the near-transition temperature range. *Highway Research Record*. 1973. Т. 468. Р. 1–15.
3. 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.
4. Field evaluation of viscosity and penetration-graded asphalt cements: asphalt cement consistency study / S. C. Shah et al. Louisiana. Department of Highways. Research and Development Section, Research Report № 107. 1977. 60 p.
5. The Rheology of Asphalt. II. Flow Characteristics of Asphalt / F. H. Gaskins, J. G. Brodnyan, W. Philippoff, E. Thelen. *Transactions of the Society of Rheology*, 1960. 4(1). Р. 265–278.
6. Traxler R. A review of the rheology of bituminous materials. *Journal of Colloid Science*, 1947. 2(1). Р. 49–68.
7. Saal R. N. J., De Bataafsche N. V. Viskosität und verwandte Eigenschaften von Asphaltbitumen und ihre Bestimmung. *Tm – Technisches Messen*, 1935. Р. 49–60.
8. Hoiberg A. J. Bituminous materials: asphalts, tars and pitches. Volume 1. Interscience Publishers. New York. 1964. 248 p.
9. Lesueur D. The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in Col-*

loid and Interface Science, 2009. 145(1–2). P. 42–82.

10. 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. T. 76. №. 1. P. 95–111.
11. Rigden P. J., Lee A. R. The Brittle fracture of tars and bitumens. *Journal of Applied Chemistry*. 1953. Vol. 3. P. 62–70.
12. Hunter R. N., Self A., Read J. *The Shell Bitumen Handbook*. Sixth edition. London: ICE Publishing, 2015. 780 p.
13. Traxler R. N., Pittman C. U., Burns F. B. Rheological Properties of Asphalt II. Discussion of Penetration – Viscosity Relationships. *Physics*. 1935. 6(2). P. 58–60.
14. Traxler R. N. A review of the rheology of bituminous materials. *Journal of Colloid Science*. 1947. T. 2. №. 1. P. 49–68.
15. Rhodes E. O., Volkmann E. W. The use of the ASTM Penetration equipment for estimating the viscosities of materials of high consistency. *Journal of Applied Physics*. 1937. T. 8. №. 7. P. 492–495.
16. Traxler R. N., Moffatt L. R. Flow in Asphalts. *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*. 1938. T. 10. №. 4. P. 188–191.
17. Van Poel C. D. A general system describing the visco-elastic properties of bitumens and its relation to routine test data. *Journal of applied chemistry*. 1954. T. 4. №. 5. P. 221–236.
18. Carre G., Laurent D. The Relationship Between the Penetration and Viscosity of Bitumens. *Association Francais des Techniciens du Petrole*. 1963. Bull. 157. P. 3–54.
19. Heuckelom W. An improved method of characterizing asphaltic bitumens with the air of their mechanical properties. *Association of Asphalt Paving Technologists Proc*. 1973. T. 42. P. 67–98.
20. Airey G. D. Viscosity-Temperature Effects of Polymer Modification as Depicted by Heuckelom's Bitumen Test Data Chart. *International Journal of Pavement Engineering*. 2001. T. 2. №. 4. P. 223–242.
21. Fromm H. J., Phang W. A. Temperature Susceptibility Control in Asphalt. *Specification, HRR*. 1971. №. 350. P. 30–45.
22. Sakanoue S. A Study on Relationship of Penetration Values to Absolute Viscosity of Petroleum Asphalt. *Journal of The Japan Petroleum Institute*. 1971. T. 14. №. 4. P. 261–264.
23. Witczak M. W., Fonseca O. A. Revised predictive model for dynamic (complex) modulus of asphalt mixtures. *Transportation Research Record*. 1996. T. 1540. №. 1. P. 15–23.
24. Rasmussen R. O., Lytton R. L., Chang G. K. Method to Predict Temperature Susceptibility of an Asphalt Binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2002. 14(3), P. 246–252.

References

1. Welborn J. Y. State of the Art in Asphalt Pavement Specification, Report №. FHWA/RD-84/075. Federal Highway Administration, Office of Engineering and Highway Operations, Research and Development. Washington, DC, 1984. 184 p.
2. Schweyer H. E., Davis R. L. Asphalt rheology in the near-transition temperature range. *Highway Research Record*. 1973. T. 468. P. 1–15.
3. 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.
4. Field evaluation of viscosity and penetration-graded asphalt cements: asphalt cement consistency study / S. C. Shah et al. Louisiana. Department of Highways. Research and Development Section, Research Report № 107. 1977. 60 p.
5. The Rheology of Asphalt. II. Flow Characteristics of Asphalt / F. H. Gaskins, J. G. Brodnyan, W. Philippoff, E. Thelen. *Transactions of the Society of Rheology*, 1960. 4(1). P. 265–278.
6. Traxler R. A review of the rheology of bituminous materials. *Journal of Colloid Science*, 1947. 2(1). P. 49–68.
7. Saal R. N. J., De Bataafsche N. V. Viskosität und verwandte Eigenschaften von Asphaltbitumen und ihre Bestimmung. *Tm – Technisches Messen*, 1935. P. 49–60.
8. Hoiberg A. J. Bituminous materials: asphalts, tars and pitches. Volume 1. Interscience Publishers. New York. 1964. 248 p.
9. Lesueur D. The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2009. 145(1–2). P. 42–82.
10. 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. T. 76. №. 1. P. 95–111.
11. Rigden P. J., Lee A. R. The Brittle fracture of tars and bitumens. *Journal of Applied Chemistry*. 1953. Vol. 3. P. 62–70.
12. Hunter R. N., Self A., Read J. *The Shell Bitumen Handbook*. Sixth edition. London: ICE Publishing, 2015. 780 p.
13. Traxler R. N., Pittman C. U., Burns F. B. Rheological Properties of Asphalt II. Discussion of Penetration – Viscosity Relationships. *Physics*. 1935. 6(2). P. 58–60.
14. Traxler R. N. A review of the rheology of bituminous materials. *Journal of Colloid Science*. 1947. T. 2. №. 1. P. 49–68.
15. Rhodes E. O., Volkmann E. W. The use of the ASTM Penetration equipment for estimating the viscosities of materials of high consistency. *Journal of Applied Physics*. 1937. T. 8. №. 7. P. 492–495.

16. Traxler R. N., Moffatt L. R. Flow in Asphalts. *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*. 1938. T. 10. №. 4. P. 188–191.
17. Van Poel C. D. A general system describing the visco-elastic properties of bitumens and its relation to routine test data. *Journal of applied chemistry*. 1954. T. 4. №. 5. P. 221–236.
18. Carre G., Laurent D. The Relationship Between the Penetration and Viscosity of Bitumens. *Association Francais des Techniciens du Petrole*. 1963. Bull. 157. P. 3–54.
19. Heuckelom W. An improved method of characterizing asphaltic bitumens with the air of their mechanical properties. *Association of Asphalt Paving Technologists Proc.* 1973. T. 42. P. 67–98.
20. Airey G. D. Viscosity-Temperature Effects of Polymer Modification as Depicted by Heuckelom's Bitumen Test Data Chart. *International Journal of Pavement Engineering*. 2001. T. 2. №. 4. P. 223–242.
21. Fromm H. J., Phang W. A. Temperature Susceptibility Control in Asphalt. *Specification, HRR*. 1971. №. 350. P. 30–45.
22. Sakanoue S. A Study on Relationship of Penetration Values to Absolute Viscosity of Petroleum Asphalt. *Journal of The Japan Petroleum Institute*. 1971. T. 14. №. 4. P. 261–264.
23. Witczak M. W., Fonseca O. A. Revised predictive model for dynamic (complex) modulus of asphalt mixtures. *Transportation Research Record*. 1996. T. 1540. №. 1. P. 15–23.
24. Rasmussen R. O., Lytton R. L., Chang G. K. Method to Predict Temperature Susceptibility of an Asphalt Binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2002. 14(3), P. 246–252.

Пиріг 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.

Review of approaches to determining the viscosity-penetration dependence of bituminous binders

Abstract. Problem. The constant growth of load tension and traffic intensity on highways requires an increase in the quality and durability of asphalt concrete coatings. At present, conventional indicators for evaluating the quality of bituminous binders, such as penetration, softening temperature and brittleness, are still used in the vast majority of countries around the world. It is impossible to determine with the help of these indicators the characteristics necessary for

the design of road clothing. Taking this into account, at the beginning of the last century, some researchers took steps to establish the relationship between standardized quality indicators (penetration, softening temperature, brittleness temperature according to Fraas) with fundamental ones, in particular, toughness. **Goal.** The purpose of the work is to consider, based on literature data, approaches to determining the viscosity-penetration dependences of bituminous binders, which have been developed for almost a century. **Methodology.** In order to achieve the set goal, a search was made for literary sources devoted to the issues of viscosity calculation, a critical review of them was performed, and the criteria for their application were established. **Results.** In 1933, Saal R.N.J. and Koens J. were the first to propose a formula that made it possible to calculate viscosity based on the value of a standard indicator - penetration. This gave impetus to an almost age-old study in which scientists from different countries of the world participated. The purpose of this study was to develop a numerical method for determining viscosity based on the value of penetration. Due to the fact that the quality of bitumen significantly depends on the raw materials from which they are made, manufacturing technology, group composition, structural and rheological type, for almost 90 years it was not possible to develop a dependence that would link the fundamental indicator with high accuracy (viscosity) with standardized conditional (penetration). Despite this, the formulas proposed by various researchers formed the basis of two widespread road bitumen classification systems and the nomogram for determining bitumen hardness, which was used by designers of various countries of the world for 40 years. The analysis of these literary sources shows the persistent interest of researchers and manufacturers in the possibility of determining the viscosity values of bituminous binders by the calculation method, based on experimentally determined values of penetration. **Practical value.** It has been established that currently the task of calculating the viscosity based on the penetration value is becoming particularly relevant due to the fact that in modern conditions unmodified bitumens are being replaced by bitumens modified with various additives, for which the previously established dependencies are not valid.

Keywords: bitumen, penetration, viscosity, 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.