



УДК 625.85

• © В.О. Золотарьов, докт. техн. наук, професор (ХНАДУ)

ГЛИБИНА ПРОНИКНЕННЯ ГОЛКИ ЯК ХАРАКТЕРИСТИКА ОПОРУ БІТУМУ ЗСУВУ

Анотація. З використанням літературних, експериментальних і розрахункових даних показано лінійний зв'язок напружень зсуву, які відповідають значенням пенетрації, з напруженнями, що виникають при когезійному зсуві бітумів, що свідчить про доцільність трактування пенетрації як міцнісної, а не в'язкісної характеристики.

Ключові слова: бітум, пенетрація, когезія, напруження зсуву.

Аннотация. С использованием литературных, экспериментальных и расчетных данных показана линейная связь напряжений сдвига, соответствующих значениям пенетрации, с напряжениями, возникающими при когезионном смещении битумов, что свидетельствует о целесообразности трактовки пенетрации как прочностной, а не вязкостной характеристики.

Ключевые слова: битум, пенетрация, когезия, напряжение смещения.

Annotation. Using literature, experimental and calculated data show a linear relationship shear stress, corresponding to the value of penetration, with tensions arising from the shift cohesion bitumen, indicating the feasibility of treatment penetration as a strength, not viscosity characteristics.

Keywords: bitumen, penetration, cohesion, shear stress.

Метод і прилад визначення глибини проникнення голки в бітуми (пенетрації), застосовуються в дорожньої практиці з часів Г. Боуена, який запропонував у 1889 році перший пенетрометр [1] для характеристики їх умовної в'язкості. З тих пір показники пенетрації у всьому світі є базовими для поділу дорожніх бітумів за марками в діапазоні від 20·0,1 мм до 300·0,1 мм. Наміри маркувати дорожні бітуми за істиною в'язкістю [2, 3] не отримали поширення з багатьох причин, головною з яких є складність визначення в'язкості із-за нелінійності в області температур навколишнього повітря залежностей напруження-швидкість деформації, тобто із-за аномальної течії бітумів. Досвід європейської стандартизації показав, що це доцільно лише в разі

дуже рідких бітумів, для яких кінематична в'язкість при 60 °С знаходиться в межах від $1 \cdot 10^3$ мм²/с до $1,6 \cdot 10^4$ мм²/с [4].

За довгі роки існування методу було зроблено безліч спроб надати пенетрації фундаментальний сенс шляхом перерахунку її значення в істину в'язкість. У всіх випадках збіг результатів розрахунку з експериментальними даними був тим кращим, чим більше бітуми при температурі 25 °С за своєї реологічної поведінки наближалися до ньютонівських систем [5–8].

Такий тип поведінки найбільш властивий дистиляційним бітумам зі структурою “золь”. Перехід до бітумів зі структурою “гель” супроводжується проявом величезною аномалії в'язкості.

Таблиця 1

Вплив типу та марки бітуму на характер його течії

Показник	Типи і penetрація у 0,1 мм			Марки і penetрація у 0,1 мм			
	1 гель 82	2 золь 80	3 золь-гель 82	БНД 130/200 170	БНД 90/130 120	БНД 60/90 72	БНД 40/60 57
Індекс penetрації	2,7	- 1,0	0,4	- 0,4	- 0,5	- 0,7	- 0,2
Коефіцієнт аномалії в'язкості	0,35	0,83	0,58	0,77	0,68	0,58	0,52

Експериментальні дослідження [9] реологічної поведінки бітумів різних структурних типів у широкому (шляхом використання, так як і у [5], декількох приладів для визначення в'язкості) діапазоні швидкостей зсуву показали, що бітум зі структурою "гель" виявляє ньютонівський тип течії в області швидкостей, менших $1 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, а його коефіцієнт аномалії в'язкості досягає значення 0,35. Бітум із структурою "золь" веде себе як ньютонівська рідина до швидкості зсуву, близькій $1 \cdot 10^1 \text{ с}^{-1}$. При цьому його коефіцієнт аномалії в'язкості знаходиться в межах 0,83–0,85. Така ж тенденція, хоча й меншим чином, виявляється при переході від бітуму з відносно низьким значенням penetрації до бітуму з великим її значенням (табл. 1).

Характерною особливістю кривих течії бітумів марки БНД 60/90 різних структурних типів є те, що вони перетинаються в зоні швидкостей зсуву, близької до $0,39 \text{ с}^{-1}$ [9]. Звідси випливає, що бітуми з близькою penetрацією, але різного структурного типу мають однакову в'язкість тільки в одній точці з характерною для цієї penetрації швидкістю зсуву. Нижче цієї швидкості в'язкість таких бітумів може відрізнитися у 400 разів, а при більш високих швидкостях вона може відрізнитися майже у 250 разів. Причому в області високих швидкостей зсуву в'язкість бітуму типу "гель" набагато менша, ніж бітуму "золь", тоді як при низьких швидкостях зсуву навпаки, тобто відбувається інверсія кривих течії.

Наявність еквіпенетраційних швидкостей зсуву в бітумів різних структурних типів у широкому діапазоні penetрацій наведено у фундаментальній роботі [7], яка отримала у 1962 році премію Французької Асоціації в області нафтових технологій. У [7] пошук співвідношення між penetрацією і в'язкістю бітумів ґрунтувався на: врахуванні характеру занурення обох складових частин голки – конусної та циліндричної; припущенні про неможливість прослизання бітуму уздовж голки; врахування залежності опору занурення голки від глибини. В основу роботи [7] покладені експериментальні дані з вивчення семи серій з 22 бітумів. У кожній із серій було 2–4 бітуми різного структурного типу з практично рівною penetрацією. Індекс penetрації бітумів у серіях коливався

від - 1,1 до + 4,3. Еквіпенетраційні швидкості зсуву зміщалися в бік збільшення швидкості у міру підвищення penetрації бітумів у кожній із серій. Із цього випливає, що справжня в'язкість бітумів різної penetрації, яку розраховують за будь-якої із запропонованих раніше формул, відноситься до випробувань із різними швидкостями зсуву, яка при переході від бітумів з penetрацією 23·0,1 мм до penetрації 200·0,1 мм збільшується майже у 9 разів.

Незважаючи на велику вибірку бітумів і паралельне визначення на одних і тих же об'єктах penetрації і в'язкості [7], розбіжність між розрахунками і експериментальними значеннями в'язкості була на рівні 30 %. Можна припустити, що однією з причин цього є різний характер виходу на режим встановленої течії бітумів "гель", "золь-гель" і "золь" (рис. 1). Межа зсувної міцності інтенсивно збільшується при переході від бітуму типу "золь" до типу "гель" [9]. Такі особливості деформування бітумів не можуть бути виявлені при фіксованому часі зануренні голки та враховані запропонованими у [7] емпіричними формулами.

У той же час, залежність швидкості зсуву від penetрації, що встановлена у [7], дозволила Ж. Карру і Д. Лоренту запропонувати формулу:

$$\dot{\gamma}_{\text{ЕП}} = 1,44 \cdot 10^{-3} P^{1,04}, \quad (1)$$

де $\dot{\gamma}_{\text{ЕП}}$ – еквіпенетраційна швидкість зсуву;
 P – penetрація.

Метою цієї роботи є встановлення кількісного взаємозв'язку між penetрацією і когезією бітумів при порівняльних умовах випробування. Вона ґрунтується на тому, що визначення penetрації шляхом занурення у в'язке середовище циліндра з конічним наконечником є типовим випробуванням з визначення опору зсуву в'язких систем зануренням у них індентора [10]. Для досягнення цієї мети необхідно було визначити: penetрацію і когезією бітумів за схемою одношарового зсуву; швидкості зсуву, що відповідають значенням penetрації ($\dot{\gamma}_{\text{ЕП}}$); напруження зсуву ($\tau_{\text{П}}$), що відповідають кожній penetрації при відповідній їй швидкості зсуву, а також привести значення напруження зсуву ($\tau_{1\text{П}}$) при швидкості

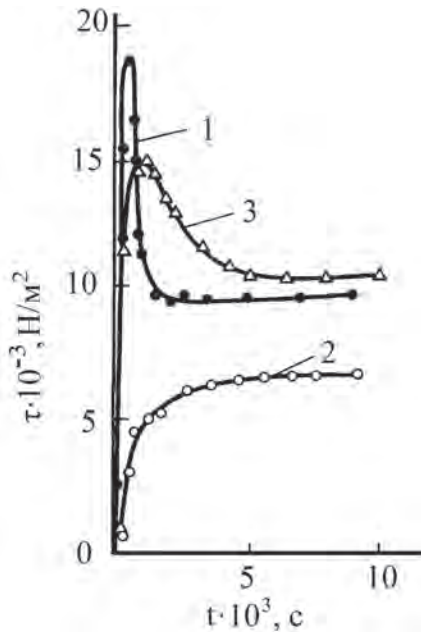
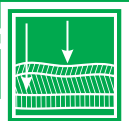


Рис. 1. Кінетика виходу напружень зсуву на сталий режим течії при 25 °С і швидкості зсуву 1,05 с⁻¹. Цифри на кривих відповідають типу та індексу бітумів (табл. 1)

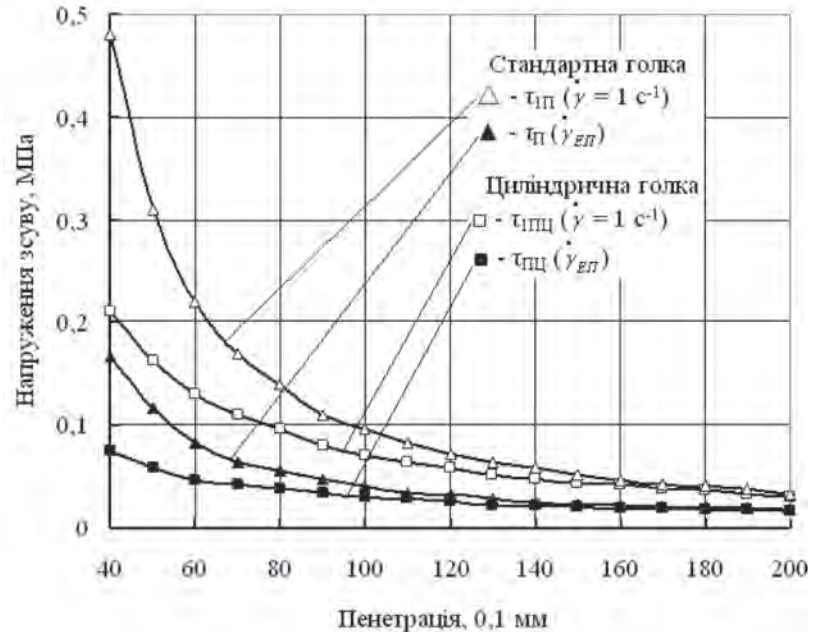


Рис. 2. Залежності (▲; △) напруження зсуву (τ_{II}) і (τ_{III}) від пенетрації стандартної голки при еквіпенетраційних швидкостях ($\dot{\gamma}_{EP}$) і приведених до $\dot{\gamma} = 1 \text{ с}^{-1}$ швидкостях зсуву; те ж (■; □) для циліндричної голки

пенетрації $\dot{\gamma}_{EP}$ до швидкості зсуву ($\dot{\gamma} = 1 \text{ с}^{-1}$), прийнятій для визначення когезії [11].

Визначення τ_{II} виконували за формулами, що запропоновані у [7]. При цьому, враховувалося, що до пенетрації 54·0,1 мм у бітум занурюється конус висотою 0,54 см з плоским торцем діаметром 0,015 см. Вище цієї пенетрації в бітум занурюється циліндр діаметром 0,1 см.

Згідно з [7] напруження τ_{II} для конусної частини може бути визначене за формулою:

$$\tau_{II} = \frac{3,95 \cdot 10^2}{(P^2 + 19P)} \quad (2)$$

Для пенетрації більше 54·0,1 мм напруження τ_{II} визначають як суму напружень, що виникають при зануренні конуса і циліндра за формулою:

$$\tau_{II} = \frac{3,12}{(P - 22,88)} \quad (3)$$

Результати розрахунків наведені у табл. 2 і на рис. 2. Із цих даних видно, що зі збільшенням пенетрації, в області малих її значень напруження τ_{II} різко зростають. Із зростанням пенетрації до 200·0,1 мм і вище спостерігається плавне зниження напруження (τ_{II}) і його асимптотичне наближення до осі напружень.

Приведення кожного τ_{II} або τ_{III} до швидкості зсуву $\dot{\gamma}$, що дорівнює 1 с⁻¹, здійснювали згідно з відомим співвідношенням напруження зсуву та швидкості деформування:

$$\tau_{III} = \tau_{II} \cdot \dot{\gamma}_{II}^{-m} \quad (4)$$

де τ_{II} – напруження зсуву, приведені до швидкості 1 с⁻¹;

m – коефіцієнт пластичності, що характеризує зміну напружень із зростанням швидкості зсуву.

Коефіцієнти пластичності, які використовували для приведення опорів зсуву, що відповідають кожній пенетрації, до швидкості 1 с⁻¹, брали з роботи [11], у якій визначені швидкісні залежності когезії бітумів різних структурних типів і марок. Отримані результати (табл. 2, рис. 2) показують, що у цьому випадку між пенетрацією і напруженням (τ_{III}) також немає лінійної залежності. Різке наростання напруження зсуву як еквіпенетраційних, так і приведених до швидкості 1 с⁻¹ починається від пенетрації близької до 75·0,1 мм. Так, перехід від пенетрації 75·0,1 мм до пенетрації 40·0,1 мм супроводжується зростанням еквіпенетраційного напруження (τ_{II}) у 2,8 рази, тоді як пенетрація змінюється у 1,9 рази, зведене напруження (τ_{III}) при цьому змінюється відповідно у 3,3 рази.

Зростання еквіпенетраційного напруження в діапазоні пенетрації від 40·0,1 мм до 75·0,1 мм на один градус пенетрації становить 0,030 МПа, а в діапазоні пенетрації від 75·0,1 мм до 200·0,1 мм воно дорівнює 0,0034. Зростання приведенного до швидкості 1 с⁻¹ напруження зсуву в діапазоні пенетрації від 40·0,1 мм до 75·0,1 мм на один градус пенетрації становить 0,096 МПа, а в діапазоні від 75·0,1 мм до 200·0,1 мм – 0,0012 МПа. Ці відмінності

Таблиця 2

Напружено-деформаційні характеристики проникання в бітум стандартної та циліндричної голки

Пенетрація, 0,1 мм	Стандартна голка			Циліндрична голка	
	τ_{II} , МПа	$\dot{\gamma}_{EII}$, с ⁻¹	τ_{III} , МПа	τ_{III} , МПа	τ_{III} , МПа
30	0,2540	0,051	0,770	0,0960	0,2920
40	0,1670	0,066	0,480	0,0730	0,2110
50	0,1140	0,084	0,314	0,0590	0,1630
60	0,0840	0,102	0,220	0,0490	0,1300
70	0,0660	0,119	0,170	0,0430	0,1120
80	0,0550	0,137	0,139	0,0380	0,0960
90	0,0460	0,155	0,112	0,0340	0,0820
100	0,0400	0,173	0,096	0,0300	0,0720
110	0,0350	0,191	0,082	0,0280	0,0650
120	0,0320	0,209	0,074	0,0250	0,0590
130	0,0290	0,227	0,065	0,0230	0,0530
140	0,0260	0,246	0,057	0,0220	0,0490
150	0,0240	0,264	0,052	0,0200	0,0450
160	0,0220	0,282	0,048	0,0190	0,0410
170	0,0210	0,300	0,044	0,0180	0,0380
180	0,0197	0,319	0,041	0,0170	0,0350
190	0,0185	0,337	0,038	0,0162	0,0330
200	0,0175	0,355	0,035	0,0154	0,0310
800	0,0040	1,150	0,004	0,0039	0,0039

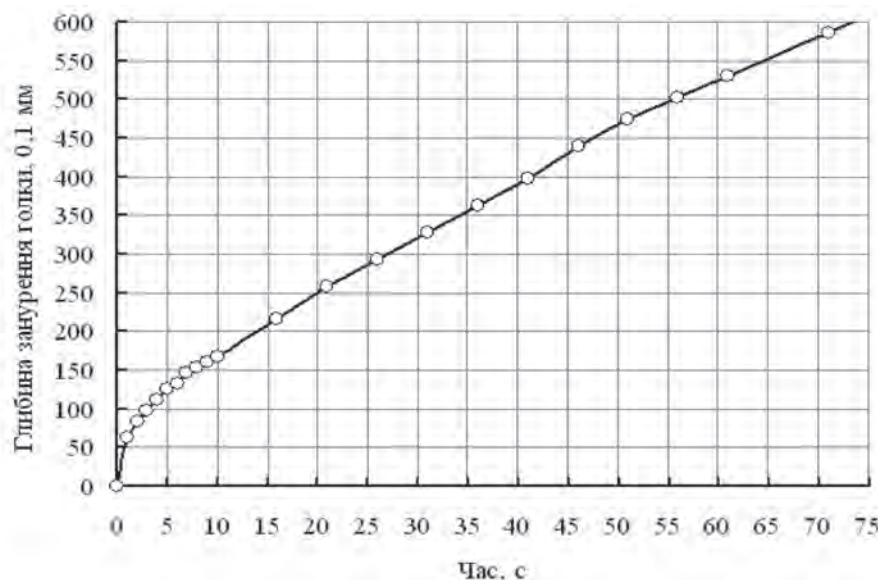


Рис. 3. Занурення голки пенетрометра у часі

обумовлені тим, що кінчик голки має форму конуса, і, можливо, нерівномірністю швидкості її занурення (рис. 3).

Звідси випливає, що прогноз технічних властивостей асфальтобетону на бітумах різних марок за співвідношенням значень пенетрації і за міцнісними властивостями бітуму буде різним. Очевидно,

що об'єктивний прогноз може бути зроблений на основі міцнісної, зокрема, зсувної характеристики бітуму. В якості такої характеристики може бути використано еквіпенетраційне зсувне напруження (τ_n) за умови, що воно збігається з когезією бітуму. Коректне порівняння цих характеристик може бути забезпечене при однакових деформаційних умовах.

Для цього, насамперед, необхідно усунути відмінність напружено-деформаційного стану кінцевої (конусної) і циліндричної частини голки. Одним з варіантів вирішення цієї проблеми може бути використання цільної циліндричної голки з плоским торцем.

У цьому випадку площу циліндричної поверхні зсуву по всій довжині голки можна визначити за формулою:

$$S_y = 2\pi R \cdot P^{-2} = 3,14 \cdot P \cdot 10^{-3} \quad (5)$$

Крім того, опір зануренню циліндра чинить поверхня торця голки. Цю поверхню можна додати до поверхні циліндра, допускаючи в першому наближенні, що здатність бітуму до течії у великому об'ємі однакова при удавлюванні та зсуві. Тоді загальна формула площі зсуву буде:

$$S_0 = 3,14(P \cdot 10^{-3} + 0,0025) \quad (6)$$

Опір проникненню циліндра (τ_n) при цьому дорівнює:

$$\tau_{III} = \frac{3,12 \cdot 10^{-3}}{P10^{-3} + 2,5 \cdot 10^{-3}} \quad (7)$$

Результати розрахунку напруження зсуву (τ_{III}) при зануренні такої голки наведені у табл. 1 і на рис. 2. Вони показують що співвідношення між значеннями напружень в діапазоні пенетрації від 40·0,1 мм до 75·0,1 мм при еквіпенетраційних швидкостях зсуву дорівнює 1,8, а у разі приведення напружень до швидкості 1 с⁻¹ – 2,0. Водночас для стандартної голки ці співвідношення відповідно рівні 2,8 і 3,0. Таким чином досягається істотне виположування залежностей напруження – пенетрація. Співвідношення між розрахунковими

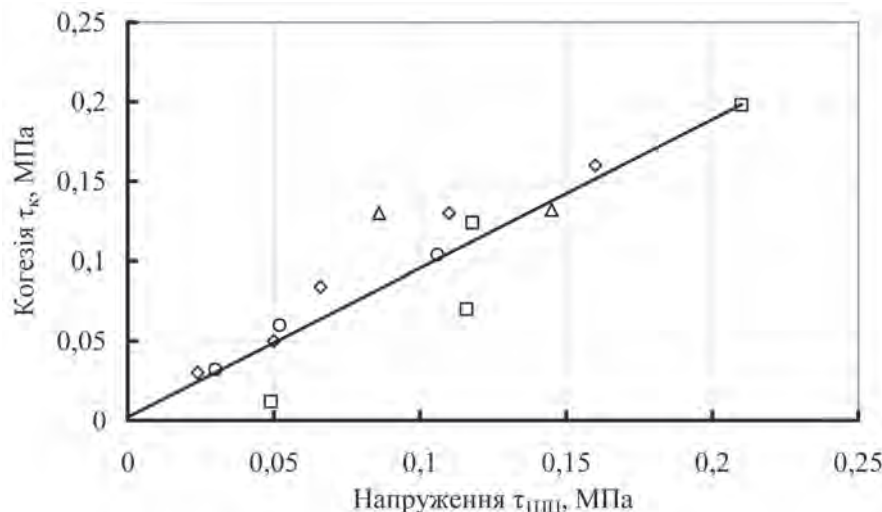
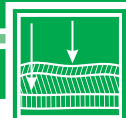


Рис. 4. Взаємозв'язок між когезією (τ_c) і зведеними напруженнями зсуву ($\tau_{шц}$) для пенетрації циліндричної голки

значеннями напружень для двох видів голок дуже близькі до співвідношення значень пенетрації, отриманих при випробуваннях стандартною і циліндричною голками. Так, співвідношення значень пенетрації (0,1 мм) випробуваних трьох бітумів дорівнює: 1,76 (значення пенетрації відповідно $60 \cdot 0,1$ мм та $34 \cdot 0,1$ мм); 1,53 ($75 \cdot 0,1$ мм та $49 \cdot 0,1$ мм), 1,17 ($136 \cdot 0,1$ мм та $116 \cdot 0,1$ мм). Співвідношення ж відповідних їм еквіпенетраційних напружень дорівнює: 1,70; 1,49; 1,20. Характерно також, що напруження зсуву при $800 \cdot 0,1$ мм практично однакове для обох видів голок. Крім того, швидкість зсуву при цій пенетрації близька до 1 с^{-1} .

Результати порівнянь характеру пенетраційних залежностей напружень зсуву, зведених до швидкості одноплосинного зсуву бітуму в шарі товщиною 200 мкм при температурі $25 \text{ }^\circ\text{C}$ й аналіз накопичених даних із когезії різних бітумів дають підставу порівнювати когезійну міцність з напруженням зсуву, яке розраховане за пенетрації циліндричної голки (рис. 4).

З даних, які наведені на рис. 4 видно, що в діапазоні пенетрації від $40 \cdot 0,1$ мм до $200 \cdot 0,1$ мм існує достатньо надійна лінійна залежність між напруженням, що виникають в бітумі при зануренні в нього голки і зсувом в тонкому шарі при однаковій швидкості.

Висновки

Лінійна залежність між напруженням, що виникають в бітумі при зануренні в нього голки і зсувом в тонкому шарі при однаковій швидкості доводить, що пенетрація є не в'язкісною, а міцнісною характеристикою бітуму. Більш того, вона може розглядатися як його фундаментальна реологічна характеристика, у чому сумніваються

розробники SHRP Superpave. Для того, щоб значення пенетрації можна було використувати як об'єктивний критерій оцінки якості бітуму, необхідно представляти її не в розмірності глибини проникнення голки, а в розмірності напруження зсуву. Значення напруження зсуву можуть бути розраховані за отриманими у [7] і запропонованими тут формулами. У перспективі напруження зсуву при пенетрації можуть бути використані для маркування бітуму. Такий підхід дозволить об'єктивно передбачати механічні властивості асфальтобетонів за пенетраційнозсувним напруженням.

ЛІТЕРАТУРА

1. Bowen H.C. Patented № 494, 974 USA. Apparatures for determining viscosity // dated 1893.
2. Duthie J.L. Proposed bitumen specifications derived from fundamental parameters // Presented at the Annual general Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologist held at Cleveland, Ohio: 1972.
3. Маневич Р.М., Проскуринов В.А., Розенталь Д.А. О возможности использования вязкости в качестве критерия марки нефтяного битума в процессе окисления // Окисление углеводородов, их производных и битумов. – 1972. – Вып. 10. – С. 51–57.
4. EN 12591:2008. Bitumes et liants bitumineux. – Specification des bitumes routiers.
5. Трекслер Р.Н. Реология и реологические модификаторы: структура и время // В кн. Битумные материалы (асфальты, смолы, пеки) / Под ред. А. Дж. Хойберга. – М.: Химия, 1974. – С. 104–153.
6. Duriez M., Arrambid J. Nouveau traite des materiaux de construction. – Paris.: Dumod, 1962. – V. 3. – 1543 p.
7. Carre G., Laurent D. Relation entre penetration et la viscosite des bitumes // Bulletin de l'Association francaise des Techniciens du petrol. – № 15. – 1963. – 37 p.
8. Радовский Б.С. IV-й Европейский Симпозиум по битуму и асфальтобетону // Автомобильные дороги. – 1990. – № 7. – С. 15–16.
9. Виноградов Г.В., Золотарев В.А., Веребская Е.А., Бодан А.Н., Оришин И.П. Поведение битумов разных структурно-реологических типов в режимах непрерывного деформирования // Коллоидный журнал – 1978. – № 4. – С. 1077–1084.
10. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения // Пер.с англ. – СПб.: Профессия, 2007. – 560 с.
11. Маляр В.В. Закономерности механических свойств нефтяных дорожных битумов при стекловании // Автореферат дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. – Харьков, 1993. – 22 с.