

Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Міністерства освіти і науки України

Національний транспортний університет
Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОПИНЕЦЬ ІВАН ВІКТОРОВИЧ

УДК 625.85

ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО
ПОКРИТТЯ ШЛЯХОМ ЗМЕНШЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО
СТАРІННЯ БІТУМІВ

05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми

Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів
мають посилання на відповідне джерело

 І. В. Копинець

Науковий керівник –

Золотарьов Віктор Олександрович
доктор технічних наук, професор

Ідентичність усіх примірників дисертації

Засвідчую
Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 26.059.02

 О.Ю. Усиченко



Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Копинець І. В. Підвищення довговічності асфальтобетонного покриття шляхом зменшення технологічного старіння бітумів. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.11 «Автомобільні шляхи та аеродроми» (192 – Будівництво та цивільна інженерія). – Національний транспортний університет, Київ, 2021.

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-практична задача, що полягає в підвищенні довговічності асфальтобетонного покриття.

Проведені теоретико-експериментальні дослідження дозволили встановити закономірності зміни властивостей бітумів під час технологічного старіння, які полягають у зміні маси, зменшенні пенетрації за температури 25 °С, зростанні температури розм'якшеності, температури крихкості та динамічної в'язкості за всіх температур. За результатами досліджень удосконалено метод визначення технологічних температур виробництва та ущільнення асфальтобетонних сумішей, що полягає у встановленні температури змішування бітуму з мінеральним матеріалом за температурно-в'язкістною залежністю вихідного бітуму з наступним встановленням температури ущільнення асфальтобетонних сумішей за температурно-в'язкістною залежністю бітуму зістареного за методом RTFOT за еквів'язкої температури.

Встановлено, що використання модифікуючих добавок на основі катіонних поверхнево-активних речовин та полімерів типу СБС, призводить до підвищення стійкості бітумів до технологічного старіння, що проявляється у зменшенні зміни маси, зменшенні зміни температури розм'якшеності, підвищенні залишкової пенетрації і зменшенні індексів

старіння, та, відповідно, збереженню властивостей асфальтобетонного покриття під час експлуатації, тим самим збільшуючи його довговічність.

Зменшення технологічного старіння бітумів позитивно позначається на довговічності асфальтобетонів. За розрахункової температури 10 °С модуль пружності асфальтобетону на звичайному бітумі є трохи вищим за модуль пружності асфальтобетонів на модифікованому бітумі. За низьких температур експлуатації модифіковані асфальтобетони є менш жорсткими, а за високих температур експлуатації у випадку застосування ПАР – ідентичний асфальтобетону на звичайному бітумі, а у випадку застосування полімеру – більш жорстким, що дозволяє прогнозувати більшу довговічність асфальтобетонного покриття при підвищенні стійкості бітумів до старіння.

Втомна довговічність асфальтобетону зростає при підвищенні стійкості бітуму до технологічного старіння. При цьому більш довговічним є асфальтобетон на бітумі, модифікованому полімером. Підвищена втомна довговічність модифікованого асфальтобетону зберігається під час експлуатаційного старіння, що свідчить про підвищення довговічності асфальтобетонного покриття в цілому.

Розроблені заходи з підвищення довговічності асфальтобетонного покриття, що включають вибір бітуму для виробництва асфальтобетонних сумішей з урахуванням його технологічного старіння, підвищення стійкості бітумів до технологічного старіння, в тому числі з використанням модифікуючих добавок, а також організаційні заходи щодо запобігання старінню бітумів під дією технологічних температур.

Ключові слова: асфальтобетонне покриття, бітум, втомна довговічність, зміна властивостей, модифікуючі добавки, старіння.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. V. Vyrozhemskyi, I. Kopynets, S. Kischynskyi, N. Bidnenko. Epoxy asphalt concrete is a perspective material for the construction of roads. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. [ISSN:1757-8981, E-ISSN:1757-899X] 236 (2017) 012022. (Scopus) DOI: 10.1088/1757-899X/236/1/012022.

Статті у фахових виданнях:

2. Ivan Kopynets, Oksana Sokolova, Iryna Gudyma, Alina Yunak Laboratory studies to reduce the technological aging of bitumen. *Дороги і мости*. Київ, 2018. Вип. 18. С. 107-118.

3. Кіщинський С. В., Копинець І. В., Соколов О. В. Використання енергозберігаючих добавок для зниження технологічних температур приготування асфальтобетонних сумішей. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Вип. 99. 2017. С. 49 – 57.

4. Кіщинський С. В., Копинець І. В. Вплив вмісту термоеластопластів на властивості та старіння бітумів різного виробництва. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. Випуск 79. 2017. С. 33 – 40.

5. Копинець І. В., Соколова О. Б., Соколов О. В., Юнак А. Л. Вплив добавок на основі синтетичних восків на експлуатаційні та технологічні властивості бітумів // *Дороги і мости*. – 2019. – Вип. 19-20. – С. 107-116.

6. Вирожемський В. К., Кіщинський С. В., Копинець І. В., Соколова О. Б., Гудима І. В., Юнак А. Л. Вплив технологічних температур

на зчеплюваність бітумів, модифікованих адгезійними добавками, з мінеральним матеріалом. *Автошляховик України*. № 2. 2018. С. 49 – 57.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

7. Копинець І. В. Стійкість окислених бітумів до термоокислювального старіння. *Дороги і мости*. 2014. № 14. С. 14 – 20.

8. Кіщинський С. В., Кириченко Л. Ф., Юнак А. Л., Копинець І. В., Гудима І. В. Моніторинг якості бітумів, що застосовуються в дорожньому будівництві України. *Дороги і мости*. 2014. № 14. С. 76 – 84.

9. Копинець І. В. Підвищення стійкості окислених бітумів до старіння шляхом їх компаундування з дистиляційними бітумами. *Автошляховик України*. № 5. 2015.

10. I. Kopynets. Research of changes in properties of bitumen during thermo-oxidative ageing. *Young researchers seminar 2015*. Rome. 2015.

11. Копинець І. В. Дослідження стійкості бітумів до термоокислювального старіння. *Науково-практична конференція з проектування та будівництва автомобільних доріг*. Київ. 2015.

12. Кіщинський С. В., Копинець І. В. Сучасні матеріали та технології при новому будівництві, реконструкції та ремонтах автомобільних доріг загального користування. Київ. 2016.

13. Кіщинський С. В., Копинець І. В. Вплив вмісту термоеластопластів на властивості та старіння бітумів різного виробництва. *Міжнародна наукова конференція «Бітумні в'язучі та асфальтобетони: досягнення та проблеми»*. Харків. 2017.

14. Кіщинський С. В., Копинець І. В. Проблеми якості бітумів та напрямки поліпшення їх властивостей. *Сучасні матеріали й технології для розвитку та утримання автомобільних доріг, Міжнародна виставка-форум «HEAVY DUTY/ВАЖКА ТЕХНІКА 2018»*. м. Київ. 2018.

15. Копинець І. В. Комплексна модифікація бітумів різними типами добавок. *Сучасні матеріали і технології будівництва, реконструкції та ремонтів автомобільних доріг, Міжнародна науково-практична конференція*. м. Вінниця. 2018.

16. Копинець І. В. Зменшення термоокислювального старіння бітумів під час виробництва асфальтобетонних сумішей шляхом використання енергозберігаючих добавок на основі поверхнево-активних речовин. *Модифікація бітумів та асфальтобетонів – ефективний напрямок підвищення довговічності автомобільних доріг. Науково-практичний семінар*. Київ. 2018.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

17. Золотарев В.А., Галкин А.В., Пыриг Я.И., Копинец И.В. Дистилляционные, окисленные битумы, битумы, модифицированные полимерами, и асфальтобетоны на их основе. *Автомобильные дороги и мосты*, № 2 (18), 2016.

18. Золотарев В.А., Копинец И.В. Сравнительное исследование окисленных и остаточных битумов в статическом и динамическом режимах старения. *Дороги и мосты*. 2017. № 35/1. С. 215 – 232.

ABSTRACT

Kopynets I. V. Increasing the durability of asphalt pavement by reducing the technological aging of bitumen. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.22.11 «Highways and Airfields». (192 – Construction and Civil Engineering). - National Transport University, Kyiv, 2021.

In the Thesis the relevant scientific and practical issue of increasing the durability of asphalt pavement is solved.

Conducted theoretical and experimental studies have established the patterns of changes in the bitumen properties during technological aging, which consist in changing the mass, reducing the penetration at 25 °C, increasing the softening point, brittleness temperature and dynamic viscosity at all temperatures. According to the research results, the method of determining the process temperatures of production and compaction of asphalt mixtures was improved. This method is establishing the mixing temperature of bitumen with aggregate by temperature-viscosity dependence of the source bitumen followed by establishing the compaction temperature of asphalt mixtures by the temperature-viscosity dependence of aged bitumen by RTFOT method at equivalent temperature.

It is established that the use of modifying additives based on cationic surfactants and polymers such as SBS leads to increasing the bitumen resistance to technological aging, which is manifested in reducing the change in mass, reducing the softening point, increasing the residual penetration and reducing the aging indexes, and, accordingly, preserving the properties of the asphalt pavement during operation, thereby increasing its durability.

Reducing the technological aging of bitumen has a positive impact on the durability of asphalt concrete. At a design temperature of 10 °C, the elasticity modulus of asphalt concrete on the source bitumen is slightly higher than the elasticity modulus of asphalt concrete on modified bitumen. At low operation temperatures, modified asphalt concretes are less rigid, and at high operation temperatures in the case of surfactants using – are identical to asphalt concrete on

the source bitumen; in the case of polymer using they are more rigid, which allows predicting higher durability of asphalt pavement at increasing the bitumen resistance to aging.

The fatigue life of asphalt concrete grows with increasing resistance of bitumen to technological aging. At the same time, asphalt concrete on the polymer modified bitumen is more durable. The increased fatigue life of the modified asphalt concrete is preserved during operational aging, which indicates an increase in the durability of the asphalt pavement as a whole.

Measures to increase the durability of asphalt pavement, including the choice of bitumen for the production of asphalt mixtures taking into account its technological aging, increasing the bitumen resistance to technological aging, including the use of modifying additives, as well as organizational measures to prevent bitumen aging under temperature were developed.

Keywords: asphalt pavement, bitumen, fatigue life, module of elasticity, change in properties, modifying additives, aging.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. V. Vyrozhemskyi, I. Kopynets, S. Kischynskyi, N. Bidnenko. Epoxy asphalt concrete is a perspective material for the construction of roads. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. [ISSN:1757-8981, E-ISSN:1757-899X] 236 (2017) 012022. (Scopus) DOI: 10.1088/1757-899X/236/1/012022.

Статті у фахових виданнях:

2. Ivan Kopynets, Oksana Sokolova, Iryna Gudyma, Alina Yunak Laboratory studies to reduce the technological aging of bitumen. *Дороги і мости*. Київ, 2018. Вип. 18. С. 107-118.

3. Кіщинський С. В., Копинець І. В., Соколов О. В. Використання енергозберігаючих добавок для зниження технологічних температур приготування асфальтобетонних сумішей. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Вип. 99. 2017. С. 49 – 57.

4. Кіщинський С. В., Копинець І. В. Вплив вмісту термоеластопластів на властивості та старіння бітумів різного виробництва. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. Випуск 79. 2017. С. 33 – 40.

5. Копинець І. В., Соколова О. Б., Соколов О. В., Юнак А. Л. Вплив добавок на основі синтетичних восків на експлуатаційні та технологічні властивості бітумів // *Дороги і мости*. – 2019. – Вип. 19-20. – С. 107-116.

6. Вирожемський В. К., Кіщинський С. В., Копинець І. В., Соколова О. Б., Гудима І. В., Юнак А. Л. Вплив технологічних температур на зчеплюваність бітумів, модифікованих адгезійними добавками, з мінеральним матеріалом. *Автошляховик України*. № 2. 2018. С. 49 – 57.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

7. Копинець І. В. Стійкість окислених бітумів до термоокислювального старіння. *Дороги і мости*. 2014. № 14. С. 14 – 20.

8. Кіщинський С. В., Кириченко Л. Ф., Юнак А. Л., Копинець І. В., Гудима І. В. Моніторинг якості бітумів, що застосовуються в дорожньому будівництві України. *Дороги і мости*. 2014. № 14. С. 76 – 84.

9. Копинець І. В. Підвищення стійкості окислених бітумів до старіння шляхом їх компаундування з дистиляційними бітумами. *Автошляховик України*. № 5. 2015.

10. I. Kopynets. Research of changes in properties of bitumen during thermo-oxidative ageing. *Young researchers seminar 2015*. Rome. 2015.

11. Копинець І. В. Дослідження стійкості бітумів до термоокислювального старіння. *Науково-практична конференція з проектування та будівництва автомобільних доріг*. Київ. 2015.

12. Кіщинський С. В., Копинець І. В. Сучасні матеріали та технології при новому будівництві, реконструкції та ремонтах автомобільних доріг загального користування. Київ. 2016.

13. Кіщинський С. В., Копинець І. В. Вплив вмісту термоеластопластів на властивості та старіння бітумів різного виробництва. *Міжнародна наукова конференція «Бітумні в'язучі та асфальтобетони: досягнення та проблеми»*. Харків. 2017.

14. Кіщинський С. В., Копинець І. В. Проблеми якості бітумів та напрямки поліпшення їх властивостей. *Сучасні матеріали й технології для розвитку та утримання автомобільних доріг, Міжнародна виставка-форум «HEAVY DUTY/ВАЖКА ТЕХНІКА 2018»*. м. Київ. 2018.

15. Копинець І. В. Комплексна модифікація бітумів різними типами добавок. *Сучасні матеріали і технології будівництва, реконструкції та ремонтів автомобільних доріг, Міжнародна науково-практична конференція*. м. Вінниця. 2018.

16. Копинець І. В. Зменшення термоокислювального старіння бітумів під час виробництва асфальтобетонних сумішей шляхом використання енергозберігаючих добавок на основі поверхнево-активних речовин. *Модифікація бітумів та асфальтобетонів – ефективний напрямок підвищення довговічності автомобільних доріг. Науково-практичний семінар*. Київ. 2018.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

17. Золотарев В.А., Галкин А.В., Пыриг Я.И., Копинец И.В. Дистилляционные, окисленные битумы, битумы, модифицированные полимерами, и асфальтобетоны на их основе. *Автомобильные дороги и мосты*, № 2 (18), 2016.

18. Золотарев В.А., Копинец И.В. Сравнительное исследование окисленных и остаточных битумов в статическом и динамическом режимах старения. *Дороги и мосты*. 2017. № 35/1. С. 215 – 232.

ЗМІСТ

	С
ВСТУП.....	14
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЩОДО ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ СТАРІННЯ НА ЯКІСТЬ БІТУМНИХ В'ЯЖУЧИХ ТА ДОВГОВІЧНІСТЬ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ.....	19
1.1 Існуючі уявлення про механізм старіння бітумів різних типів та консистенції під дією температурно-кисневих факторів.....	19
1.2 Існуючі методи та критерії оцінювання старіння бітумів та асфальтобетонів.....	24
1.3 Критерії, що характеризують втомну довговічність асфальтобетонного покриття.....	43
Висновки до розділу 1.....	51
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	52
Висновки до розділу 2.....	68
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ СТАРІННЯ БІТУМІВ, АСФАЛЬТОБЕТОННИХ СУМІШЕЙ ТА АСФАЛЬТОБЕТОНІВ.....	69
3.1 Об'єкти дослідження.....	69
3.2 Методи дослідження.....	75
3.3 Дослідження змін властивостей окиснених бітумів під час термоокиснювального старіння	85
3.4 Дослідження змін властивостей залишкових бітумів під час термоокиснювального старіння.....	91
3.5 Порівняльний аналіз зміни властивостей окиснених та залишкових бітумів.....	96
3.6 Оцінювання старіння бітумів за реологічними показниками.....	102
3.7 Вплив добавки на основі поверхнево-активних речовин на стійкість бітуму до технологічного старіння.....	107

3.8 Вплив полімеру типу термоеластопластів на стійкість бітуму до технологічного старіння.....	114
3.9 Оцінювання зміни властивостей асфальтобетонів під час старіння.....	118
3.10 Втомна довговічність асфальтобетонів.....	125
3.11 Встановлення впливу технологічного старіння бітуму на розрахункові модулі пружності асфальтобетону.....	128
Висновки до розділу 3.....	139
РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	141
4.1 Обґрунтування підвищення стійкості бітумів до технологічного старіння з метою підвищення довговічності асфальтобетонного покриття.....	141
4.2 Вибір бітумів для виробництва асфальтобетонних сумішей з урахуванням їх стійкості до дії технологічних температур.....	143
4.3 Поліпшення структури окиснених бітумів вітчизняного виробництва шляхом їх змішування з продуктами нафтопереробки.....	145
4.4 Використання модифікуючих добавок для підвищення довговічності асфальтобетонного покриття	145
4.5 Зниження технологічних температур виробництва та укладання асфальтобетонних сумішей.....	147
4.6 Організаційні заходи щодо запобігання старінню бітумів під дією технологічних температур.....	147
4.7 Порядок визначення технологічних температур виробництва та ущільнення асфальтобетонних сумішей.....	149
Висновки до розділу 4.....	151
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	152
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	155
ДОДАТОК А РОЗРОБЛЕНІ ДОКУМЕНТИ.....	174

ДОДАТОК Б ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРОБОК.....	180
ДОДАТОК В СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.....	185

ВСТУП

Актуальність роботи.

Довготривала робота нежорстких дорожніх одягів забезпечується збереженням стабільності їх основних фізико-механічних характеристик під дією різноманітних експлуатаційних навантажень та погодно-кліматичних умов. Основними факторами, що впливають на довговічність асфальтобетонних покриттів, за умови раціонального підбору складу асфальтобетону, є старіння та руйнування під дією води. Старіння бітуму проявляється в підвищенні його твердості. Старіння в першу чергу пов'язано з втратою летких компонентів та окисненням бітуму під час виробництва, транспортування і укладання асфальтобетонних сумішей (технологічне або короткострокове старіння) та з поступовим окисненням бітуму в уже влаштованому матеріалі в експлуатаційних умовах (експлуатаційне або довгострокове старіння). В обох випадках спостерігається твердіння бітуму та підвищення жорсткості асфальтобетону. На технологічній стадії головними чинниками старіння є кисень повітря і висока температура, що обумовлюють інтенсивні зміни властивостей в'язучого.

Зазвичай в результаті старіння бітум стає більш твердим та крихким, що на першому етапі супроводжується підвищенням несної здатності та стійкості дорожнього одягу до постійних деформацій, а потім до зниження деформативності дорожнього одягу, яке призводить до утворення низькотемпературних тріщин, тріщин від втоми та незворотного загального руйнування дорожнього покриття.

Виходячи з цього актуальність роботи полягає у вирішенні наступної науково-практичної задачі - підвищенні довговічності та запобігання руйнуванню асфальтобетонного покриття шляхом зменшення технологічного старіння бітумів, в тому числі з використанням різних типів модифікуючих добавок.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційні дослідження виконані відповідно до планів науково-дослідних та дослідно-конструкторський робіт Державного агентства автомобільних доріг України:

– тема № 104-14 «Провести дослідження та розробити пакет нормативних документів з підвищення стійкості бітумів та асфальтобетонів до дії технологічних температур» (№ державної реєстрації 0114U006231);

– тема № 107-14 «Провести дослідження та розробити національний стандарт на штучне старіння бітумів з ідентичним ступенем відповідності до EN 12607-1» (№ державної реєстрації 0114U006234).

Мета і задачі дослідження. Мета даної роботи полягає у встановленні закономірності зміни властивостей бітуму під час технологічного старіння та розроблення заходів з підвищення довговічності асфальтобетонного покриття.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання:**

- проаналізувати та встановити найбільш вагомі фактори старіння бітумів, вплив старіння на довговічність асфальтобетонного покриття, а також можливі напрямки підвищення стійкості до старіння;

- встановити закономірності зміни властивостей бітумів різних структурних типів під час термоокиснювального старіння;

- дослідити вплив модифікуючих добавок на стійкість бітумів до технологічного старіння;

- встановити вплив технологічного старіння на модулі пружності асфальтобетонів та їх втомну довговічність;

- розробити технології підвищення довговічності асфальтобетонного покриття шляхом зменшення технологічного старіння бітумів.

Об'єкт дослідження – фізико-хімічні процеси старіння бітумів і асфальтобетонних сумішей в процесі технологічного перероблення та їх

вплив на асфальтобетонні покриття під час експлуатації нежорсткого дорожнього одягу.

Предмет дослідження – довговічність асфальтобетонного покриття.

Методи дослідження: Використання стандартних (глибина проникності голки, температура розм'якшеності, розтяжність, температура крихкості, залишкова penetрація, зміна температури розм'якшеності, зміна маси) та реологічних (динамічна в'язкість, індекс старіння, когезія) показників якості бітумів для характеристики зміни їх властивостей при технологічному старінні, а також не стандартних методів оцінювання властивостей асфальтобетонів та моделювання методом W. Witchak.

Наукова новизна отриманих результатів.

- вперше встановлено закономірності зміни властивостей бітумів різних технологічних типів під впливом температури методом тонкої нерухомої плівки та методом тонкої оновлювальної плівки;

- одержав подальшого розвитку метод визначення температур початку та закінчення ущільнення асфальтобетонних сумішей на основі зміни в'язкості бітумів під час прогрівання за методом тонкої оновлювальної плівки за еквів'язкої температури;

- розроблено технологічні способи підвищення довговічності асфальтобетонного покриття за рахунок регулювання властивостей бітумів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у впровадженні методу лабораторного технологічного старіння бітумів, що моделює зміну властивостей бітумів під час змішування їх з мінеральним матеріалом; встановлено оптимальні технологічні температури виробництва та ущільнення асфальтобетонних сумішей відповідно до марки бітуму.

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні результати досліджень, які виносяться на захист, отримано автором самостійно. Внесок автора в опублікованих зі співавторами наукових

працях:

- проаналізовано фактори та встановлено критерії старіння бітумів [12 – 14];
- досліджено зміну властивостей бітумів різних технологічних типів і марок під час термоокиснювального старіння та встановлено критерії старіння бітумів [2, 8, 17, 18];
- оцінено вплив модифікуючих добавок на стійкість бітумів до технологічного старіння та довговічність асфальтобетонного покриття [2 – 6].

Обґрунтованість та достовірність отриманих в роботі результатів: підтверджується погодженістю теоретичних передбачень та експериментальних результатів; достатнім обсягом експериментальних даних, що отримані з використанням сучасного лабораторного обладнання; апробацією результатів роботи під час виробничого впровадження.

Апробація результатів дисертації.

Основні результати дисертаційної роботи були представлені на наступних конференціях і семінарах: Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні технології будівництва й експлуатації автомобільних доріг» м. Харків, ХНАДУ, 2013 р; Young Researchers Seminar 2015, Рим, 2015; Науково-практична конференція з проектування та будівництва автомобільних доріг, Київ, 2015; Building up Efficient and Sustainable Transport Infrastructure 2017 (BESTInfra2017) 21–22 September 2017, Prague, Czech Republic; Міжнародна науково-практична конференція «Бітумні в'язучі та асфальтобетони: досягнення і проблеми» м. Харків, ХНАДУ, 2017; Сучасні матеріали й технології для розвитку та утримання автомобільних доріг, Міжнародна виставка-форум «HEAVY DUTY/ВАЖКАТЕХНІКА 2018», м. Київ, 2018; Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні матеріали і технології будівництва, реконструкції та ремонтів автомобільних доріг», м. Вінниця, 2018; Науково-практичний семінар «Модифікація бітумів та асфальтобетонів – ефективний напрямок підвищення довговічності автомобільних доріг», Київ, 2018.

Публікації. За темою дисертаційного дослідження опубліковано 18 наукових праць, у тому числі: 6 у періодичних фахових виданнях, що входять до переліку МОН України (1 стаття у виданні, яке включене до наукометричної бази Scopus); 10 у збірниках праць за матеріалами наукових конференцій; 2 праці додатково відображають наукові результати дисертації.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація включає вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел із 178 найменувань та три додатки. Основний текст викладений на 134 сторінках. Текст ілюструється 49 рисунками і містить 37 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЩОДО ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ СТАРІННЯ НА ЯКІСТЬ БІТУМНИХ В'ЯЖУЧИХ ТА ДОВГОВІЧНІСТЬ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ

1.1 Існуючі уявлення про механізм старіння бітумів різних типів та консистенції під дією температурно-кисневих факторів

Гарячі асфальтобетонні суміші є найбільш поширеним матеріалом для влаштування покриття та верхнього шару основи дорожнього одягу під час будівництва автомобільних доріг [1 – 3], оскільки вони в порівнянні з цементобетонними сумішами забезпечують комфортніші умови руху та менший рівень шуму [4 – 7]. Гарячі асфальтобетонні суміші складаються з бітуму, крупного та дрібного заповнювача, а також мінерального порошку (наповнювача) [8 – 10]. Бітум об'єднує усі компоненти асфальтобетонної суміші в єдине ціле і тому саме від його якості безпосередньо залежить якість та довговічність асфальтобетонного покриття [11 – 13, 168, 172, 173 та 176].

У складі асфальтобетонної суміші бітум піддається впливу високих технологічних температур, кисню, несприятливих погодно-кліматичних чинників та впливу від транспортних засобів, що призводять з часом до негативної зміни його властивостей (старіння) [14 – 17, 167, 174, 175].

Під дією тепла, світла, кисню повітря, води та інших чинників у бітумі відбуваються зворотні та незворотні зміни властивостей. Зворотні зміни пов'язані з перебудовою надмолекулярної структури бітуму (фізичне старіння). Незворотні зміни супроводжуються протіканням внутрішніх фізико-хімічних процесів, відбувається зміна хімічного складу (хімічне старіння), якість бітуму погіршується, що з часом призводить до руйнування матеріалу і асфальтобетонного покриття в цілому [18].

Однією з перших робіт, присвячених старінню бітуму, була робота Г. Абрагама [19], в якій він відзначає складність змін, що відбуваються у

складі бітуму. Вивченням старіння бітуму також займалися А.С. Колбановська, А.І. Лисихіна, І.М. Руденська, Б.Г. Печений, С.Д. Іліополов, Е.В. Углова, В. Д. Галдина, І.В. Мардиросова тощо [18, 20 – 25, 170, 171].

Зазвичай в результаті старіння бітум стає більш твердим та крихким, тим самим збільшується ризик руйнування покриття в результаті утворення низькотемпературних тріщин та викришування [26 – 28]. В роботі [29] було показано, що підвищення стійкості бітуму до старіння сприяє збереженню його пластичності. Низький ступінь старіння бітуму також мінімізує вплив вологи, тим самим зберігаючи високу міцність дорожньої конструкції [29].

Процеси старіння бітуму відбуваються у дві фази: короткострокове старіння та довгострокове старіння. Короткострокове старіння - це старіння, яке відбувається в бітумі під час виробництва, зберігання, транспортування та укладання асфальтобетонної суміші [31]. Довгострокове старіння має місце під час всього терміну експлуатації дорожнього покриття [32].

Механізм старіння бітуму широко розкрито в [33]. Встановлено, що під час старіння відбувається випаровування, окиснення та дифузія.

У міру старіння бітуму компоненти меншої молекулярної маси можуть втрачатися шляхом випаровування. Цей процес особливо важливий за високих температур і пов'язаний зі зменшенням маси бітуму. Випаровування летких речовин залежить від способу виробництва бітуму. Наприклад, в Україні бітум виробляють методом окиснення за високої температури і в процесі виробництва видаляються компоненти меншої молекулярної маси, тому такий бітум менш схильний до випаровування компонентів. Бітум, який виробляють методом дистиляції або компаундування може містити більшу кількість низькомолекулярних компонентів і, відповідно, схильність такого бітуму до випаровування буде більшою [1].

Окиснення відбувається в результаті включення кисню в молекулярну структуру бітуму, що призводить до збільшення його маси.

Включення кисню має форму карбонільної функціональної групи, яка проявляється кетонами, карбоною кислотою або альдегідом. Ці функціональні групи може бути усунено в процесі окиснювальних з'єднань [33].

Під впливом певних чинників можливий перехід бітуму з одного структурного типу в інший. Так, наприклад, дорожній бітум, що відноситься до бітумів типу золь-гель, переходить в результаті розвитку незворотних структурних змін (перетворення масел в смоли, а смол в асфальтени) до бітумів типу гель. Якість в'язучого при цьому погіршується: температури розм'якшеності та крихкості підвищуються, в'язкість бітуму збільшується, він стає менш пластичним [24]. Слід зазначити, що процес переходу смол в асфальтени є більш інтенсивним, ніж процес перетворення масел в смоли. Таким чином, при старінні у бітумі відбувається відносно збільшення вмісту асфальтенів та зменшення вмісту смол і масел [24].

Вперше процес безперервного старіння бітуму як послідовний перехід від структури золь до структури гель і до руйнування представила А.С. Колбановська [18]. Процеси необоротного структуроутворення у бітумах під час дії кисню повітря та температури протікають в три основні стадії: а) утворення коагуляційної сітки асфальтенів з надмолекулярної структури смол; б) розвиток жорсткої просторової структурної сітки асфальтенів; в) руйнування жорсткої просторової структурної сітки асфальтенів.

При цьому характеристикою старіння бітуму може бути не лише збільшення кількості асфальтенів, але і будь-який інший показник, що характеризує його властивості [18], наприклад температура розм'якшеності або динамічна в'язкість.

Під час змішування бітуму з мінеральним матеріалом та в процесі експлуатації асфальтобетону частина його мальтенових компонентів може бути поглинена порами заповнювача, що призводить до зростання жорсткості бітуму. Важливу роль у процесі старіння відіграє

ультрафіолетове випромінювання, оскільки воно сприяє розшаруванню зв'язків, що призводить до утворення вільних радикалів. Такі вільні радикали є високореакційними і полегшують усі форми окиснення [18, 33].

Кисень як основний чинник старіння бітуму призводить до значних змін властивостей в'язучого. Цей висновок підтверджують результати тривалого зберігання бітуму при обмеженому доступі повітря [22]. Після 14 років зберігання властивості бітуму змінилися менше, ніж після року зберігання при вільному доступі повітря. Глибина проникності голки зменшилася в першому випадку на (6 – 13) %, в другому – на (5 – 28) %, температура розм'якшеності збільшилася відповідно на (0 – 1) % і (7 – 37) %.

Ще більш помітні зміни структури бітуму відбуваються при спільній дії на в'язуче кисню і високої температури. В [22, 23, 50, 51, 53] досліджено питання старіння бітуму при дії на нього високої температури та кисню і встановлено, що швидкість старіння бітуму залежить від безлічі чинників: тривалість дії температури або кисню, товщина шару бітуму, величина діючої температури, якісних характеристик бітуму тощо.

Схематично процес старіння бітуму від початку виробництва асфальтобетонної суміші до тривалої експлуатації асфальтобетонного шару можна представити у вигляді залежності, зображеної на рисунку 1.1 [54].

Як видно з рисунку 1.1 найбільше старіння відбувається під час виробництва асфальтобетонної суміші, коли бітум розподіляється тонкою плівкою на поверхні мінеральних матеріалів. В процесі експлуатації асфальтобетонного покриття впродовж 8 років зміна динамічної в'язкості бітуму є практично в п'ять разів меншою ніж під час виробництва асфальтобетонної суміші. Це дозволяє припустити, що зменшивши короткострокове старіння бітуму можна значно подовжити строк експлуатації дорожнього покриття.

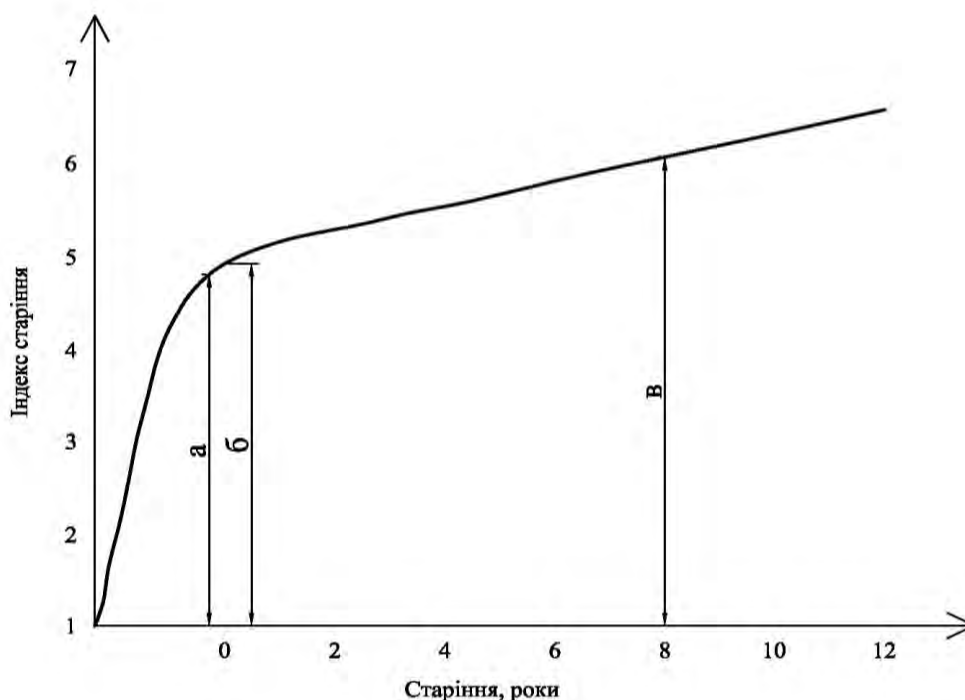


Рисунок 1.1 – Зміна індексу старіння бітуму (відношення в'язкості зістареного бітуму η_a до в'язкості вихідного бітуму η_0 в часі: під час виробництва асфальтобетонної суміші (а); під час зберігання, транспортування та укладання (б); за 8 років роботи у складі асфальтобетонного покриття (в)

Безперечно, що існує багато факторів, які додатково будуть впливати на швидкість старіння бітуму відповідно до зазначених вище механізмів. До цих факторів належать [18, 33 – 47]:

- груповий хімічний склад бітуму, який у свою чергу визначається походженням сировини та способом виробництва бітуму;
- хімічний склад будь-яких добавок або модифікаторів, присутніх у складі бітуму, а також механізм взаємодії таких модифікаторів і бітуму.
- в'язкість бітуму, яка регулює швидкість дифузії кисню через в'язуче;
- товщина плівки бітуму, яка регулює швидкість дифузії кисню через в'язуче;
- пористість, що знаходиться всередині шару асфальтобетону, і які регулюють доступ кисню;

- заповнювач, який може сприяти дифузії та/або містити каталізатори окиснення;
- товщина шару асфальтобетону, яка регулює швидкість дифузії окисненого матеріалу по всьому шару;
- наявність в суміші антиоксидантів (наявність у бітумі полімерів, сполук на основі фосфору та сполук на основі цинку зменшує старіння або протидіє наслідкам старіння);
- широта, яка впливає на інтенсивність УФ-випромінювання;
- парціальний тиск кисню, на який впливає висота;
- клімат, який визначає вплив вологи та температури.

Зважаючи на це, значну увагу треба приділяти саме короткостроковому старінню бітуму під час виробництва асфальтобетонної суміші, оскільки під час цього процесу відбувається найбільша зміна властивостей бітуму.

1.2 Існуючі методи та критерії оцінювання старіння бітумів

Впродовж багатьох років значна увага приділяється впливу старіння на властивості бітуму як в польових умовах, так і під час прискореного лабораторного старіння. Перша стадія старіння бітуму відбувається під час виробництва, зберігання та транспортування асфальтобетонної суміші з наступним влаштуванням асфальтобетонного шару (короткострокове старіння). Другий етап або довготривале старіння відбувається під час експлуатації покриття впродовж тривалого часу (довгострокове старіння) [55].

В роботі [56] показано зміну властивостей бітуму, що вкриває заповнювач, під час перемішування, транспортування, укладання та впродовж експлуатації. Автори [33, 57] стверджують, що випаровування компонентів бітуму та реакція з киснем є двома механізмами, що найбільшим чином впливають на зміну властивостей бітуму.

Зміна властивостей бітуму залежить від температури та часу її дії, отже, температуру та час її дії можна використовувати взаємозамінно, тобто

зміна властивостей бітуму за високої температури в короткий проміжок її дії буде еквівалентною зміні за нижчої температури та більшої тривалості її дії [58].

Для визначення зміни властивостей бітуму під час короткострокового старіння існує ряд методів. Найбільш поширеними методами є метод переливання тонкої плівки бітуму в термокамері (RTFOT) та метод витримування тонкої плівки бітуму в термокамері (TFOT). Метод RTFOT установлено в EN 12607-1 [31] (Європейський Союз) та ASTM D 2872 [59] (США), а метод TFOT в EN 12607-2 [60] та ASTM D 1754 [62] відповідно. Вважається, що методи RTFOT і TFOT не є взаємозамінними, оскільки для більшості бітумів зміна властивостей за методом RTFOT є більшою ніж за методом TFOT [61]. Довгострокове старіння відбувається в основному за рахунок контакту бітуму з киснем та різних умов навколишнього середовища. Довгострокове старіння моделюється в лабораторії з використанням посудини високого тиску (PAV) відповідно до EN 14769 [32] та ASTM D 6521 [63].

В таблиці 1.1 приведено порівняння методів EN 12607-1 [31] та EN 12607-2 [60].

Таблиця 1.1 – Порівняння методу RTFOT та TFOT

Ч. ч.	Параметр	RTFOT	TFOT
1	Ємність для зразка	Скляні циліндричні посудини	Металеві круглі чашки
2	Розмір ємності, мм	Довжина – 140, діаметр – 64.	Діаметр – 140, глибина – 9,5.
3	Маса досліджуваного зразка, г	35	50
4	Кількість обертів за хвилину	15 (барабану)	5,5 (полиці)
5	Примусова подача повітря	Так	Ні
6	Тривалість випробування, хв	75	300
7	Температура випробування, °C	163	163

Випробування бітумів на старіння в основному має дві мети. Першою є отримання зістарених зразків бітуму для подальшого визначення їх фізико-технічних властивостей. Друга - визначення кількості летких речовин, що виділяються з досліджуваних зразків в процесі випробування [16].

За останні більше ніж вісімдесят років дослідники з усього світу робили численні спроби співставити прискорене лабораторне старіння бітуму з польовими показниками, основні з яких приведено в таблиці 1.2. В більшості цих досліджень прискорене старіння бітуму виконували в тонкій плівці.

Таблиця 1.2 – Методи лабораторного моделювання старіння бітуму

Ч. ч.	Метод випробування	Температура, °С	Тривалість	Маса зразка, г	Товщина плівки	Додаткові умови
1	2	3	4	5	6	7
1	Метод витримування тонкої плівки бітуму в термокамері (TFOT) [65]	163	5 год	50	3,2 мм	-
2	Модифікований метод витримування тонкої плівки бітуму в термокамері (MTFOT) [41]	163	24 год	35	0,1 мм	-
3	Метод переливання тонкої плівки бітуму в термокамері (RTFOT) [67]	163	75 хв	35	1,25 мм	Потік повітря 4000 мл/хв
4	Розширений метод переливання тонкої плівки бітуму в термокамері (ERTFOT) [41]	163	8 год	35	1,25 мм	Потік повітря 4000 мл/хв

1	2	3	4	5	6	7
5	Метод переливання тонкої плівки бітуму в термокамері в середовищі азоту (NRTFOT) [69]	163	75 хв	35	1,25 мм	Потік азоту 4000 мл/хв
6	Метод тонкої плівки Shell [68]	107	2 год	-	0,005 мм	-
7	Модифікований метод тонкої плівки Shell [67]	99	24 год	-	0,02 мм	-
8	Модифікований метод тонкої плівки Shell [57, 70]	107	2 год	-	0,015 мм	-

Метод TFOT вперше був представлений в 1940 році для розмежування бітумів з різною втратою летких речовин та різними характеристиками затвердіння [65]. Відповідно до методу TFOT зразок бітуму об'ємом 50 мл поміщають у плоску ємність діаметром 140 мм, отримуючи товщину плівки 3,2 мм. Потім два або більше з цих контейнерів розміщують в термостаті на полиці, що обертається зі швидкістю від 5 об/хв до 6 об/хв, на 5 год за температури 163 °С. В подальшому метод TFOT був стандартизований AASHTO та ASTM як метод оцінювання твердіння бітуму під час виробництва асфальтобетонних сумішей. Основною недоліком методу TFOT вважається нерівномірне старіння бітуму за об'ємом [41], що може спотворювати результати випробування. У зв'язку з цим проводилися дослідження з удосконалення даного методу, зокрема був запропонований модифікований метод MTFOT [41], відповідно до якого товщину плівки бітуму було зменшено з 3,2 мм до 100 мкм з додатковим збільшенням часу витримування до 24 год.

Найбільш вдалою модифікацією методу TFOT ймовірно є метод RTFOT, що дозволяє краще імітувати затвердіння бітуму під час виробництва асфальтобетонної суміші [67, 92]. Метод RTFOT був розроблений Каліфорнійським підрозділом автомобільних доріг [67]. Під час випробування бітум безперервно обтікає внутрішню поверхню кожного випробувального контейнера порівняно тонкими плівками товщиною 1,25 мм. Вважається, що за методу RTFOT Метод весь бітум піддається впливу тепла та повітря. Умови в тесті не ідентичні умовам, виявленим на практиці, але досвід показав, що величина затвердіння відповідно до RTFOT досить добре корелює з показником, який спостерігається у звичайному змішувачі періодичної дії [93].

Метод RTFOT також піддавався удосконаленню, однак більшість з них були відносно незначними, наприклад в [41] використовували більш тривалий проміжок часу (8 год замість 75 хв), тоді як в [95] використовували 5 год. Найбільш сучасною модифікацією методу RTFOT є метод NRTFOT, що використовують для більш точного визначення фактичної втрати летких речовин під час випробування [69]. Процедура ідентична стандартному випробуванню, за винятком того, замість повітря подають азот.

Ще одним методом визначення старіння бітуму є метод обертання випробувальної колби (RFT), відповідно до якого 100 г зразка бітуму витримують в роторному випарнику впродовж 150 хв за температури 165 °C за швидкості обертання 20 об/хв [96].

Відповідно до [68] дуже тонку плівку бітуму (5 мкм) витримують впродовж 2 год на скляній пластині за температури 107 °C. Тоншу плівку бітуму розробники обґрунтовують необхідністю імітації товщини плівки відповідно до її товщини в асфальтобетонній суміші. Зміну властивостей бітуму оцінюють за в'язкістю до і після випробування, щоб отримати «індекс старіння». Автори [97] звертають увагу на обмежену кореляцію між лабораторним старінням та реальним старінням бітуму, в той же час в деяких роботах виявлено певну кореляцію між польовими та лабораторними

даними [98 та 99]. Даний метод було удосконалено шляхом збільшення товщини плівки до 20 мкм та часу витримування до 24 год з невеликим зниженням температури до 99 °C [67, 101].

Однією з модифікацій методу RTFOT є каліфорнійський метод випробування в термокамері під нахилом (TODT) [95]. У цьому методі передню частину печі нахилено на 1,06° вище задньої, щоб запобігти витіканню бітуму із ємності під час випробування. Також в TODT використовують більш низьку температуру і тривалий час старіння порівняно з методом RTFOT, а саме 168 год старіння за температури 113 °C. Відповідно до [115] такі умови експерименту найбільш відповідають періоду старіння в дорожньому покритті, рівному двом рокам в жаркому кліматі.

Крім того, як показано в роботі [95] за результатами дослідження зістарених в лабораторії зразків, результати після TODT можна використовувати для прогнозування процесів старіння бітуму в жаркому кліматі. Про аналогічну модифікацію повідомлено в роботі [116] з умовами випробування впродовж 100 год за температури 115 °C. Обидва методи було оцінено в [117], а за результатами досліджень зроблено висновок, що випробування впродовж 168 год за температури 113 °C призводить до більших змін.

Модифікацією RMFOT є випробування прискореним старінням тонкої плівки (TFAAT), що розроблене Петерсеном [115]. Перевага даного методу полягає в збільшенні кількості зістареного в'язучого, оскільки під час випробування використовують зразок в'язучого масою 4 г порівняно з 0,5 г в RMFOT. У той час як методи довготривалого нагрівання, такі як TFOT і RTFOT, відображають лише старіння, яке відбувається під час виробництва асфальтобетонної суміші, метод TFAAT було розроблено для отримання репрезентативного рівня випаровування й окиснення для моделювання рівня окиснювального твердіння, що зазвичай відбувається під час тривалого старіння в складі дорожнього покриття.

TFAAT було розроблено як додаток до процедури окиснення, розробленої в 1967 році [118], в якій бітумну плівку завтовшки 15 мкм, вкриту частинками тефлону, окиснюють в газовій хроматографічній колоні за температури 130 °C впродовж 24 год пропусканням повітря через колону. Оскільки за методом TFAAT використовують у вісім разів більше в'язучого, ніж в RMFOT, з подальшим збільшенням кількості плівок в'язучого, TFAAT повинен мати або більш тривалий час старіння, або більш високу температуру випробування для досягнення такого самого ступеня окислювального старіння, що і в RMFOT. Було встановлено, що під час проведення випробування за температури 130 °C впродовж 24 год відбувається такий самий рівень окиснювального старіння, що і під час RMFOT, а також під час випробування дорожніх покриттів віком (11 - 13) років. Як і в разі RMFOT, отвір діаметром 31 мм для стандартної пляшки RTFOT було зменшено до 3 мм для обмеження надмірних втрат летких речовин. TFAAT також може бути виконано за більш низької температури 113 °C, але впродовж більш тривалого часу (3 дні) порівняно з одноденним випробуванням за температури 130 °C.

Але метод RTFOT не позбавлений недоліків, одним із з яких є вплив високої в'язкості модифікованих бітумних в'язучих на процес переливання в'язучого всередині пляшки впродовж процесу старіння. Деякі модифіковані бітумні в'язучі матеріали навіть схильні витікати з пляшки у процесі випробування. Для вирішення цих проблем в 1998 році розроблено модифікований метод старіння в тонкій плівці під час обертання (RTFOTM). Цей метод ідентичний методу RTFOT, за винятком того, що в скляні контейнери під час випробування встановлюють сталеві стрижні діаметром 6,4 мм та завдовжки 127 мм. Принцип роботи даного методу полягає у примусовому розподіленні в'язкого бітумного в'язучого в ємності за допомогою сталевих стрижнів. Перші дослідження показали, що застосування сталевих стрижнів зовсім незначним чином впливає на фізичні властивості бітумного в'язучого, які визначали за значенням пенетрації

[119]. Дослідження, проведені в Turner-Fairbanks Highway Research Center, виявили, що використання сталевих стрижнів не вирішує проблеми розподілення модифікованого бітумного в'язучого та необхідно проведення додаткових досліджень та перевіряння, перш ніж впроваджувати цей метод.

За методом швидкого відновлення (RRT) використовують подібний механізм для запобігання витікання емульсій або розріджених в'язучих речовин з пляшки, але замість сталевих стрижнів під час процедури використовують гвинти з нержавіючої сталі або з політетрафторетилену завдовжки 120 мм і діаметром 12,2 мм. Напрямок гвинта такий, що зразок відтягується під час обертання до задньої частини пляшки за методом RTFOT. Олівер і Тредреа (1997) також використовували валик з гвинтовою різьбою для старіння полімермодифікованих бітумів у RTFOT, де під час обертання ємності валик «притискав» в'язуче до її задньої стінки. Використовуючи модифікований RTFOT з часом впливу 9 год та за температури 163 °C, Олівер і Тредреа змогли змінити реологічні властивості полімермодифікованих і немодифікованих бітумних в'язучих речовин таким чином, що вони відповідали значенням, отриманими після 2,5 років експлуатації в жаркому кліматі покриття типу Slurry.

Хоча випробуванням тонкої плівки можна визначити відносні характеристики твердіння бітумів, які відбуваються під час процесу змішування у заводських умовах, вони, як правило, не дають змогу точно спрогнозувати довготривале старіння за реальних умов. Тому було зроблено спроби вирішити цю проблему поєднанням старіння тонкої плівки в печі та окиснювального старіння.

Одним з таких випробувань є метод визначення довговічності (IDT), в якому поєднано процес старіння тонких плівок з окиснювальним старінням.

Він включає старіння в'язучого, зістареного за методом TFOT, і старіння в посудині під тиском. Умови старіння в посудині: використання

чистого кисню із тиском 2,07 МПа, температура – 65 °С, тривалість – до 1000 год. Оскільки в'яжуче не виймають з контейнерів TFOT перед переміщенням в посудину, товщина плівки складає 3,2 мм.

Було встановлено, що старіння за методом IDT добре корелює з тим, що відбувається після 5 років експлуатації в польових умовах. Виходячи з цього гіперболічного взаємозв'язку та значних польових та лабораторних даних, було встановлено, що 46 год старіння за цим методом еквівалентно 60 місяцям старіння в умовах штату Айова.

У 1985 році Елдером було застосовано підхід, аналогічний використаному в методі IDT. Бітум, підготовлений за методом RTFOT, піддавали окиснювальному старінню в посудині циліндричної форми зі сталі, верхню частину якої було обладнано кришкою із болтовим кріпленням. Усередині посудини розташовували стелаж, на якому горизонтально розміщували 12 скляних пластинок розміром 40 мм × 40 мм. На пластини наносили зразки шаром завтовшки 30 мкм. За цим методом зразок витримували впродовж 96 год під тиском 2,07 МПа за температури 65 °С.

Хоча RTFOT та RFT досить точно моделюють старіння, що відбувається під час виробництва та улаштування асфальтобетонної суміші, через високу температуру випробування неможливо адекватно змоделювати старіння, що відбувається в процесі експлуатації. Тому у 2000 році в бельгійському дорожньо-дослідному центрі (Belgian Road Research Centre (BRRC)) розроблено метод Accelerated Ageing Test Device/Rotating Cylinder Ageing Test (RCAT), який базувався на теоретично кінетичному підході до старіння. У методі використано підхід, подібний до того, що використовують в RTFOT. RCAT відомий як «метод старіння в пристрої прискореного старіння», або «метод старіння в обертальному циліндрі».

Пристрій для старіння складається з циліндра завдовжки 300 мм, внутрішній діаметр якого становить 124 мм. На одному кінці циліндра

розташовано отвір діаметром 43 мм для завантаження та виймання зразка [120]. Для випробування використовують зразок бітуму масою 500 г. Після наповнення циліндра бітумом поміщають стержень із нержавіючої сталі завдовжки 296 мм і діаметром 34 мм. Далі циліндр встановлюють на раму, яка обертає його зі швидкістю 1 об/хв, та вмикають подачу кисню зі швидкістю 75 мл/хв. Під час обертання стрижень розподіляє бітум по стінках циліндра у вигляді плівки товщиною 2 мм. Випробування проводять за температури 70 °C або 100 °C. Через певні проміжки часу виймають приблизно від 20 г до 25 г бітуму для випробувань. Оскільки старінню піддають досить велику кількість бітуму, можна оцінити зміни фізико-хімічних властивостей матеріалу в процесі старіння.

Встановлено, що під час процесу старіння за температури 85 °C протягом 144 год відбувається найбільш інтенсивне утворення асфальтенів. Також відзначено, що температура менше ніж 100 °C має важливе значення для прискорених методів старіння: за таких температур відбуваються хімічні та реологічні зміни, аналогічні тим, що відбуваються в польових умовах. Було встановлено взаємозв'язок між експлуатаційним і лабораторним старінням за методом RCAT для щільних сумішей. Однак для моделювання процесу старіння пористих сумішей у польових умовах потрібно більше ніж 240 год, що ускладнює оперативне отримання результатів під час визначення якості бітумних в'язучих.

У 1992 році в США дослідницька група SHRPA-002A розробила метод, використовуючи камеру для старіння під тиском (PAV) для імітації довготривалого окиснювального старіння бітуму в польових умовах.

Метод PAV описує процедуру старіння бітуму за RTFOT або TFOT. Підготовлений бітум в кількості 50 г завтовшки 3,2 мм поміщають в металеву чашу діаметром 140 мм. Чаші з матеріалом встановлюють на стелаж, який розміщують всередині камери для старіння. Камеру закривають, температуру всередині збільшують до температури випробування – від 90 °C до 110 °C, тиск – до 2,1 МПа. Час старіння

становить 20 год. Після процедури старіння зразки бітумного в'язучого піддають дегазації у вакуумній дегазаційній камері. У 2000 році було проведено співставлення методів старіння PAV та RCAT. Аналізуючи реологічні властивості й інфрачервоний спектр матеріалів, дослідники встановили, що 20 год старіння за методом PAV відповідає 178 год старіння за методом RCAT.

Метод старіння за високого тиску (HiPAT) – це удосконалений метод PAV з використанням нижчої температури 85 °C впродовж тривалого часу – 65 год [121]. Причиною цих модифікацій було занепокоєння тим, що температури, які використовували за методом PAV, були занадто високими порівняно з очікуваними температурами покриття. Окрім того, особливо для модифікованих в'язучих, було очевидно, що процедура може суттєво змінити в'язучі порівняно з в'язучими в польових умовах.

Під час перших досліджень прогнозування довготривалого старіння у польових умовах прийшли до думки, що процес під час HiPAT може бути більш важким, ніж природний процес старіння для щільної асфальтобетонної суміші з 10 річним строком служби [121]. Однак процедура демонструє потенціал, як інструмент для визначення в'язучих, які надмірно старіють під час експлуатації.

Альтернативою процедурі HiPAT є розширене випробування з відновлення, який є продовженням методу RRT, що використовують для старіння емульсій або розріджених в'язучих, що містять сильно леткі оливи. Під час випробування зразки витримують за температури 85 °C впродовж 2 год у RTFOT із потоком газу азоту із подальшою подачею повітря впродовж 22 год.

Сонце виділяє енергію у вигляді електромагнітного випромінювання хвилями завдовжки від 200 нм до 3 000 нм [122]. Приблизно 7 % сонячного випромінювання, яке досягає поверхні Землі, становить ультрафіолетове (УФ) випромінювання (від 180 нм до 400 нм), 42 % – у видимих межах (від 400 нм 800 нм) та 51 % – інфрачервоне (ІЧ) випромінювання (від 800 нм до

3 000 нм). В УФ-діапазоні можна виділити три різних ділянки спектра зі зростаючою довжиною хвилі: УФ-С (від 240 нм до 280 нм), УФ-В (від 280 нм до 315 нм) та УФ-А (від 315 нм до 400 нм). Відносну значимість трьох ділянок визначають їх інтенсивністю та довжиною хвилі, причому більш короткі є більш руйнівними.

В роботі [123] та співавторами проведено випробування із використанням УФ та ІЧ світла для старіння бітуму, де бітумні плівки витримували в ємностях TFOT. Встановлено, що УФ-вплив є більш ефективним з точки зору зміни фізичних властивостей бітуму порівняно з використанням інфрачервоного випромінювання. Тракслер [124] використовував актинічне світло для імітації фотохімічного старіння бітуму. Його дані свідчать, що фотохімічна реакція має значний вплив на тонкі плівки бітуму (3 мкм), але цей ефект зменшується для більш товстих плівок.

В роботі [125] розробили камеру для ультрафіолетового довготривалого старіння звичайного бітуму. У камері використовували ртутну газову лампу з діапазоном хвиль від 180 нм до 315 нм (УФ-С та УФ-Б). Бітум нагрівали до 140 °С та наносили на скляні пластини (25 см × 20 см), отримуючи товщину плівки в'язучого близько 1,5 мм. Потім пластини розміщували на стелажі, який розміщували на визначеній відстані від лампи та витримували 450 днів (еквівалентно близько 2 000 сонячним дням). З інтервалом у 20 днів зразки бітуму зі скляних пластин піддавали стандартним фізичним випробуванням (глибина проникності голки, температура розм'якшеності та в'язкість), а також випробуванню ядерного магнітного резонансу (ЯМР) та інфрачервоної Фур'є-спектроскопії (FTIR). Результати свідчили про чіткі докази леткості, окиснення та полімеризації бітуму внаслідок старіння під ультрафіолетовим випромінюванням.

Монтепара та Джуліані [122] порівнювали відносне старіння за методом RTFOT, під час УФ-випромінювання та за методом PAV. Вони

піддали ультрафіолетовому випромінюванню два звичайних бітуми, використовуючи випромінювальну лампу з високою щільністю ультрафіолетових променів, 2 000 Вт для еквівалентних періодів сонячного опромінення через 1, 2, 6 та 10 років після старіння RTFOT. Результати свідчили, що УФ-старіння призводило до зменшення ефекту старіння порівняно із результатами за методом PAV.

Боччі та Черні [127] розробили альтернативну стандартній процедурі старіння УФ-випромінюванням. Під час процедури імітували вплив ультрафіолетового випромінювання, що відповідав строку від 4,6 років до 14,5 років, виміряних на 40 контрольних станціях по всій Західній Європі. Це накопичене випромінювання відповідало фіксованій кількості енергії 360 000 Вт/м². За цим методом 30 г бітуму поміщали в контейнер і нагрівали з отриманням однорідного шару завтовшки 1 мм. Потім однакові контейнери розміщували у спеціально підготовленому приміщенні для випромінювання, обладнаному світлом пари заліза із хвилями ділянок спектрів УФ-А, УФ-В та УФ-С. Зразки бітуму витримували протягом (12 - 35) днів залежно від їх положення в приміщенні відносно лампи, щоб накопичити енергію, рівну 360 000 Вт/м².

Перші методи старіння УФ-випромінюванням із використанням ряду в'язучих речовин свідчили, що стандартні довготривалі процедури нагрівання та окиснювання (RTFOT з наступним PAV) дають різні результати, ніж результати, отримані під час фотохімічного процесу. Це вказує на те, що результати старіння, отримані фотохімічним процесом, загалом не може бути відтворено термічно-окиснювальними процедурами, особливо для в'язучих речовин, схильних до УФ-старіння. Тому може виникнути потреба у поєднанні фотохімічних методів з довготривалими нагрівальними та окиснювальними процедурами для імітації довготривалого старіння бітумних матеріалів в реальних умовах.

Окрім штучного старіння в'язучих речовин, існує також ряд методів штучного старіння асфальтобетонних сумішей. Їх можна загалом розділити на чотири категорії:

- розширені процедури нагрівання;
- випробування окиснюванням;
- ультрафіолетове, інфрачервоне випромінювання;
- стеричне твердіння.

Основою процедур є штучне старіння суміші та оцінювання впливу старіння на ключові характеристики матеріалу (наприклад, жорсткість, в'язкість, міцність тощо). У розширених процедурах нагрівання, як правило, суміш піддають впливу високих температур впродовж певного періоду часу перед відповідними випробуваннями (наприклад, випробування на стиск, випробування на відновленому в'язучому тощо). Під час випробування лабораторних зразків окиснюванням зазвичай використовують комбінацію високої температури та тиску.

Більшість початкових досліджень зі старіння асфальтобетонної суміші включали випробування відновленого в'язучого, детально описане Хаббардом і Голломбом [128], а також Шаттаком [129]. Зрозуміло, що ці випробування спирались на прийнятні та обґрунтовані процедури екстрагування та відновлення бітуму з асфальтобетонних сумішей [130].

Під час перших процедур лабораторного старіння використовували пісок Оттави як стандартний «заповнювач», при цьому проводили випробування ультрафіолетовим випромінюванням, а також тривалим впливом тепла та повітря [131].

Паулс та Велборн [132] випробували піщану суміш Оттави у формі циліндрів розміром 50 мм × 50 мм за температури 163 °C (як за TFOT та RTFOT) протягом різних періодів часу. Міцність циліндрів на стиск, а також консистенцію відновленого в'язучого було порівняно з міцністю вихідного (невипробуваного) матеріалу. За результатами цього дослідження встановлено, що бітум, екстрагований із лабораторно зістарених зразків або

витриманий в TFOT, можна використовувати для оцінювання твердіння бітумів. Однак результати не свідчили про те, що TFOT може передбачити довгострокове старіння в польових умовах.

Планчер з співавторами [133] використовували подібну процедуру старіння в печі для зразків заввишки 25 мм та діаметром 40 мм за температури 150 °C впродовж 5 год. Після прискореного старіння зразки охолоджували до 25 °C впродовж 72 год, далі їх випробували для визначення модуля пружності. Кемп та Предейхл [95] витримували піщані суміші Оттави в печі за температури 60 °C до 1 200 год. Потім бітум екстрагували та випробували. Однак вони вважали за краще використовувати TODT для витримання бітуму, оскільки можна було отримати значно більшу кількість бітуму ніж після випробування піщаних сумішей.

Хьюго та Кеннеді [135] асфальтобетонні зразки-керни, відібрані з лабораторних ущільнених плит, витримували в печі за температури 100 °C впродовж 4 днів або 7 днів в умовах сухості або відносної вологості 80 %. Потім бітум, екстрагований з витриманих кернів, випробували на в'язкість. Крім того, зразки зважували до та після старіння, а втрату ваги використовували для обчислення втрати летких речовин.

Більшість методів, що застосовували для лабораторного старіння асфальтобетонних сумішей, передбачали старіння ущільнених зразків асфальтобетонних сумішей. Однак Фон Квінтас та співавтори [136] досліджували зразки сипкої суміші для моделювання короткотривалого «заводського» твердіння. За цим методом сипкий матеріал нагрівали за температури 135 °C в шафі з примусовою вентиляцією витримували впродовж 8, 16, 24 та 36 год. Незважаючи на те, що цей метод продемонстрував схожі рівні старіння з тими, що й в польових умовах, лабораторні дані мали значний розкид.

Також в рамках проекту SHRP-A-003A було розроблено короткотривалі та довготривалі процедури старіння. Процедура

короткотривалого старіння в печі SHRP (STOA) була заснована на роботі, виконаній Фон Квінтас та співавторами [136]. За цим методом суміш, перед її ущільненням, витримують в шафі з примусовою вентиляцією впродовж 4 год за температури 135 °C (AASHTO PP2). Встановлено, що процес відображає старіння, яке відбувається під час виробництва та укладання асфальтобетонної суміші, та імітує стан покриття після його експлуатації впродовж менше ніж 2 роки [137].

Шольц [138] розробив подібну процедуру короткотривалого старіння, щоб імітувати значення твердіння, яке відбувається в процесі улаштування сумішей із безперервним гранулометричним складом. Процедура подібна до процедури SHRP STOA, за винятком того, що температура становить 135 °C або пов'язана з необхідною температурою ущільнення, залежно від того, що вище, а тривалість кондиціонування – не більше ніж 2 год.

Фон Квінтас та співавтори [136] також досліджували тривале старіння в шафі з примусовою вентиляцією, де ущільнені зразки асфальтобетонної суміші витримували впродовж 2 днів за температури 60 °C, а потім ще впродовж 3 днів за температури 107 °C. Однак Белл [139] зауважив, що підвищений рівень температури, використаний у випробуванні, може спричинити руйнування зразків, особливо у разі високого вмісту пор та/або асфальтобетонних сумішей із високим значенням проникності.

У рамках проекту SHRP-A-003A було розроблено дві альтернативні процедури довготривалого старіння, а саме довготривале старіння ущільнених зразків в шафі (LTOA) та окиснення ущільнених зразків за низького тиску (LPO) у модифікованій тривісній камері. Процедура LTOA вимагає, щоб після LTOA сипкий матеріал ущільнювали та поміщали в шафу з примусовою вентиляцією за температури 85 °C впродовж 5 днів (AASHTO PP2) [130]. Умови випробування імітують 15 років старіння в польових умовах вологого клімату без морозів та 7 років у сухому кліматі із

морозами. Однак за результатами польових досліджень було встановлено, що за методом LTOA 8 днів за температури 85 °C еквівалентні більше ніж 9 рокам у сухому кліматі із морозами та більше ніж 18 років у вологому без морозів; 2 дні за температури 85 °C еквівалентні 2 - 6 рокам як в умовах сухого клімату із морозами, так і у вологому без морозів; та 4 дні за температури 85 °C еквівалентні 15 рокам старіння в польових умовах вологого клімату без морозів та 7 рокам в сухому кліматі із морозами [137].

У поєднанні зі своєю процедурою короткотривалого старіння Шольц розробив довготривалу процедуру старіння для ущільнених зразків асфальтобетонної суміші. Процедура ідентична процедурі SHRP LTOA, в якій ущільнені зразки витримують в шафі з примусовою вентиляцією за температури 85 °C протягом 120 год.

Кумар і Гец [140] розробили метод, під час якого зразки витримували за температури 60 °C протягом 1, 2, 4, 6 і 10 днів, одночасно «витягуючи» повітря з ущільнених зразків за постійного напору води 0,5 мм. Таке низьке значення напору використовували для уникнення турбулентності в потоці повітря через зразок.

Значним відкриттям під час досліджень, проведених Кумаром та Гецом, є кількісне визначення товщини та проникності плівки. Для сумішей із відкритим гранулометричним складом відношення товщини плівки до проникності є найкращим показником для прогнозування стійкості до старіння. Однак для щільних сумішей найкращим показником стійкості до старіння є проникність. Слід зазначити, що Гуд і Луфсі [129] також дійшли висновку, що проникність є кращим показником стійкості до старіння, ніж уміст пор.

Кім та співат. [141] застосовували подібну спробу окисненням під тиском ущільнених зразків із сумішей штату Орегон. Зразки піддавали дії кисню за температури 60 °C та 0,7 МПа протягом 0, 1, 2, 3 та 5 днів. Вплив старіння оцінювали за значеннями жорсткості та втоми за непрямого розтягування. Хоча значення жорсткості, як правило, зростали зі старінням,

деякі суміші продемонстрували початкове зниження значень жорсткості на початковому етапі процедури старіння. Це пояснювалося втратою когезії в зразках за температури 60 °C. Подібні результати було отримано Фон Квінтасом і, отже, потрібні деякі обмеження для зразків за підвищених температур. Але, можливо, це не буде впливати на матеріали із великими значеннями модуля.

Однією із процедур довготривалого старіння, розроблених в рамках програми SHRP-A-003A, була процедура LPO для ущільнених зразків після їх короткотривалого старіння. Крізь закріплений тривісний зразок пропускали кисень з об'ємною витратою 1,9 л/хв за температури 60 °C або 85 °C впродовж 5 днів.

Халідом і Уолшем [142] було розроблено метод випробування LPO для прискореного старіння пористого асфальтобетону. Система складалася із подачі стисненого повітря зі швидкістю потоку 3 л/хв через ряд теплообмінних котушок, а потім через ряд зразків пористого асфальтобетону. Температура випробування становила 60 °C, а поверх зразків монтували гумову мембрану, щоб забезпечити течію повітря крізь зразки, а не навколо них. В ході досліджень встановлено, що цей метод добре відтворює процеси старіння, але через низьку температуру потрібні триваліші строки старіння.

Корсгаард та співавтори [143] використовували метод PAV для старіння ущільнених зразків щільних асфальтобетонних сумішей. На основі відновлених властивостей в'язучого вони визначили оптимальну процедуру витримування, що полягає у витримуванні PAV впродовж 72 год та за тиску 2,07 МПа і температури 100 °C, але визнавали, 60 год є достатнім часом для витримування.

Хвімом та співавторами [67] було розроблено метод випробування інфрачервоним випромінюванням піщаних сумішей Оттави. Напівущільнену піщану асфальтобетонну суміш піддавали впливу інфрачервоного випромінювання за постійної температури 60 °C та потоку

повітря крізь зразок за температури 41 °С. Завдяки гранулометричному складу піску та вмісту в'язучого 2 % було забезпечено рівномірну товщину плівки від 5 мкм до 7 мкм. Встановлено, що 1000 год витримування еквівалентно близько 5 рокам експлуатації.

Кемп та Предайхл [95] також проводили випробування актинічним світловим випромінюванням 1000 МВт/см² за температури 35 °С впродовж 18 год. Автори відзначали, що впливу піддається, незалежно від товщини бітумної плівки, лише 5 мкм.

Хьюго та Кеннеді [135] використовували два підходи для оцінювання впливу УФ-випромінювання на асфальтобетонні суміші. Перший метод був подібний до методу, який використовував Тракслер, за якого зразок бітуму кондиціювали впродовж 54 год під впливом УФ-світла. У другому методі використовували везерометр «Atlas», зразки кондиціювали впродовж 14 днів. Порівняно з везерометром, який використовували у своїх дослідженнях Елдер та співавтори, було виявлено, що рівні старіння були значно нижчими.

Використовуваний в Україні впродовж багатьох років метод визначення технологічного старіння бітуму згідно з ГОСТ 18180 [71] практично відповідає методу TFOT. Відмінність полягає в тому, що за ГОСТ 18180 [71] зразок бітуму знаходиться на стаціонарно розміщеній полиці, а згідно з методом TFOT полиця обертається зі швидкістю 5,5 об/хв. Також мають місце відмінності у товщині плівки бітумного в'язучого.

Відповідно до ДСТУ 4044 [78] для оцінювання стійкості бітумів до технологічного старіння використовують зміну маси, зміну температури розм'якшеності та penetрації за температури 25 °С. Таким чином оцінюється зміна властивостей бітуму за помірних та високих температур експлуатації, при цьому без розгляду залишається зміна властивостей бітуму за низьких температур експлуатації (температура крихкості).

В Європейському союзі для оцінювання зміни властивостей бітуму може застосовуватися аж три методи [79], однак арбітражним є методом

RTFOT. Як і в Україні в [79] стійкість бітумів до технологічного старіння оцінюють за зміною маси, зміною температури розм'якшеності та penetрації за температури 25 °С. Додатково залежно від умов застосування може бути визначено зміну динамічної в'язкості за температури 60 °С.

Найбільш прогресивною можна вважати американську систему Superpave [102], відповідно до якої оцінювання старіння є чи не найважливішим завданням, оскільки саме після старіння за методом RTFOT визначають верхню температуру роботи бітумного в'язучого без утворення пластичних деформацій, також в'язуче після RTFOT використовують для моделювання довготривалого старіння, після якого визначають нижню межу роботу бітуму.

У зв'язку з цим можна допустити, що максимально точне оцінювання зміни властивостей бітуму під час технологічного та експлуатаційного старіння, а також розроблення заходів із його зменшення, є запорукою підвищення строку експлуатації автомобільних доріг.

1.3 Критерії, що характеризують втомну довговічність асфальтобетонного покриття

На сьогодні в Україні показник довговічності асфальтобетону використовують під час встановлення опору розтягу при згині монолітних шарів для розрахунку коефіцієнта $k_{кп}$, що враховує короткочасність та повторюваність навантаження [150]:

$$k_{кп} = k_{пр} \cdot \sum N^{(\frac{1}{m})} \quad (1.1)$$

де $k_{пр}$ – коефіцієнт, що враховує вплив повторних навантажень в нерозрахунковий період;

m – показник втоми;

$\sum N$ – сумарна інтенсивність руху.

Згідно з [150] показник втоми m визначають експериментально відповідно до [151], однак це не є можливим, оскільки даний стандарт не установлює метод визначення даного показника. На практиці показник m

приймають відповідно до [152], але в цьому випадку крива нахилу до осі абсцис буде мати занадто великий кут, що характеризує практично миттєве руйнування асфальтобетону.

Відповідно до [177] механізм втомного руйнування асфальтобетону можна представити як чотиристадійний:

1. Асфальтобетон при циклічному навантаженні руйнується внаслідок утворення і розвитку мікротріщин відриву. Цей процес розвивається в місцях концентрації напружень, які виникають внаслідок неоднорідності структури. Мікропластичні деформації в перенапружених ділянках сприяють перерозподілу і вирівнюванню напружень та гальмують процес утворення мікротріщин.

2. Утворенню і розкриттю мікротріщин передують розпушення структури асфальтобетону внаслідок руху дислокацій і накопичення вакансій. При циклічному навантаженні вторинне поле напружень зазнає великих змін і коливань, що різко прискорює рух дислокацій, накопичення вакансій і утворення мікротріщин; до граничного стану доводиться відносно більший обсяг матеріалу. Все це призводить до більш швидкого зростання деформацій, підвищує ймовірність руйнування матеріалу і обумовлює зниження межі міцності зі збільшенням числа навантажень.

3. Процес втомного руйнування найбільш сильно розвивається в контактній зоні, а також в околицях дефектів структури.

4. Швидкість навантаження або деформації робить помітний вплив на поведінку матеріалу при пульсуючому навантаженні.

Зазвичай втомні властивості матеріалів оцінюють за кривими втоми, побудованими експериментальним шляхом. Дослідження А. О. Салля дозволили отримати залежність втомної міцності від кількості циклів навантаження для піщаного асфальтобетону [153]:

$$\lg \sigma = \lg \sigma_0 + m \lg n, \quad (1.2)$$

де σ – діюче напруження в матеріалі, Н/см²;

σ_0 – міцність матеріалу, що визначається при тривалості дії навантаження, яке відповідає одному циклу, Н/см²;

m – показник втоми;

n – кількість циклів до утворення тріщин.

R. N. Saal і P. S. Pell отримали наступну залежність для опису втомної поведінки асфальтобетону [154]:

$$\lg \frac{\sigma}{\sigma_0} = - \frac{1}{n} \lg N, \quad (1.3)$$

де N – кількість повторних навантажень, які витримує асфальтобетон до руйнування.

Таким чином, для оцінювання втомної довговічності матеріалу необхідно знати показник втоми (m) і кількість циклів до руйнування (N) [154].

А. В. Руденським було встановлено зв'язок між кількістю циклів, яке витримує матеріал до руйнування, і величиною діючого напруження або ж величиною деформацій, що виникають в матеріалі. Відповідно до цього зв'язку (рисунок 1.2), нахил $\lg \sigma - \lg N$ характеризує втомні властивості матеріалів [155].

Виходячи з цього, можна визначити показник втоми:

$$\operatorname{tg} \alpha = m = \frac{\lg \sigma_1 - \lg \sigma_2}{\lg N_2 - \lg N_1}, \quad (1.4)$$

де m – показник втоми;

N_2 – кількість циклів до руйнування при напруженні σ_2 ;

N_1 – кількість циклів до руйнування при напруженні σ_1 .

Результати досліджень показали, що отримані значення коефіцієнтів втоми можуть змінюватися в межах від 0,18 до 0,40.

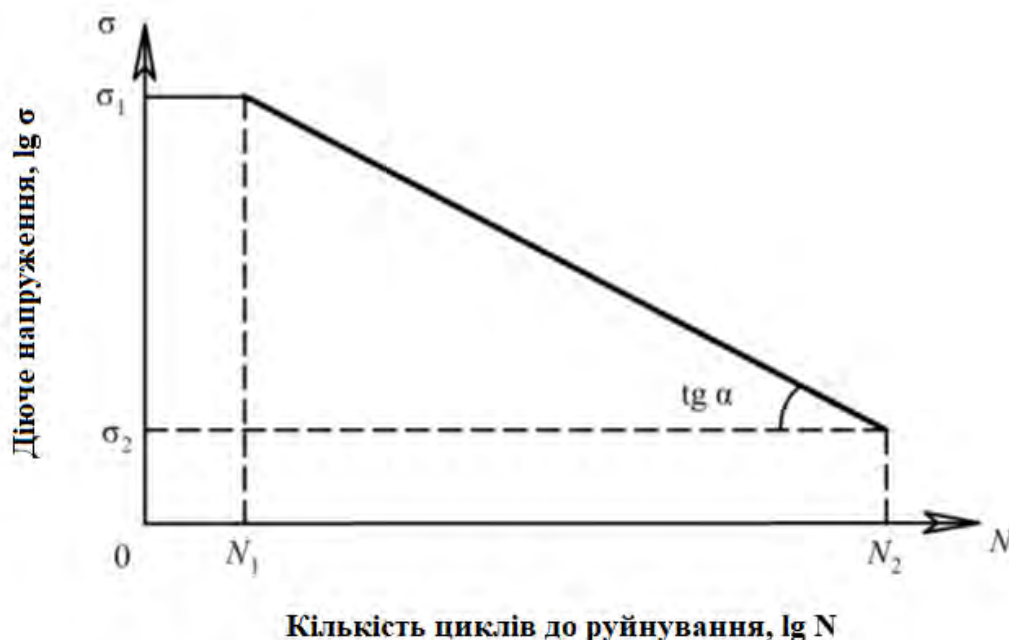


Рисунок 1.2 — Зв'язок між кількістю циклів навантаження асфальтобетону до руйнування і величиною напруження

Оскільки зі зміною температури асфальтобетону нахил лінії $\lg \sigma - \lg N$ буде змінюватися, то при прогнозуванні втомної довговічності асфальтобетону в дорожньому покритті необхідно врахувати, що експлуатаційні навантаження навіть однакового розміру, діючи при різних температурних умовах, вносять різний внесок у втомне руйнування матеріалу [155].

В даному випадку втомну довговічність А. В. Руденський пропонує описувати наступною залежністю [155]:

$$N = N_p \frac{1}{\sum P_i \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_i} \right)^m}, \quad (1.5)$$

де N_p – довговічність при дії розрахункового напруження σ_p ;

P_i – частка циклів з амплітудою напруження σ_i ;

m – показник втоми.

У роботі [87] встановлено, що відношення між кількістю циклів до руйнування і напруженням для щільних асфальтобетонів може бути описано формулою:

$$N = c \cdot \left(\frac{S}{\sigma} \right)^b, \quad (1.6)$$

де N – загальна кількість циклів до руйнування;

c , b – постійні, встановлені емпіричним шляхом,
 $c = 1,44 \times 10^{-16}$, $b = 5 - 6$;

S – жорсткість асфальтобетону, МПа;

σ – прикладене згинаюче напруження, Н/см².

Таким чином, втомна довговічність асфальтобетону в першу чергу залежить від величини напруження, а не від амплітуди розтягування.

У роботі [156] відзначено, що залежність довговічності різних матеріалів, до яких відноситься і асфальтобетон, від величини діючого напруження в умовах динамічної втоми може описуватися рівнянням:

$$N = \left(\frac{R_{\text{ц}}}{\sigma} \right)^m, \quad (1.7)$$

де N – кількість циклів до руйнування;

m – постійна, що характеризує втомні властивості матеріалу;

$R_{\text{ц}}$ – міцність матеріалу при руйнуванні за один цикл прикладання напруження, МПа;

σ – дійсне напруження, Н/см².

Однак дана залежність не може в повній мірі охарактеризувати довговічність асфальтобетону в реальних умовах роботи, тому що вона не враховує температурні умови, швидкість автомобіля, конструктивні особливості дороги тощо.

У зв'язку з цим Г. С. Бахрах пропонує залежність:

$$N = 0,40 \cdot b^{1/2} \cdot \nu \cdot x_a^{-1} \cdot \sigma^{-b} \cdot C \cdot \exp\left(\frac{U}{R \cdot \theta}\right), \quad (1.8)$$

Ця залежність дозволяє визначити кількість циклів, яке може витримати дорожнє покриття до появи втомних тріщин, що враховує як

константи матеріалу, включаючи його температурну чутливість (b , C , U), так і конструктивні особливості дороги, що визначають величину розтягуючого напруження (σ) і опис чаші прогину (x_a), температурні умови роботи покриття (Θ) і швидкість руху розрахункового автомобіля (v_a) [156].

Автор вважав, що підстановка цієї формули в рівняння динамічної втоми дозволить на стадії проектування оцінювати і порівнювати витривалість асфальтобетону в різних шарах. Однак дана формула не знайшла практичного застосування в зв'язку зі складністю визначення великої кількості експериментальних вихідних даних.

В роботі [157] А. В. Руденський зазначив, що оскільки співвідношення модулів пружності асфальтобетону, пов'язане з тривалістю дії навантаження формулою: $E_1/E_2 = (t_2/t_1)^m$ то, відповідно, більшому терміну служби дорожнього покриття буде відповідати більше значення розрахункового модуля пружності матеріалу. Розрахункове значення модуля пружності асфальтобетону E_p з урахуванням втоми в першому наближенні може бути визначено за формулою з урахуванням коефіцієнта втоми:

$$E_p = E_{\text{табл}} \left(\frac{t_m}{t_{\text{см}}} \right)^m, \quad (1.9)$$

де $E_{\text{табл}}$ – розрахункове значення модуля пружності, МПа;

m – коефіцієнт втоми;

$t_{\text{см}}$ – термін служби покриття при $E_{\text{табл}}$;

t_m – термін служби покриття в реальних умовах.

Коефіцієнт втоми пропонується визначати наступною залежністю [157, 158].

$$m = K \cdot P \cdot \lg e (\lg e - P \lg t_0)^{-1}, \quad (1.10)$$

де K – коефіцієнт, що характеризує особливості складу асфальтобетону та умови його роботи у покритті;

P – показник пластичності асфальтобетону;

e – основа натурального логарифма;

t_0 – тривалість циклу навантаження, с.

Б. Г. Печений досліджував втомну довговічність бітумомінеральних композицій при постійній деформації і запропонував визначати втомну довговічність, залежно від амплітуди прикладеної деформації ε з використанням залежності [159]:

$$N = k \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^n, \quad (1.11)$$

де N – число циклів до руйнування;

k – коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалу;

n – постійна, встановлена емпіричним шляхом.

Також Б. Г. Печений встановив, що для бітумомінеральних композицій зі збільшенням в'язкості бітумів при випробуванні з постійною деформацією ε , що дорівнює 10^{-4} м, втомна довговічність N може зростати за залежністю [159]:

$$N = 6,03 \lg \left[100 \frac{V_6}{V_6 + V_n} \right] + 5,99 \lg T_p - 16,34, \quad (1.12)$$

де V_6 – об'ємний вміст бітуму, %;

V_n – залишкова пористість, %;

T_p – температура розм'якшеності бітуму, °С.

Останні роботи з дослідження втоми асфальтобетону, виконані в США і в Європі [160, 161], для визначення числа циклів до руйнування пропонують використовувати схожу на (1.11) залежність, проте з урахуванням модуля пружності асфальтобетону:

$$N = k_1 \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^{k_2} \left(\frac{1}{E} \right)^{k_3}, \quad (1.13)$$

де N – число циклів до руйнування;

k_1, k_2, k_3 – лабораторні параметри, отримані для заданих умов випробування;

ε – деформація зразка асфальтобетону, мм;

E – модуль пружності асфальтобетону, МПа.

Важливе значення для терміну служби асфальтобетонного покриття за критерієм втомного руйнування має його товщина [6].

$$T = \left(\frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_n} \right)^{4,75} T_\delta, \quad (1.14)$$

де T і T_δ – термін служби асфальтобетонного покриття за заданого і допустимого прогину покриття відповідно;

ε_q і ε_n – деформація (прогин) в покритті при n циклах за допустимого пружного прогину або при будь-якому іншому значенні прогину покриття відповідно.

В роботі [162] визначаючим внутрішнім фактором опору асфальтобетонів багаторазовим повторним навантаженням є вид і властивості бітумного в'язучого:

$$N = \left(\frac{\varepsilon_\sigma^{max}}{\varepsilon} \right)^n, \quad (1.15)$$

де N – кількість повторних навантажень, що викликають руйнування матеріалу;

ε – максимальна амплітуда відносної деформації плівкового бітуму при кожному циклі «навантаження - розвантаження»;

ε_σ^{max} – максимальна відносна деформація в бітумній плівці від навантаження, одноразове короткотривале прикладання, що призводить до руйнування матеріалу;

n – константа для даного матеріалу.

Величина ε_σ^{max} залежить від розтяжності і когезії даного бітуму при певних температурних умовах і характеризує міцність бітумної плівки і товщину її структурованої зони [162, 163]. Тому за інших рівних умов довговічність N бітумомінерального матеріалу буде тим вище, чим менше величина середнього відносного подовження ε_σ бітумних плівок в кожному циклі повторного навантаження.

Проаналізувавши перераховані вище дослідження, можна зробити висновок про те, що найбільш інформативними критеріями оцінювання втомної довговічності асфальтобетонів є: кількість циклів до руйнування N і коефіцієнт втоми m .

Висновки до розділу 1

1. Аналіз науково-дослідних робіт, присвячених старінню бітуму, показав, що його властивості змінюються безперервно впродовж всього життєвого циклу.

2. Під дією тепла, світла, кисню повітря, води та інших чинників у бітумі відбуваються зворотні та незворотні зміни властивостей. Зворотні зміни пов'язані з перебудовою надмолекулярної структури бітуму. Незворотні зміни супроводжуються протіканням внутрішніх фізико-хімічних процесів, внаслідок яких відбувається зміна хімічного складу бітуму. Він втрачає здатність чинити опір зовнішнім навантаженням та дії агресивного зовнішнього середовища, що з часом призводить до руйнування асфальтобетонного покриття в цілому.

3. Структурні перетворення бітуму в процесі старіння полягають в перетворенні з рідкої дисперсної структури смол в коагуляційну структуру асфальтенів. На початковій стадії цей перехід призводить до певного поліпшення структурно-реологічних властивостей бітуму і тому може розглядатися як один із засобів спрямованого структуроутворення у бітумі, що знаходиться в покритті, правда, у тому випадку, якщо початкова в'язкість і міцність бітуму з рідкою структурою смол мала.

4. Схильність бітумів до старіння визначається великим числом чинників, до яких належать: природа сировини, технологія виробництва бітуму, компонентний склад бітуму тощо. Окиснені бітуми займають проміжне положення між бітумами, отриманими на основі крекінг залишків, найбільш схильних до швидкого старіння, і залишкових бітумів, найбільш стійких до старіння.

5. Найбільш інформативними критеріями оцінювання втомної довговічності асфальтобетонів є кількість циклів до руйнування N і коефіцієнт втоми m .

Результати досліджень першого розділу викладено у наступних публікаціях: [77, 91, 100, 126].

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Старіння бітумних в'язучих є однією з ведучих причин руйнування асфальтобетонних покриттів. Загалом воно призводить до затвердіння в'язучого та врешті переходу його із в'язко-пластичного в крихкий стан, що супроводжується руйнуванням під дією транспортних засобів. Старіння бітуму починається безпосередньо після його вивантаження з виробничих колон, при зберіганні у ємностях, перевантажень в транспортні засоби транспортуванні, розвантаженні в у бітумосховище, технологічній підготовці для змішування з нагрітими до високої температури мінеральними матеріалами, перемішуванні суміші, її зберіганні у силосах-накопичувачах, транспортуванні суміші на об'єкти, розвантаженні, укладанні суміші та її ущільненні. Цей період життєвого циклу бітумів та асфальтобетонних сумішей розглядається як період технологічного (короткострокового) старіння.

Процес старіння (затвердіння) на цьому етапі відбувається за двома механізмами. Перший – це випаровування з в'язучого при високих температурах летких вуглеводнів, до яких в першу чергу відносяться ароматичні та парафіно-нафтеніві, які мають відносно низьку температуру кипіння. Другий – це процес радикально-окиснювальної полімеризації, що призводить до переходу ароматичних вуглеводнів в смоли, а смол в асфальтени. В обидвох випадках старіння бітуму супроводжується його затвердінням. Затвердіння бітуму як термопластичної речовини відбувається і при зниженні температури. Щоб диференціювати вплив різних факторів доцільно вживати поняття твердіння при старінні подібно прийнятому в міжнародних стандартах.

З моменту відкриття руху бітум продовжує твердіти під дією атмосферно-кліматичних та транспортних факторів у тілі асфальтобетону,

змінюючи його властивості. Цей життєвий цикл бітуму розглядається як період експлуатаційного старіння.

В обох процесах (фізичних та хімічних) відбувається зміна складу бітуму. Зважаючи на те, що процеси радикальної полімеризації безпосередньо пов'язані з температурою і протікають швидше при її підвищенні, можна вважати, що цей механізм превалює на технологічній стадії старіння. Зміна складу призводить до зміни властивостей бітумів. При цьому вплив на затвердіння при технологічному старінні залежить від хімічних властивостей складових. Згідно результатів Л. М. Гохмана [105, 106], кожна складова може характеризуватись технічними показниками, які використовуються для оцінки якості самих бітумів. Розглядаючи бітуми як двофазні системи, в яких середовищем є мальтенова складова, а асфальтени фазою, можна оцінити вагомість внеску кожної складової середовища на критерії агрегатного стану бітумів (температури розм'якшеності та крихкості). Таким чином, вплив масел на температуру розм'якшеності залежить від їх структури та складу. Температура розм'якшеності становить для парафіно-нафтових вуглеводнів (ПНВ) 39 °С, моноциклічних вуглеводнів (МЦВ) – 20 °С, біциклічних вуглеводнів (БЦВ) – 10 °С, поліциклічних вуглеводнів (ПЦВ) – 11 °С. Зміни вмісту цих вуглеводнів в бітумі, за виключенням ПНВ, не може призвести до значних змін температури розм'якшеності. Найбільш активною складовою в цьому аспекті є смоли. При цьому спирто-бензольні смоли вдвічі активніші (73 °С) ніж петролейно-бензольні (37 °С).

У випадку температури крихкості має місце зворотня тенденція – масла грають пріоритетну роль, бо температура крихкості становить: парафіно-нафтових вуглеводнів – мінус 70 °С, моноциклічних та ароматичних – мінус 50 °С; біциклічних ароматичних – мінус 30 °С; поліциклічних ароматичних – мінус 32 °С. З цього витікає, що масла мають значний вплив на температуру крихкості бітумів. Але найбільш впливовими серед складових мальтенів, як і у випадку температури розм'якшеності є

смоли: петролейно-бензольні смоли мають температуру крихкості 1 °С, спирто-бензольні смоли – 22 °С. Таким чином смоли сприяють значному підвищенню температури розм'якшеності, але значно підвищують температуру крихкості.

Розгляд впливу складових мальтенової фракції не є достатнім для прогнозування властивостей бітумів особливо різних структурних типів: золь, золь-гель, гель [18]. Для об'єктивного уявлення про властивості дисперсних систем необхідно враховувати роль дисперсної фази, якою у бітумі є асфальтени. Вплив асфальтенів на технічні та реологічні властивості бітумів деякою мірою залежить від їх якості. Це особливо стосується асфальтенів термічного крекінгу. В той же час характер дії асфальтенів вакуумної переробки та окиснення важких гудронів мало відрізняються структуруючою здатністю відносно мальтенів (межі зміни критичної концентрації не перевищують 1,5 % [18]. Після досягнення критичної концентрації (вище 15 – 16 %) подальше збільшення їх вмісту різко змінює консистенцію бітумів, оцінювану за в'язкістю, пенетрацією, температурою розм'якшеності та крихкості.

Існують дещо різні кількісні та однозначно якісні оцінки впливу асфальтенів на перелічені показники [18, 51, 107]. Виходячи з результатів Б. Г. Печеного [51], можна прийняти, що кожний відсоток асфальтенів в бітумі більше 10 % підвищує температуру розм'якшеності на 1,2 °С. Прийняте критичне значення асфальтенів (10 %) за температурою розм'якшеності дещо відрізняється від отриманого А. С. Колбановською (15 %). Що стосується температури крихкості, то в [107] показано, що додавання 1 % асфальтенів до мальтенової складовою підвищує температуру крихкості на 0,5 °С. Деякі протиріччя відносно впливу асфальтенів на характеристики бітумів можуть бути пов'язані з тим, що мальтенова складова одного бітуму може відрізнятися від мальтенової складової іншого бітуму. Саме з цих причин нафтовики США вказують

нафту використану для виробництва бітуму: мексиканську, венесуельську, каліфорнійську, Борнео, Кувейт.

Для якісного уявлення впливу зміни складу бітумів вцілому та при старінні безпосередньо, було проаналізовано вплив складових (вуглеводнів, смол, асфальтенів) на основні показники якості бітумів – температури розм'якшеності та крихкості.

Аналітичний аналіз базувався на факті встановлення Л. М. Гохманом [105, 106] температури розм'якшеності, крихкості та когезії вуглеводнів, що входять до складу бітумів. Значення цих показників складає такий ряд (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Фізико-технічні властивості компонентів бітуму

Ч. ч.	Показники властивостей	Складові, %					
		масла			смоли		
		ПНВ	МЦА	БЦА	ПЦА	ПБС	СБС
1	Температура розм'якшеності, °С	39	20	10	11	37	73
2	Температура крихкості, °С	-70	-50	-30	-32	1	22
3	Ступінь старіння за когезією	32	353	46	–	6,7	3,4

Ці вуглеводні входять до складу мальтенової складової бітумів. Надзвичайно широкий діапазон ознак вуглеводнів свідчить про те, що зміни їх співвідношення має супроводжуватись зміною значень показників. Особливої уваги в аспекті цієї роботи заслуговує показник ступеню старіння за співвідношенням значень когезії до та після старіння. Оскільки когезія знаходиться у тісному зв'язку з пенетрацією [11], то співвідношення значень пенетрації до та після старіння може бути одним з обґрунтованих критеріїв старіння.

Оскільки бітуми є сумішшю різних вуглеводнів з відомими значеннями їх властивостей, до них може бути прийнятним правило М. Гордона та Д. Тейлора для полімерних сумішей. У відповідності з цим правилом показник властивостей суміші різного складу може бути

визначений співвідношенням вмісту окремих компонентів на значення їх показників.

Для цілей цієї роботи було використано дані А. С. Колбановської [18], Л. М. Гохмана [106], В. В. Маляра [178]. Вихідні дані трьох бітумів до та після старіння наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Груповий склад бітумів

Битум	масла					смоли			Асфальтени
	ПН	МЦА	БЦА	ПЦА	Разом	ПБС	СБС	Разом	
Гель Гохман	20,3	9,4	13,1	4,7	47,5	8,9	11,7	20,6	31,9
	791,7	188,0	131,0	51,7		329,3	854,1		
	-1421,0	-470,0	-393,0	-150,4		8,9	22,0		
Золь 1706	2,1	12,4	19,8	8,4	42,7	19,0	18,7	37,7	19,6
	81,9	248,0	198,0	92,4		703,0	1365,1		
	-147,0	-620,0	-594,0	-268,8		19,0	411,4		
Золь-гель 1003	13,2	9,4	21,4	8,4	46,7	19,0	12,2	29,1	24,3
	514,8	188,0	214,0	92,4		703,0	890,6		
	-924,0	-470,0	-642,0	-268,8		19,0	268,4		

В той же час це правило діє тільки для дисперсійного середовища бітуму. Його властивості, як всіх колоїдних систем, змінюються при додаванні до них дисперсних систем (фази), яка структурує мальтенову складову (середовище). Моделі таких бітумних сумішей масел, смол, асфальтенів значною мірою вивчені А. С. Колбановською [18], Л. М. Гохмана [105, 106], Б. Г. Печеного [51], Quedeville [107]. Аналіз цих робіт дозволяє припустити, що перехід від мальтенового середовища до бітуму розпочинається, як було зазначено вище, при введенні в середовище (10 – 15) % асфальтенів. У випадку, коли середовищем є власне бітум структуруюча дія полімерів відповідає меншому їх вмісті (3 - 4) %, бо полімери мають більш розгалужену структуру та молекулярну масу ніж бітуми. Досліджуючи композиційні бітуми Б.Г. Печений [50], прийшов до висновку, що в ведення в мальтенове середовище асфальтенів більше 10 %

призводить до підвищення температури розм'якшеності на 1,2 °С кожен 1 % асфальтенів. Саме такий підхід прийнято для визначення температури розм'якшеності. В свою чергу Quedeville [107] на основі дослідження складу та властивостей бітумів з різних нафт та різним вмістом асфальтенів встановив, що кожне підвищення в мальтеновій фракції бітумів знижує температуру крихкості на 0,5 °С. Ці результати використовували для розрахунку температур розм'якшеності (визначаючи кількість асфальтенів поверх 10 %) та для розрахунку температури крихкості (шляхом перерахунку кількості асфальтенів в градуси Цельсія).

В першу чергу було оброблено результати досліджень А. С. Колбановської [18] трьох типів бітумів, які піддавались старінню прогрівом у тонкому шарі за температури 160 °С протягом часу, достатнього для досягнення кожним бітумом максимуму когезії, що трактувалось А. С. Колбановською, як досягнення межі старіння, за якою йде руйнування просторової структури бітумів. Різні за складом бітуми досягали цієї межі за різний час: бітуму типу гель за 3 год, золь-гель – за 11 год, золь – 19 год (таблиця 2.3). Прийняті об'єкти можна ідентифікувати як дистиляційні (золь) та окиснені (золь-гель).

Таблиця 2.3 – Температури розм'якшеності бітумів за груповим складом до та після старіння

Внесок складових	Золь		Золь-гель		Гель	
	Вихідний	Старіння 19 год	Вихідний	Старіння 11 год	Вихідний	Старіння 3 год
Мальтени	31,2	37,0	35,7	46,8	24,7	29,8
Асфальтени	7,4	33,1	14,2	31,4	21,5	34,3
Бітум	38,6	70,1	49,9/47,5	78,3	46,2/48,5	64,1
Примітка. У знаменнику експериментальні значення.						

Оброблення вихідних даних за прийнятим методом показало наступне. Вклад асфальтенів у температуру розм'якшеності бітумів зростає більше для бітумів типу золь, в якому до старіння було найменше асфальтенів (12,4 %) та найменше для бітуму типу гель (27,9 %). В той же час швидкість досягнення критичної межі старіння становить для бітумів:

золь 1,7 °C/год, золь-гель – 2,6 °C/год, гель – 5,9 °C/год. При цьому приріст температур розм'якшеності становив: 31,5 °C, 28,4 та 17,9 °C.

Отримані таким чином температури розм'якшеності для бітуму золь-гель – 49,9 °C (експериментально 47,5 °C, за груповим складом 49,9 °C), а для бітумів типу гель відповідно 48,6 °C.

Результати обробки даних [105, 106] наведено в таблиці 2.4, таблиці 2.5 та таблиці 2.6.

Таблиця 2.4 – Температура розм'якшеності бітумів за груповим складом та експериментом

Внесок складових	Золь 22		Золь-гель 32		Гель 12	
	Маляр	Гохман	Маляр	Гохман	Маляр	Гохман
Мальтени	30,9	33,5	34,8	32,5		34
Асфальтени	15,7	11,5	16,8	17,5	18	
Бітум	46,6/47	45/45	51,6/48	50/52	52,6/50	

Таблиця 2.5 – Температури крихкості бітумів за груповим складом та експериментом

Внесок складових	Золь		Золь-гель		Гель	
	Гохман	Маляр	Гохман	Маляр	Гохман	Маляр
Мальтени	–14,9	–17	–2,4	–20,3	–32	–21,8
Асфальтени	9,8	12	12	12	16	12,5
Бітум	–5,1/–9	–5,0/–18	–12/–15	–8,3/–22	–16/–16	–9,4/–23

Таблиця 2.6 – Температури крихкості бітумів за груповим складом до та після старіння

Внесок складових	Золь		Золь-гель		Гель	
	Вихідний	Старіння	Вихідний	Старіння	Вихідний	Старіння
Мальтени	–21,9	–23,3	–24,4	–13,4	–28,6	–28,1
Асфальтени	6,2	18,8	10,9	18,1	14,0	19,3
Бітум	–15,7	–4,5	–13,5/–20	4,7	–14,6–18	–8,8

Згідно отриманих даних розраховані за груповим складом температури розм'якшеності та визначені експериментально за виключенням одного бітуму відрізняються не більше ніж на 2 °C. В обох серіях мальтенова складова температури розм'якшеності значно перевищує

асфальтенову. Це зумовлено наявністю в бітумах спиртобензольних смол. Роль асфальтенової складової зростає по мірі переходу від бітумів з структурою золь до бітумів з структурою гель. Що стосується температури крихкості, то роль асфальтенів та смол особливо спиртобензольних, змінюється на протилежну. Те ж саме відноситься і до вуглеводнів з температурою розм'якшеності $39\text{ }^{\circ}\text{C}$ та температурою крихкості мінус $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вони сприяють покращенню обох показників, але вони знижують зчеплення з поверхнею кам'яних матеріалів, особливо кислих порід та уявляють собою несприятливе середовище щодо взаємодії з асфальтенами.

Аналогічна ситуація зі значеннями температури крихкості. При цьому зберігається тенденція зміни цієї температури залежно від типу бітуму, але розходження розрахункових результатів значне, що може бути пов'язано зі значною величиною похибки, яка нормується для цього показника ($3\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Розраховані за груповим складом температури крихкості в значній мірі визначаються мальтеновою фракцією.

Наведені вище тенденції взаємозв'язку між температурами розм'якшеності та крихкості і груповим складом для різних бітумів і особливо різниця між цими температурами до та після старіння свідчать, що найбільш прийнятним для оцінки старіння є груповий склад. Для цього може також використовуватись спектральний інфрачервоний аналіз. Характерними полосами поглинання, що дозволяють оцінити ступінь старіння бітумів є частоти, що відповідають гідроксильним групам та сірчаноксильним групам. За даними [109] індекс старіння за цими групами зменшується практично у прямолінійній залежності від зміни модулів накопичення та модулю втрат. Значення індексу гідроксильних груп зростає від 0 до 1,5 після RTFOT та до 4,7 після RTFOT та PAV. Індеси сульфоксильних груп змінюється в більшій мірі від 1,5 до 10,2 при тих же умовах випробування. В той же час цей метод більш прийнятний для довгострокових випробувань при помірній температурі ($85\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Продовження часу витримування від 4 год до 48 год призводить до збільшення цих показників в (4 – 10) разів. При цьому penetрація бітумів змінюється у 2,4 рази, а температура розм'якшеності від 56,5 °С до 67,6 °С. Складні умови виконання експерименту та ідентифікації його результатів наразі є головною перешкодою для виробничого його використання.

Радикальний механізм затвердіння бітумів у часі, що в значній мірі відповідає технологічному стану, може плідно досліджуватись методом парамагнітного резонансу. Такий підхід використовувався для з'ясування механізму взаємодії мінеральних матеріалів з бітумом. Кількість вільних радикалів в бітумі зростає в процесі нагрівання, що призводить до посилення реакцій окислювальної полімеризації, яка лежить в основі технології отримання бітумів окислюванням. При цьому процеси радикальної полімеризації продовжуються на всіх технологічних стадіях, що призводить до затвердіння окислених бітумів, більшого ніж бітумів отриманих вакуумною дистиляцією [110].

Використання фізико-механічних методів дослідження сприяє пізнанню властивостей та процесів, які є об'єктом досліджень того чи іншого методу. В результаті увага зосереджується на закономірностях, що рельєфно розкриваються саме тим чи іншим методом. В той же час старіння, навіть в межах технологічної його стадії є наслідком протікання багатьох процесів. В зв'язку з цим виникає необхідність використання методів і критеріїв визначення старіння бітумів, які дозволяли б оцінити та прогнозувати властивості асфальтобетонів на їх основі. Ці методи в основному включені до вітчизняних, європейських та американських стандартів. До них можна віднести показник консистенції за в'язкістю та супротивом зсуву (когезією), що тісно пов'язані з penetрацією [11]. Умовними показниками агрегатного стану бітуму є температура розм'якшеності за penetрацією та температури крихкості, а також комплексні модулі зсуву, які включені в систему Superpave. В зв'язку з цим задача дослідження полягає у визначенні методів, які в найбільшій мірі

віддзеркалюють умови технологічного старіння, та критеріїв, які в найбільшій мірі дозволяють оцінити зміни, що проходять в бітумі при технологічних температурах у часі.

Як зазначалося, в Україні стійкість бітумів до технологічного старіння оцінюють за зміною консистенції бітуму за помірних та високих експлуатаційних температур. В той же час без уваги залишається низькотемпературна поведінка бітуму. При цьому встановлено обмеження до граничної зміни цих показників.

Очевидно під час старіння змінюються й інші властивості бітуму, зокрема його температура крихкості, розтяжність за температури 25 °С, розтяжність за температури 0 °С, динамічна в'язкість тощо.

Залежно від умов випробування процесу старіння бітуму будуть відбуватися по різному. Відповідно до ДСТУ 4044 [78] стійкість бітумів до старіння оцінюють після його витримування у тонкій плівці згідно з положеннями ГОСТ 18180 [71]. При цьому, можна припустити, що старіння бітуму за об'ємом відбувається нерівномірно, оскільки в процесі випробування безпосередньо з повітрям контактує тільки поверхня бітуму, при цьому швидкість окиснення всього об'єму бітуму буде залежати як від початкової в'язкості бітуму так і від швидкості зміни в'язкості бітуму на поверхні зразка.

Як показано в роботі [103] під час витримування бітуму в сушильній шафі за температури від 150 °С до 250 °С впродовж від 2 год до 24 год відбувається зниження penetрації бітуму. Після певного періоду часу зниження penetрації перестає змінюватися, при цьому цей період залежить від температури випробування. Найбільший такий період характерний для температури випробування 150 °С, найменший – для 225 °С, за температури 250 °С даний період взагалі не спостерігається.

Автори [103] пов'язують таке явище з утворенням на поверхні бітуму окисної плівки, що затрудняє дифузію кисню в об'єм бітуму. При подальшому витримуванні бітуму плівка стає крихкою, розтріскується, що супроводжується окисненням матеріалу.

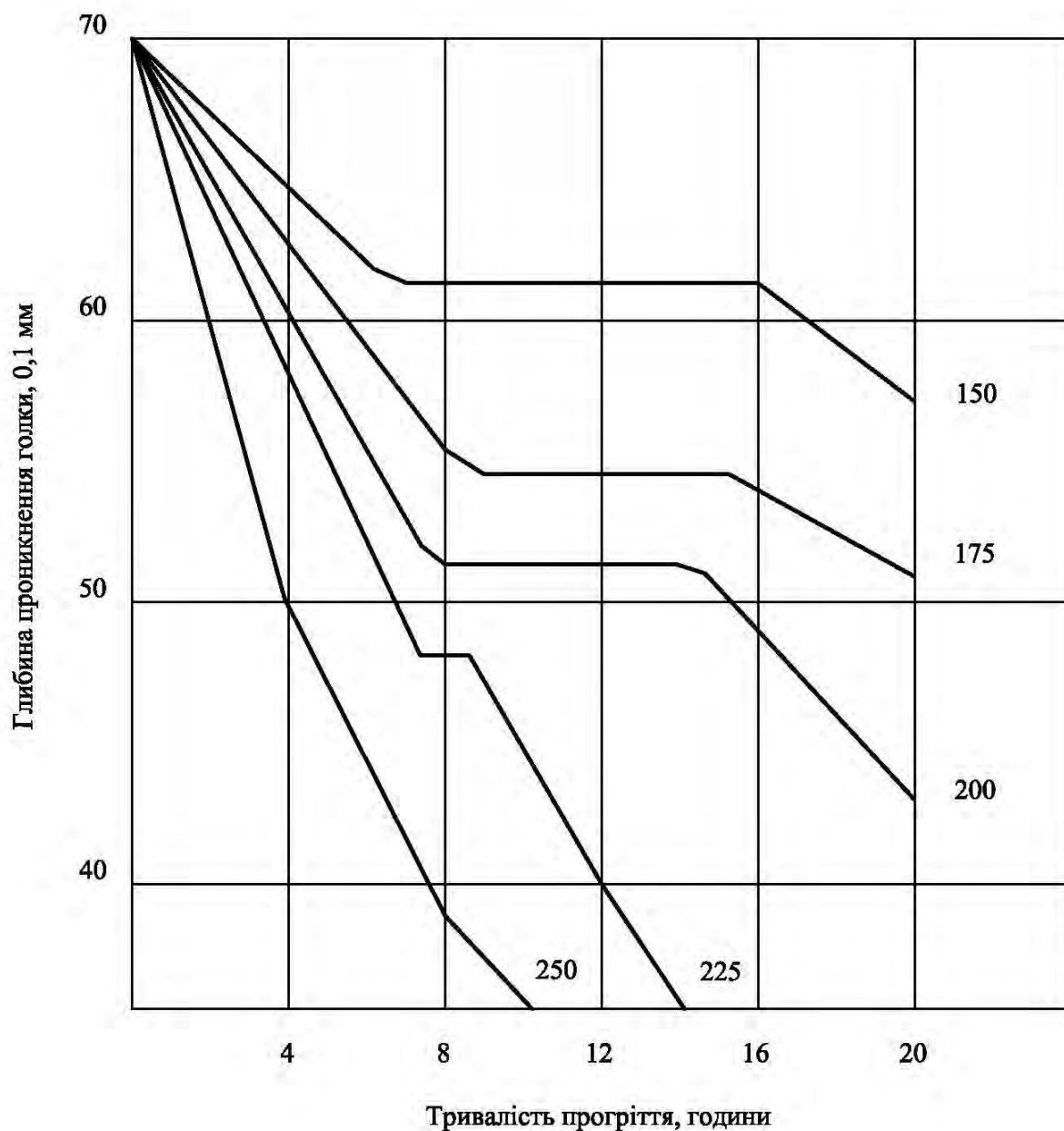


Рисунок 2.1 – Зміна глибини проникності голки бітуму при прогріванні

Ймовірно характер утворення та руйнування захисної окиснювальної плівки буде залежати також від стійкості бітуму до старіння. Чим більш стійким до старіння буде бітум, тим меншою буде швидкість утворення даної плівки, і навпаки, із зменшенням стійкості бітуму до технологічного старіння, швидкість утворення захисної окиснювальної плівки буде зростати, що спотворюватиме результати випробування. Тобто, теоретично нестійкі до окиснення бітуми за результатами випробування будуть вважатися стійкими.

З розробленням методу RTFOT вдалося уникнути даного явища, саме тому в країнах Європейського союзу та США для арбітражного оцінювання стійкості бітумів до старіння використовують саме цей метод.

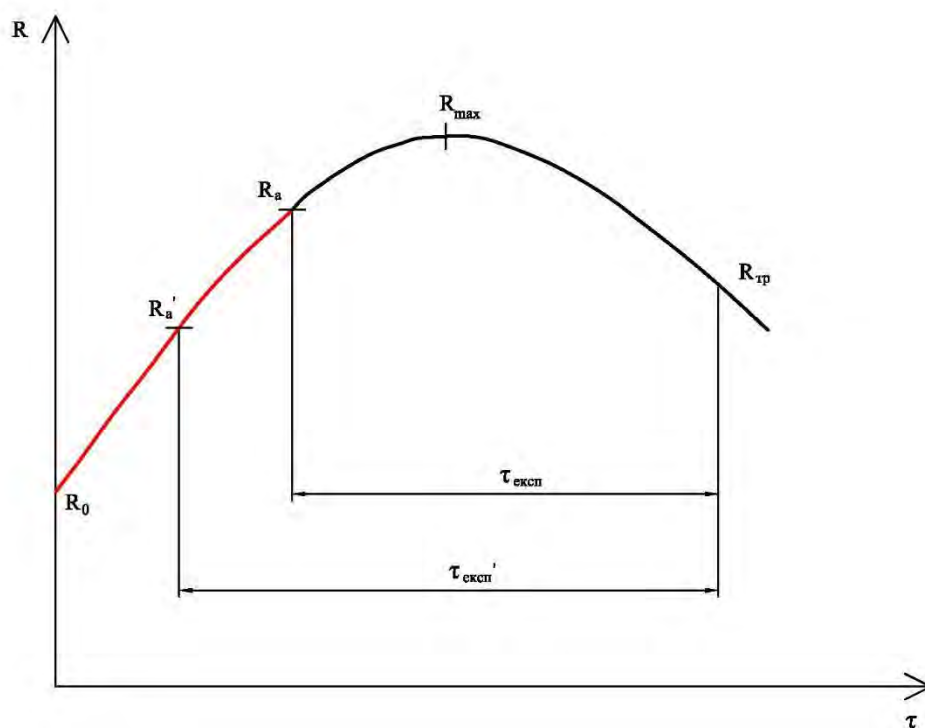
Використання бітумів для виробництва асфальтобетонних сумішей без врахування впливу технологічних температур, що знижують їх фізико-технічні властивості, призводить до передчасного руйнування асфальтобетону, адже бітум, що міститься в покритті за своїми властивостями вже не відповідає вимогам, які пред'являються до нього на етапі проектування. Найбільш чутливою характеристикою зістареності є консистенція або в'язкість бітуму, що умовно визначається таким стандартним показником як пенетрація за температури 25 °C.

Діючими нормативними документами встановлено вимоги до вибору бітумів для виробництва асфальтобетонних сумішей залежно від кліматичних умов роботи асфальтобетонних покриттів та області застосування асфальтобетонних сумішей [10]. Оптимальним можна вважати бітум марки БНД 60/90, який можна використовувати на будь-якій категорії дороги незалежно від районування за кліматичними умовами роботи асфальтобетонного покриття. Про найбільш широке використання бітуму марки БНД 60/90 також свідчать результати моніторингу бітумів, які використовували в Україні впродовж останніх 10 років.

У разі використання для виробництва асфальтобетонних сумішей не стійких до старіння бітумів це може стати причиною передчасного руйнування асфальтобетону насамперед в результаті впливу низьких температур, оскільки окиснювальні процеси супроводжуються зростанням теплостійкості бітуму (зниження пенетрації та зростання температури розм'якшеності) при одночасному зниженні його тріщиностійкості (підвищення температури крихкості та втрата пластичності за розтяжністю за температури 0 °C).

Так, за даними В. Д. Портнягіна [104], зміна міцності асфальтобетону в часі має залежність з чітко вираженим максимумом (рисунок 2.2). За низької стійкості бітумів до технологічного старіння до моменту початку експлуатації в покритті асфальтобетон вже має,

наприклад, міцність R_a , близьку до максимального значення $R_{\max}$, замість можливої R_a' (у випадку використання стійкого до технологічного старіння бітуму). Це призводить до того, що матеріалу в покритті залишається працювати до $R_{\text{тр}}$, практично тільки на низхідній гілці. При цьому фактичний строк експлуатації $\tau_{\text{експ}}$ асфальтобетонного покриття значно менше можливого $\tau_{\text{експ}}'$.



$R_{\max}$ - максимальне значення міцності; R_0 - початкове значення міцності; R_a - значення міцності на початку роботи асфальтобетону; R_a' - значення міцності, можливої у разі збереження якості в'язучого в період його підготовки, на початку роботи асфальтобетону; $R_{\text{тр}}$ - міцність асфальтобетону на початку інтенсивного тріщиноутворення ($P_{25} < 20 \times 0,1$ мм, $D_{25} < 10$ см, $T_p > 65$ °C).

Рисунок 2.2 – Зміна міцності асфальтобетону в часі

Виходячи з рисунку 2.2 збільшити строк експлуатації асфальтобетону в тому числі можна за рахунок підвищення стійкості бітумів до технологічного старіння.

Підвищити стійкість бітумів та асфальтобетонних сумішей до дії високих технологічних температур можна шляхом: використання інгібіторів старіння; поліпшення структури окиснених бітумів вітчизняного виробництва шляхом їх компаундування з дистиляційними бітумами або

продуктами нафтопереробки; зниження технологічних температур виробництва та укладання асфальтобетонних сумішей на основі використання спеціальних енергозберігаючих добавок [18, 72, 73, 88 - 100].

Проблема підвищення стійкості бітумів під час їх застосування зводиться до зменшення окиснювальних процесів, що відбуваються за дії кисню повітря. Для високополімерних матеріалів розроблені склади інгібіторів, що уповільнюють процеси окиснення. Більшість описаних в літературі інгібіторів належать до класів первинних і вторинних ароматичних амінів, ароматичних діамінів. Н.Н. Семенов [72] вказує на два можливі шляхи дії інгібіторів окиснення вуглеводнів:

1. Радикали R і RO_2 , що виникають в цьому процесі в результаті реакцій $R' + O_2 = RO_2'$; $RO_2' + RH = RO_2H + R'$ можуть легше реагувати з молекулою інгібіторів AH , чим з молекулою початкової речовини RH , завдяки тому, що зв'язок $A-H$ слабкіше, ніж зв'язок $R-H$. При реакції $RO_2' + AH = ROOH + A'$ чи реакції $R' + AH = RH + A'$ утворюється малоактивний радикал A' , який не в змозі реагувати з RH . Цей радикал з киснем утворює перекисний радикал інгібітору AO_2' , також малоактивний. При цьому реакційний ланцюг окиснення початкової речовини RH обривається.

2. Багато інгібіторів легко реагують з гідроперекисами і, таким чином, запобігають їх розпаду з утворенням вільних радикалів.

Введення антиокиснювальних добавок у бітуми дозволяє уповільнити старіння. Для цієї мети в роботі [73] використовують β -нафтол, танін, пірокатехін, сульфопіридин, а також мідні солі ефіру тіофосфорної кислоти, парафеніламін та ін. Треба зазначити, що в практиці застосування бітумів введення добавок інгібіторів не отримало досі поширення.

Введення до складу бітумів незначної кількості інгібіторів старіння сприяє пригніченню окиснювальних процесів, що викликають старіння бітуму, і, отже, підвищенню стійкості бітумів проти термоокиснювального

впливу. При цьому добавки інгібіторів менш помітно підвищують стійкість до старіння бітумів із залишків термічного крекінгу, чим стійкість бітумів I та II типів з продуктів прямої перегонки [18].

Проте можливий також інший шлях уповільнення старіння бітумів шляхом використання добавок на основі поверхнево-активних речовин (ПАР). ПАР можуть вплинути на незворотні процеси зміни бітумів під дією кисню повітря та температури. Старіння бітумів під впливом термоокиснювальних факторів зводиться до процесів виникнення, розвитку та руйнування жорсткої просторової структури з асфальтенів. Тому, можна припустити, що будь-які речовини, що перешкоджають утворенню просторової структури, сприятимуть уповільненню старіння, навіть не змінюючи при цьому процес окиснення, пов'язаний з підвищенням кількості асфальтенів.

Як зазначається в роботі [18], введення у бітум катіонактивних ПАР типу високомолекулярних амінів, що адсорбуються на асфальтенах і блокують місця їх можливих контактів, пов'язано із стабілізуючою дією та призводить до перетворення коагуляційної просторової структури на висококонцентровану безструктурну суспензію асфальтенів. Добавки групи амінів можуть використовуватись як добавки, що уповільнюють старіння бітумів з коагуляційною структурою, тобто типів I і III, разом з антиокисниками вуглеводнів. Для бітумів типу II, де коагуляційний каркас відсутній, застосування цих речовин неефективне.

В роботі [88] показано, що ПАР позитивно впливають на стійкість бітумів до технологічного старіння, однак при цьому знижується температура розм'якшеності бітуму, що вимагає використання ПАР з іншими модифікаторами.

Із розвитком технологій отримання ПАР, дані речовини можна розглядати як ефективний інгібітор старіння і їх використання повинно сприяти зниженню технологічного старіння бітумів за рахунок адсорбції на асфальтенах, перешкодженню утворення просторової структури з асфальтенів та перериванню реакцій окиснення.

Також з позиції підвищення стійкості бітумів до технологічних температур цікавим може бути використання полімерів, які поглинають масляну частину бітуму (найбільш нестійку до випаровування та старіння) та призводять до підвищення теплостійкості з одночасним збереженням низькотемпературних характеристик.

Виходячи з цього для умов України вкрай необхідно встановити залежність зміни властивостей бітуму за обома методи з використанням різних критеріїв, дослідити можливість підвищення стійкості бітумів до технологічних температур шляхом їх модифікування різними добавками та прийти до відповідних рішень з підвищення довговічності асфальтобетонного покриття.

При цьому, програма експериментальних досліджень повинна включати:

- дослідження зміни властивостей бітуму під час технологічного старіння з використанням методу ГОСТ 18180 [71] та RTFOT [31];
- порівняльний аналіз зміни властивостей бітумів різних структурних типів під час технологічного старіння;
- оцінювання зміни реологічних властивостей бітумів під час технологічного старіння;
- встановлення впливу модифікуючих добавок на стійкість бітумів до технологічного старіння;
- перевіряння ефективності модифікуючих добавок шляхом визначення стійкості до старіння асфальтобетонних сумішей;
- встановлення впливу технологічного старіння на модулі пружності асфальтобетонів та їх втомну довговічність.

Висновки до розділу 2

1. Критерії агрегатного стану бітумів (температура розм'якшеності та температура крихкості) може бути оцінено за властивостями компонентів мальтенового середовища. Однак, розгляд впливу складових мальтенової фракції не є достатнім для прогнозування властивостей бітумів, тому для об'єктивного уявлення про властивості дисперсних систем необхідно враховувати роль дисперсної фази, якою у бітумі є асфальтени. Виходячи з цього, можна вважати, що найбільш прийнятним для оцінювання старіння бітумів є груповий хімічний склад.

2. На практиці, прогнозування властивостей асфальтобетонів виконують після оцінювання бітумів за стандартними показниками (пенетрація, температура розм'якшеності та температура крихкості). Також спрогнозувати властивості асфальтобетонів можна за зміною в'язкості та когезії бітумів, що тісно пов'язані з пенетрацією.

3. З метою підвищення стійкості бітумів та асфальтобетонів до дії високих технологічних температур може бути використано інгібітори (антиокислювальні добавки) старіння (β -нафтол, танін, пірокатехін, сульфопіридин, а також мідні солі ефіру тіофосфорної кислоти, парафеніламін та ін), неокиснені продукти нафтоперероблення, полімерні добавки на основі блок кополімерів типу стирол-бутадієн-стирол та добавки на основі поверхнево-активних речовин (катіонактивні добавки – вищі аліфатичні аміни і діаміни) тощо.

Результати досліджень другого розділу викладено у наступних публікаціях: [14, 52, 134, 145, 144].

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ СТАРІННЯ БІТУМІВ, АСФАЛЬТОБЕТОННИХ СУМІШЕЙ ТА АСФАЛЬТОБЕТОНІВ

3.1 Об'єкти дослідження

Для виконання експериментальних досліджень щодо встановлення технологічного старіння бітумів, впливу модифікуючих добавок на старіння бітумів, а також старіння асфальтобетонів на основі досліджуваних бітумів було прийнято наступні матеріали: бітум, добавку на основі поверхнево-активних речовин, полімерну добавку, фракціонований щебінь, пісок із відсівів дроблення, вапняковий мінеральний порошок.

3.1.1 Характеристика бітумів

Об'єктами дослідження виступали окиснені бітуми марки БНД 40/60, БНД 60/90 та БНД 90/130 виробництва ВАТ «Мозирський НПЗ» (Білорусь), марки БНД 60/90 та БНД 90/130 виробництва ПАТ «Укртатнафта» (Україна) та залишковий бітум марки 50/70, 70/100 та 100/150 виробництва фірми Nynas (Швеція).

За значеннями фізико-технічних властивостей, що наведені в таблиці 3.1, всі бітуми відповідали вимогам нормативних документів: окиснені – ДСТУ 4044 [78], залишкові – ДСТУ EN 12591 [79].

Досліджувані бітуми практично однакові за значеннями пенетрації. В той же час, розходження їх структури й складу, обумовлені використанням різної за консистенцією вихідної сировини та різними технологіями отримання, є причиною істотного розходження інших їхніх властивостей, що в свою чергу ймовірно вплине на їх стійкість до старіння.

Температура розм'якшеності характеризує теплостійкість бітумів і дорожнього покриття. Температура розм'якшеності окиснених бітумів на (1 – 4) °C вище ніж залишкових, що пояснюється належністю перших до типу золь-гель, а других до типу золь.

Таблиця 3.1 – Властивості використаних для дослідження бітумів

Ч. ч.	Найменування показника	Результати випробувань бітуму								
		Nynas 50/70	ВАТ «Мозирський НПЗ» БНД 40/60	ПАТ «Укртатнафта» БНД 60/90 (1)	Nynas 70/100	ВАТ «Мозирський НПЗ» БНД 60/90	ПАТ «Укртатнафта» БНД 60/90 (2)	Nynas 100/150	ВАТ «Мозирський НПЗ» БНД 90/130	ПАТ «Укртатнафта» БНД 90/130
1	Глибина проникності голки (пенетрація) за температури 25 °С, 0,1 мм	52	58	67	77	77	76	106	106	110
2	Температура розм'якшеності за кільцем і кулею, °С	51,0	52,0	49,7	46,2	48,5	48,6	42,2	46,0	45,1
3	Температура крихкості, °С	-15	-22	-23,5	-17	-25	-24	-19	-27	-25
4	Розтяжність (дуктильність) за температури 25 °С, см	> 150	60	68	> 150	96	70	> 150	104	80
5	Розтяжність (дуктильність) за температури 0 °С, см	–	–	3,0	0,6	4,0	3,2	7,9	4,5	4,0
6	Індекс пенетрації	-0,87	-0,36	-0,57	-1,18	-0,52	-0,53	-1,56	-0,30	-0,46
7	Інтервал пластичності, °С	66	74	73,2	63,2	73,5	72,6	61,2	73	70,1

Температура крихкості характеризує тріщиностійкість бітумів і дорожнього покриття. Цей показник є нижньою межею температурного інтервалу працездатності в'язучих і межею переходу з пружно-пластичного в пружно-крихий реологічний стан. Температура крихкості окиснених бітумів є на (6 – 8) °С нижчою ніж залишкових бітумів.

За рахунок вищої температури розм'якшеності та нижчої температури крихкості, а також структурних особливостей та складу розглянутих бітумів інтервал пластичності окиснених бітумів більший ніж залишкових (70 – 74) °С проти (61 – 66) °С.

Ці ж структурні особливості бітумів є причиною практично крихкого руйнування залишкових бітумів, з пенетрацією (52 – 77) · 0,1 мм, при розтягуванні за температури 0 °С. У той же час розтяжність за температури 0 °С окиснених бітумів підвищується із зростанням глибини проникності голки (від 3,0 см до 4,5 см).

3.1.2 Характеристика добавок для підвищення стійкості бітумів до технологічного старіння

Для підвищення стійкості бітумів до технологічного старіння використано адгезійну добавку на основі поверхнево-активних речовин (далі – ПАР) та полімерну добавку типу термоеластопластів (далі – полімер).

Властивості ПАР наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Властивості використаної для дослідження ПАР

Ч. ч.	Найменування показника	Значення показника
1	Зовнішній вигляд за температури 20 °С	рідина коричневого кольору
2	Густина за температури 20 °С, кг/м ³	980
3	Амінне число, мг КОН/г	від 159 до 169

Властивості полімеру наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Властивості використаного для дослідження полімеру

Ч. ч.	Найменування показника	Значення показника
1	Вміст стиролу, % за масою	31
2	Вміст летких компонентів, % за масою	0,3
3	Вміст зольних компонентів, % за масою	0,1
4	Видовження на розрив, %	880
5	Міцність на розрив, МПа	33

3.1.3 Характеристика мінеральних матеріалів

Для дослідження було прийнято щебінь фракції 5 – 10 мм і пісок із відсівів подрібнення Малинського каменедробильного заводу, а також вапняковий мінеральний порошок виробництва ТОВ «Скала-Подільський спеціалізований кар'єр». Основні властивості щебеню наведено в таблиці 3.4, піску із відсівів подрібнення – в таблиці 3.5, мінерального порошку – в таблиці 3.6.

Таблиця 3.4 – Властивості щебеню

Ч. ч.	Найменування показників	Фактичні значення показників
1	Зерновий склад за повним залишком на контрольних ситах: - 1,25 $D_{\text{найб}}$, % за масою - $D_{\text{найб}}$, % за масою - 0,5 ($D_{\text{найм}} + D_{\text{найб}}$), % за масою - $D_{\text{найм}}$, % за масою	0,0 4,4 60,0 97,3
2	Вміст пиловидних та глинистих часток, % за масою	0,80
3	Вміст глини у грудках, % за масою	0,00
4	Вміст зерен лещадної та голчастої форми, % за масою	12,8
5	Група за формою зерен	кубовидна
6	Втрата маси при випробуванні на міцність за дробильністю, % за масою	14,3
7	Марка щебеню за міцністю	1200
8	Вміст зерен слабких порід, % за масою	0,7
9	Втрата маси при випробуванні щебеню на стираність, % за масою	22,7
10	Марка щебеню за стираністю	Ст-I
11	Марка щебеню за морозостійкістю	F300

Таблиця 3.5 – Властивості піску

Ч. ч.	Найменування показників	Фактичні значення показників
1	Зерновий склад за повним залишком на контрольних ситах, % за масою, з розміром отворів, мм: - 10,0 - 5,0 - 2,5 - 1,25 - 0,63 - 0,315 - 0,16 - 0,071	0,0 6,1 30,3 46,2 63,2 76,2 87,1 94,0
2	Вміст пиловатих та глинистих часток, % за масою	6,0
3	Марка вихідної гірської породи за дробильністю	1200
4	Марка вихідної гірської породи за стираністю	Ст-I
5	Марка вихідної гірської породи за морозостійкістю	F300

Таблиця 3.6 – Властивості мінерального порошку

Ч. ч.	Найменування показників	Фактичні значення показників
1	Зерновий склад за повним залишком на контрольних ситах, % за масою, з розміром отворів, мм: - 1,25 - 0,63 - 0,315 - 0,16 - 0,071	 0,0 0,0 0,3 0,3 12,4
2	Пористість у разі ущільнення 40 МПа, відсоток за об'ємом	30
3	Набрякання зразків із суміші порошку з бітумом, відсоток за об'ємом	0,4
4	Структуруюча здатність, °С	14

3.1.4 Характеристика асфальтобетонної суміші

Для проведення досліджень було прийнято дрібнозернисту асфальтобетонну суміш типу Б, оскільки саме дрібнозернисті асфальтобетонні суміші переважно використовують для влаштування покриття дорожнього одягу відповідно до ДСТУ Б В.2.7-119 [10], а властивості асфальтобетонної суміші типу Б в основному визначаються властивостями в'язучого, що саме й представляє інтерес дослідження. Підібраний зерновий склад асфальтобетонної суміші наведено в таблиці 3.7 та на рисунку 3.1.

Для визначення оптимального вмісту бітуму було вироблено асфальтобетонні суміші з різним його вмістом (від 5,5 % до 6,5 %).

З сумішей наведених складів під тиском 40 МПа впродовж 3 хвилин було виготовлено зразки циліндричної форми діаметром $71 \pm 0,1$ мм та визначено їх стандартні властивості відповідно до ДСТУ Б В.2.7-119 [10], а саме: середню густину, водонасичення, міцність за температури 0 °С, 20 °С та 50 °С, коефіцієнт довготривалої водостійкості (таблиця 3.8). За аналізом результатів випробування було встановлено оптимальний вміст бітуму в асфальтобетонній суміші. Крім того, всі асфальтобетонні суміші в подальшому використовували для встановлення впливу пористості асфальтобетону на його стійкість до старіння.

Таблиця 3.7 – Підібраний зерновий склад асфальтобетонної суміші типу Б

Мінеральний матеріал	Вміст мінеральних зерен в суміші, % за масою	Вміст мінеральних зерен, % за масою, дрібніше даного розміру, мм								
		15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,071
Зерновий склад вихідних матеріалів										
Щебінь фракції 5-10 мм	—	100,0	95,5	2,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Пісок із відсівів дроблення	—	100,0	100,0	93,9	69,7	53,8	36,8	23,8	12,9	6,0
Порошок мінеральний	—	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,7	99,7	87,6
Підібраний зерновий склад мінеральної частини асфальтобетонної суміші										
Щебінь фракції 5-10 мм	38	38,0	36,3	1,0	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Пісок із відсівів дроблення	55	55,0	55,0	51,7	38,3	29,6	20,2	13,1	7,1	3,3
Порошок мінеральний	7	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	6,1
Разом	100	100,0	98,3	59,7	45,6	36,9	27,5	20,4	14,4	9,7
Вимоги ДСТУ Б В.2.7-119		100	100	65	53	43	33	25	18	14
		100	90	55	43	33	23	16	11	8

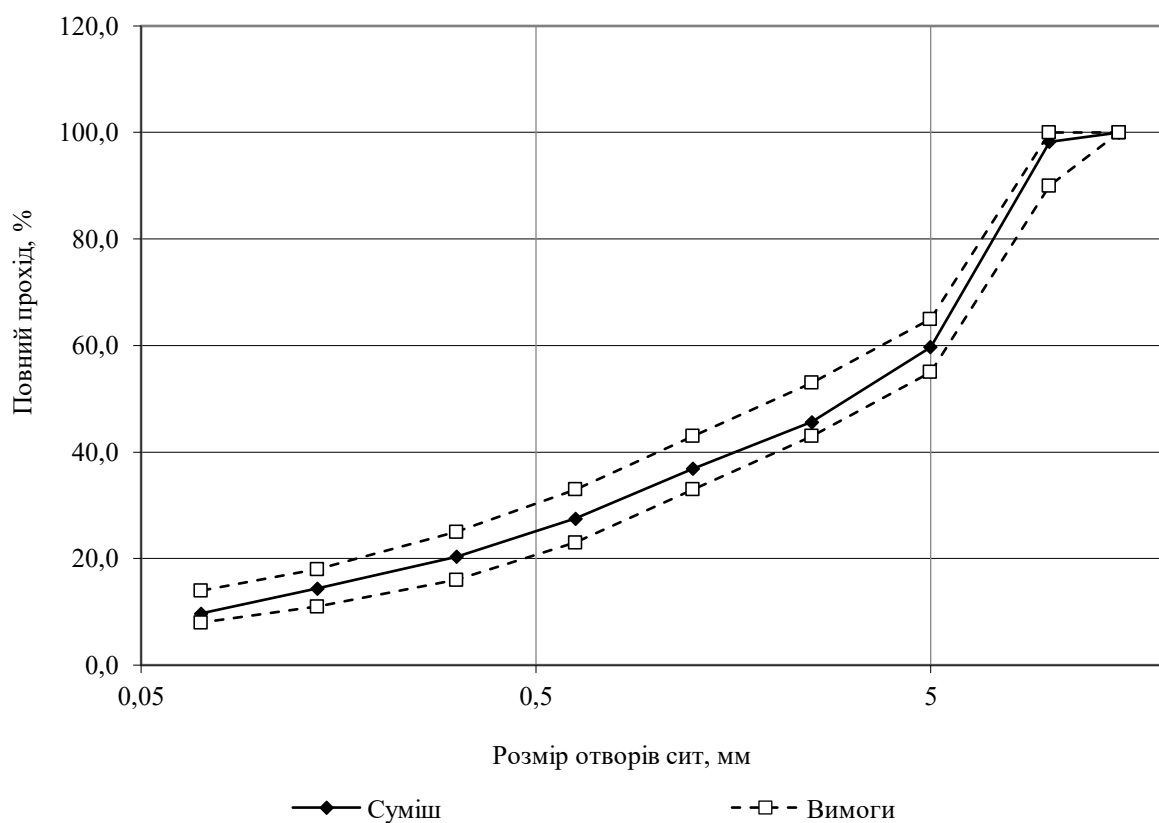


Рисунок 3.1 — Графічне зображення результатів підбору складу асфальтобетонної суміші

Таблиця 3.8 – Результати підбору оптимального вмісту бітуму в асфальтобетонній суміші

Ч. ч.	Найменування показника, одиниця вимірювання	Результати випробувань асфальтобетону при вмісті бітуму, %		
		5,5	6,0	6,5
1	Середня густина асфальтобетону, г/см ³	2,358	2,372	2,380
2	Водонасичення, % за об'ємом	3,0	1,8	1,2
3	Границя міцності при стиску за температури 0 °С, МПа	7,5	7,9	8,3
4	Границя міцності при стиску за температури 20 °С, МПа	2,7	3,1	3,0
5	Границя міцності при стиску за температури 50 °С, МПа	1,4	1,4	1,3
6	Коефіцієнт довготривалої водостійкості	0,85	0,91	0,93

3.2 Методи дослідження

3.2.1 Стандартні методи дослідження бітумів

Згідно з ДСТУ 4044 [78] до стандартних методів дослідження бітумів віднесено глибину проникності голки (пенетрацію) за температури 25 °С, температуру розм'якшеності, температуру крихкості та розтяжність за температури 0 °С та 25 °С.

Глибина проникності голки характеризує консистенцію бітуму, що виражається як відстань в десятих частках міліметра, на яку вертикально проникає в зразок впродовж фіксованого часу стандартна голка за заданих температури та навантаження [80]. Суть методу полягає у вимірюванні глибини проникнення стандартної голки в досліджуване в'язуче. Визначення глибини проникності голки виконують за температури випробування 25 °С, прикладеному навантаженні 100 г, впродовж 5 с.

Температура розм'якшеності бітуму є температурою за якої за заданих умов випробування бітум набуває певної консистенції [81].

Відповідно до даного методу два зразки бітумного в'язучого, що залиті в ступінчасті латунні кільця, і на кожному з яких розташована сталева кулька, нагрівають з контрольованою швидкістю в рідинній бані. За температуру розм'якшеності приймають середнє арифметичне значення температур, за яких обидва зразки в'язучого розм'якшуються достатньою мірою для опускання кожної кульки, вкритої бітумним в'язучим, на відстань $(25,0 \pm 0,4)$ мм.

Розтяжність характеризує здатність бітуму розтягуватись за постійної швидкості та температури на максимальну довжину без розривання (пластичність бітуму) [82]. Суть методу полягає у визначанні максимального значення видовження бітуму без розривання під час його розтягування у спеціальній розбірній формі за температури 25 °C або 0 °C зі швидкістю 50 мм/хв.

3.2.2 Метод лабораторного старіння бітуму згідно з ГОСТ 18180

Згідно з ГОСТ 18180 [71] бітум витримують в сушильній шафі в тонкому шарі за температури 163 °C впродовж 5,0 годин.

Перед випробуванням пробу бітуму зневоднюють нагріванням до температури на $(80 - 100)$ °C вище температури розм'якшеності та перемішуванням скляною паличкою, при цьому не допускають перегріву зразка.

У підготовлені чашки наливають бітум у кількості $(28 \pm 0,1)$ г в кожну і при обережному нахилі чашки розподіляють його по днищу рівномірним шаром (приблизно 4 мм). Чашки, які використовують для визначення зміни маси бітуму позначають.

Після охолодження бітуму до кімнатної температури в ексикаторі проби зважують з похибкою не більше ніж 0,01 г. Зважені проби встановлюють на горизонтальну решітку сушильної шафи, попередньо підігрітої до температури випробування (163 ± 1) °C. Під час випробування сушильну шафу не відкривають. Прогрівання бітуму виконують впродовж 5,0 годин. Так як при встановленні проб температура сушильної шафи

знижується, то відлік починають від моменту досягнення температури 163 °С. Час досягнення заданої температури не повинен перевищувати 15 хв.

Через 5,0 год позначені чашки виймають з сушильної шафи, встановлюють в ексикаторі і після охолодження до кімнатної температури зважують з похибкою не більше ніж 0,01 г. В'яжуче з інших чашок перемішують і виливають у завчасно підготовлену ємність. Для видалення в'яжучого з чашок використовують скребок. В подальшому зістарене в'яжуче використовують для визначення фізико-технічних характеристик бітуму.

3.2.3 Метод лабораторного старіння бітуму згідно з EN 12607-1

При виконанні випробувань за методом RTFOT застосовують термокамеру з електричним підігрівом. Внутрішні розміри термокамери (робоча зона) мають такі розміри:

- висота (340 ± 15) мм;
- ширина (405 ± 15) мм;
- глибина (445 ± 15) мм.

Фасадні двері термокамери включають в себе склопакет. Склопакет забезпечує огляд всього внутрішнього простору термокамери. Розміри вікна фасадної двері мають наступні розміри:

- висота (215 ± 15) мм;
- ширина (320 ± 15) мм.

В камері забезпечується циркуляція гарячого повітря у внутрішньому просторі. Циркуляція забезпечується наявністю отворів для забору повітря і випускних отворів для випуску гарячого повітря. Схему термокамери наведено на рисунку 3.2. В термокамері встановлено алюмінієвий барабан діаметром (300 ± 10) мм (рисунок 3.3).

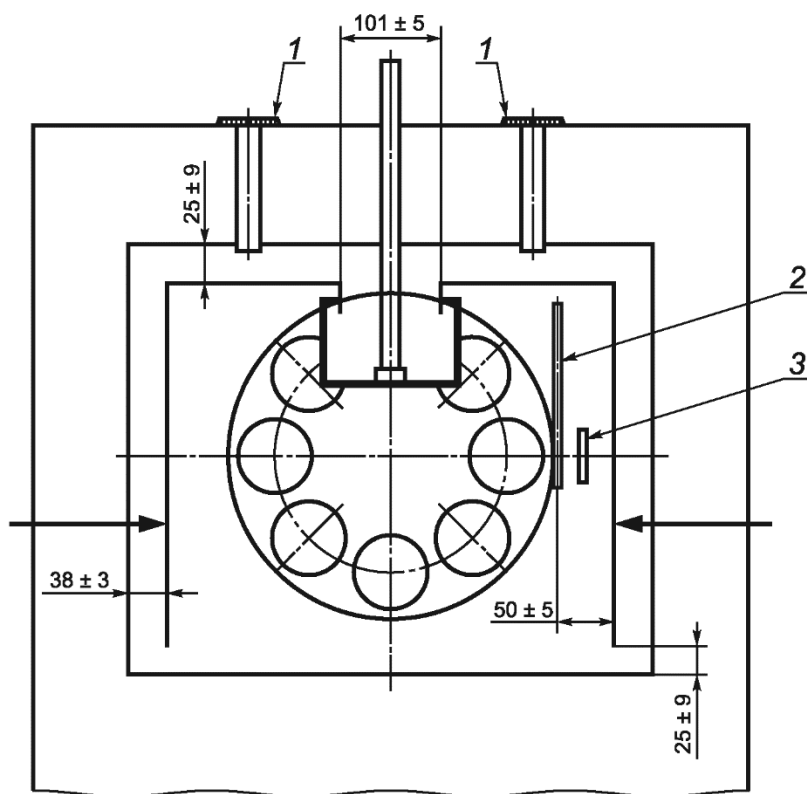
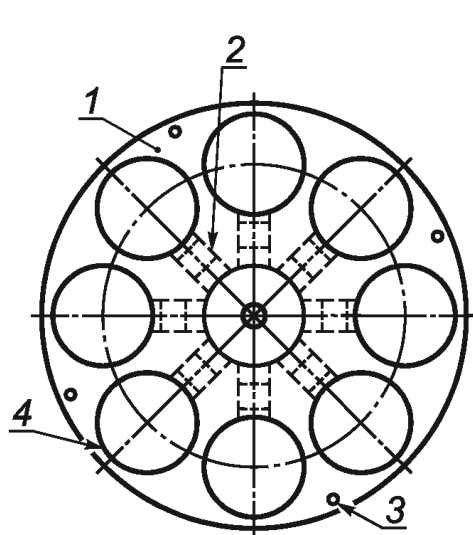
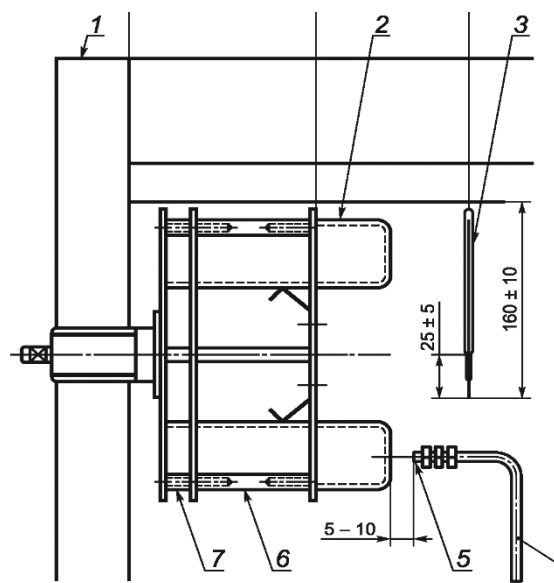


Рисунок 3.2 - Сушильна шафа (вигляд спереду)

Барабан має вісім отворів для закріплення восьми скляних контейнерів у горизонтальному положенні (рисунок 3.3). Швидкість обертання барабана становить $(15,0 \pm 0,2) \text{ хв}^{-1}$.



(вигляд спереду)



(вигляд збоку)

Рисунок 3.3 - Барабан

Вентиляція здійснюється таким чином, що потік повітря проходив через дно термокамери, потім уздовж стінок і виходить через випускні отвори.

В термокамері забезпечується постійна температура внутрішнього простору з допуском не більше $\pm 0,5$ °C. Термокамера обладнана форсункою з вихідним отвором $(1,0 \pm 0,1)$ мм, через форсунку подається гаряче повітря зі швидкістю $(4,0 \pm 0,2)$ л/хв в кожен контейнер в нижній точці обертання.

Для зразків бітуму використовують скляний контейнер (рисунок 3.4) виготовлений з жаростійкого скла.

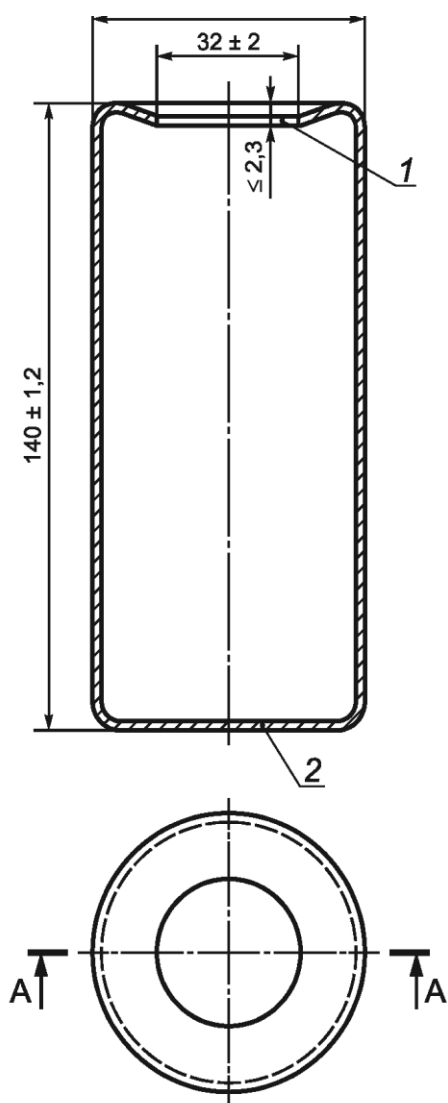


Рисунок 3.4 – Склоаний контейнер

Зразок бітуму доводять до рухомого стану і зневоднюють, спочатку нагріваючи в сушильній шафі до температури $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$, а потім, не допускаючи локальних перегрівів, доводять температуру бітуму при постійному перемішуванні до температури на $(15 \pm 5) ^\circ\text{C}$ нижче температури випробування. Час нагрівання бітуму при зазначених умовах не повинен перевищувати 50 хв.

Термокамери та всі скляні контейнери після установки в барабан розташовують горизонтально. Температура випробувань повинна становити $(163 \pm 1) ^\circ\text{C}$.

Для визначення зміни маси бітуму використовують два заздалегідь позначені скляні контейнери. Скляні контейнери зі зразками витримують в термокамері за температури (75 ± 1) хв. При цьому за час відліку приймають момент, коли в термокамері досягається температура на $1,0 ^\circ\text{C}$ нижче температури випробування.

Після випробування позначені скляні контейнери охолоджують до кімнатної температури в ексікаторі. Після чого здійснюють зважування скляних контейнерів з точністю до 1 мг для визначення зміни маси. Зразки з інших скляних контейнерів зливають в заздалегідь підготовлену ємність і в подальшому використовують для визначення фізико-технічних характеристик бітуму.

3.2.4 Методи оцінювання зміни властивостей бітуму

Для оцінювання зміни властивостей бітуму використовували зміну маси, залишкову пенетрацію та індекс старіння.

Зміну маси бітуму визначали як різницю між масою бітуму до та після процедури старіння відповідно до 3.2.2 та 3.2.3.

Залишкову пенетрацію бітуму визначали як відношення глибини проникності голки (пенетрації) за температури $25 ^\circ\text{C}$ після процедури старіння відповідно до 3.2.2 та 3.2.3 до глибини проникності голки (пенетрації) за температури $25 ^\circ\text{C}$ не зістареного бітуму.

Індекс старіння визначали як відношення динамічної в'язкості бітуму після процедури старіння відповідно до 3.2.2 та 3.2.3 до динамічної в'язкості не зістареного бітуму.

3.2.5 Додаткові методи випробування бітуму

Як додаткові методи випробування використовували динамічну в'язкість та еластичність за температури 25 °С (для бітуму, модифікованого полімером).

Еластичність за температури 25 °С характеризує пружні властивості бітуму [84]. Відповідно до даного методу зразок бітумного в'язучого розтягують за температури випробування з постійною швидкістю 50 мм/хв до заданого видовження на 200 мм. Отриману таким чином бітумну нитку розрізають навпіл. Після заданого часу відновлення вимірюють скорочення половинок нитки і виражають її у відсотках від заданого видовження.

Динамічну в'язкість визначали як відношення прикладеного напруження зсуву до швидкості зсуву відповідно до EN 13302 [83].

Загальновизнано, що для в'язкопружних систем, якими є бітуми в області температур розм'якшення і вище, фундаментальною їх реологічною характеристикою є динамічна в'язкість.

В'язкість всіх досліджуваних об'єктів визначали за температури їх розм'якшеності та температурах 60 °С, 90 °С, 135 °С та 160 °С. Температура 60 °С включена в EN 12591 [79] в якості базової для визначення теплостійкості бітумів і колієстійкості асфальтобетонів. Визначення в'язкості за високих температур виконували з метою встановлення еквів'язких температур ($T_{0,5}$), що відповідають в'язкості бітумів 0,5 Па·с, і їх зміни під впливом прийнятих способів старіння.

Обов'язковою умовою отримання порівняльних значень в'язкості, є її визначення в області ньютонівського плинину або за однакових швидкостей

зсуву. Відхилення від ньютонівської поведінки визначали за кривими течіям всіх об'єктів відповідно до формули:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}, \quad (3.1)$$

де τ – напруження зсуву, МПа;

$\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, с^{-1} ;

η – коефіцієнт аномалії в'язкості.

3.2.6 Стандартні методи випробування асфальтобетонів

Під час досліджень використовували стандартні методи випробування асфальтобетонів згідно з ДСТУ Б В.2.7-119 [10], а саме визначали: середню густину, водонасичення, міцність за температури 0 °С, 20 °С та 50 °С, коефіцієнт довготривалої водостійкості.

3.2.7 Метод моделювання старіння асфальтобетонів

Також асфальтобетонні суміші піддавали старінню за методом RILEM [76]. Згідно з яким вироблену згідно з ДСТУ Б В.2.7-319 асфальтобетонну суміш укладали на деко шаром товщиною 2 см, розміщували його у сушильній шафі з температурою 135 °С та витримували впродовж 4 годин за цієї температури. Таким чином моделювали технологічне старіння, що відбувається у процесі виробництва, транспортування, укладання та ущільнення асфальтобетонних сумішей. Після закінчення прогрівання частину суміші було використано для виготовлення асфальтобетонних зразків за температури від 140 °С до 145 °С. Залишок суміші було залишено у сушильній шафі з температурою 85 °С на 2 дні, 5 днів та 9 днів. Для контролювання температури використовували датчик температури сушильної шафи та пірометр, яким температуру суміші перевіряли кожну годину впродовж робочого дня. Після кожного періоду витримування асфальтобетонної суміші з неї виготовляли асфальтобетонні зразки для наступного визначення властивостей.

3.2.8 Метод випробування на чотири точкове згинання

Важливим критерієм оцінювання якості асфальтобетону, а саме, його здатністю чинити опір руйнівній дії транспортних засобів, є втомна міцність. У якості такого критерію використовують кількість циклів, яку витримує асфальтобетон під час згинання з постійною амплітудами навантаження або деформації до відмови.

Відповідно до методу на чотири точкове згинання, до асфальтобетонних зразків призматичної форми (зразків-балочок) застосовували чотири точкове згинання до досягнення втоми за допомогою випробувального приладу, в якому внутрішні та зовнішні затискачі розташовано симетрично. Згинання досягали діючим вертикально та під прямим кутом до поздовжньої осі зразка-балочки навантаженням обох внутрішніх точок (внутрішні затискачі). Вертикальне положення кінцевих опор (зовнішні затискачі) фіксували.

На всіх опорах було забезпечено вільне обертання та поступальний рух зразків по горизонталі. Дане розміщення навантаження створює постійний момент і, отже, постійне напруження між обома внутрішніми затискачами. Відповідно до існуючих уявлень про деформацію асфальтобетону в покритті під час лабораторних випробувань обрано синусоїдальний тип навантаження зразка. Цикл включає в себе період навантаження з позитивним знаком, розвантаження, потім навантаження з негативним знаком і розвантаження. Цей метод дозволяє здійснювати контроль частоти та форму коливань, що сприяє спрощенню урахування похибок, обумовлених інерційними силами. На основі даних вимірювання визначали втомні властивості досліджуваного матеріалу.

3.2.9 Визначення модуля пружності

Модуль пружності асфальтобетону визначали за моделлю М. Вітчака [164], перевірену в роботах В.В. Маляра та Б.Б. Телтаєва [179, 180]:

$$\log E^* = -1,25 + 0,029p_{200} - 0,0018p_{200}^2 - 0,0028p_4 - 0,058V_a - 0,822 \frac{V_{\text{beff}}}{V_a + V_{\text{beff}}} + \frac{3,872 - 0,0021p_4 + 0,004p_{38} - 0,000071p_{38}^2 + 0,0055p_{34}}{1 + e^{(-0,603313 - 0,31335\log(f) - 0,393532\log(\eta))}} \quad (3.2)$$

де E^* – динамічний модуль пружності, 10^5 фунт на квадратний дюйм;

η – в'язкість в'язучого, 10^6 пз;

f – частота деформування, Гц;

p_{200} – повний прохід через сито з розміром отворів 0,075 мм, %;

p_4 – повний залишок на ситі з розміром отворів 4,76 мм, %;

p_{38} – повний залишок на ситі з розміром отворів 9,5 мм, %;

p_{34} – повний залишок на ситі з розміром отворів 19 мм, %;

V_a – залишкова пористість асфальтобетону, % за об'ємом;

V_{beff} – ефективний вміст бітуму, % за об'ємом.

В'язкість бітуму за різних температур визначали за залежністю [165]:

$$\log \eta = 10,5 - 2,26\log\Pi + 0,00389(\log\Pi)^2 \quad (3.3)$$

де Π – пенетрація бітуму за різної температури, визначена згідно з методикою ХНАДУ [166].

Відповідно до цієї методики передбачається, що за температури розм'якшеності бітуму глибина проникності голки становить $800 \cdot 0,1$ мм, а за температури крихкості – $1 \cdot 0,1$ мм. Між цими значеннями температур логарифмічна залежність в'язкості прямолінійна. Таким чином, знаючи температуру розм'якшеності та значення глибини проникності голки за температури 25°C можна визначити його пенетрацію за температури T за формулою:

$$\log\Pi_T = \frac{\log 800 - \log\Pi_{25}}{T_p - 25} \cdot (T - 25) + \log\Pi_{25} \quad (3.4)$$

3.3 Дослідження змін властивостей окиснених бітумів під час термоокиснювального старіння

Для досліджень були прийняті окиснені бітуми, характеристику яких надано в 3.1. Результати випробувань бітумів після старіння наведено в таблиці 3.9.

Прогрівання бітумів за ГОСТ 18180 та за методом RTFOT призводить до зміни їх властивостей. Пенетрація бітумів після прогрівання знижується (рисунок 3.5).

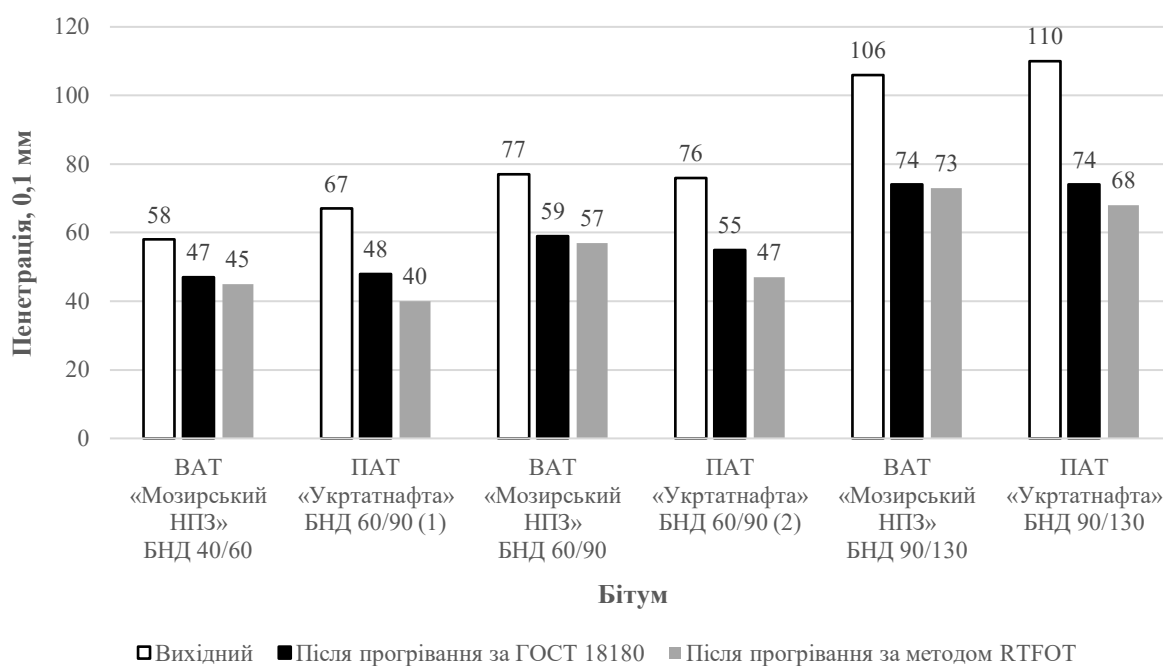


Рисунок 3.5 – Вплив прогрівання бітуму на пенетрацію

При цьому, чим більша пенетрація вихідного бітуму тим меншою є його залишкова пенетрація. Цікавим є той факт, що залишкова пенетрація бітуму БАТ «Мозирський НПЗ» є практично однаковою як після прогрівання за ГОСТ 18180, так і після прогрівання за методом RTFOT. В той же час бітуми ПАТ «Укртатнафта» більше старіють при їх прогріванні за методом RTFOT.

Таблиця 3.9 – Результати визначення впливу старіння на властивості окиснених бітумів

Найменування показника	Результати випробувань бітуму					
	БАТ «Мозирський НПЗ» БНД 40/60	ПАТ «Укртатнафта» БНД 60/90 (1)	БАТ «Мозирський НПЗ» БНД 60/90	ПАТ «Укртатнафта» БНД 60/90 (2)	БАТ «Мозирський НПЗ» БНД 90/130	ПАТ «Укртатнафта» БНД 90/130
Глибина проникності голки (пенетрація) за температури 25 °С, 0,1 мм						
Вихідного	58	67	77	76	106	110
Після прогрівання за ГОСТ 18180	47	48	59	55	74	74
Після прогрівання за методом RTFOT	45	40	57	47	73	68
Температура розм'якшеності за кільцем і кулею, °С						
Вихідного	52,0	49,7	48,5	48,6	46,0	45,1
Після прогрівання за ГОСТ 18180	55,6	53,2	52,8	52,4	49,7	49,2
Після прогрівання за методом RTFOT	57,0	54,7	54,0	53,4	50,4	50,2
Температура крихкості, °С						
Вихідного	-22	-23,5	-25	-24	-27	-25
Після прогрівання за ГОСТ 18180	-17	-21	-24	-22	-26	-23
Після прогрівання за методом RTFOT	-17	-21	-24	-21	-30	-22
Динамічна в'язкість за температури 60 °С, Па · с						
Вихідного	775	390	390	326	155	198
Після прогрівання за ГОСТ 18180	1800	868	955	710	385	420
Після прогрівання за методом RTFOT	2300	1218	1060	988	430	524
Зміна маси, %						
Після прогрівання за ГОСТ 18180	0,31	0,35	0,42	0,39	0,62	0,46
Після прогрівання за методом RTFOT	0,37	0,03	0,48	0,00	0,70	0,14
Індекс старіння						
Після прогрівання за ГОСТ 18180	2,32	2,23	2,45	2,18	2,48	2,12
Після прогрівання за методом RTFOT	2,97	3,12	2,72	3,03	2,77	2,65
Залишкова пенетрація						
Після прогрівання за ГОСТ 18180	81	72	77	72	70	67
Після прогрівання за методом RTFOT	78	60	74	62	69	62

В даному випадку має місце закономірність зменшення різниці між залишковою пенетрацією після прогрівання за ГОСТ 18180 та залишковою пенетрацією після прогрівання за методом RTFOT. Так, різниця значень залишкової пенетрації для бітуму ПАТ «Укртатнафта» з пенетрацією $67 \cdot 0,1$ мм становить 12 %, а при збільшенні пенетрації вихідного бітуму до $76 \cdot 0,1$ мм та $110 \cdot 0,1$ мм, різниця значень залишкової пенетрації складає 10 % та 5 %, відповідно. Вказана тенденція ймовірно пояснюється тим, що при прогріванні за ГОСТ 18180 окисленню піддається насамперед поверхня досліджуваного зразка, а окислення всього об'єму цього зразка залежить від його в'язкості.

Температура розм'якшеності та крижкості бітумів при прогріванні зростає (рисунк 3.6 та рисунок 3.7).

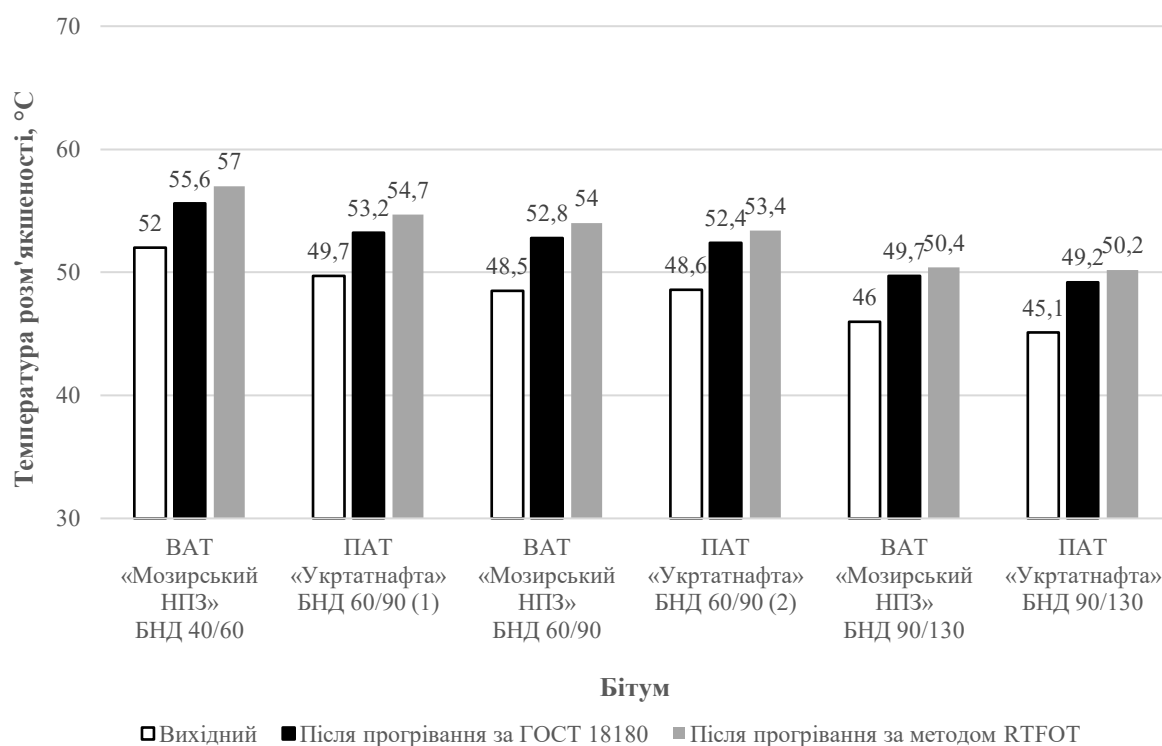


Рисунок 3.6 – Вплив прогрівання бітуму на температуру розм'якшеності

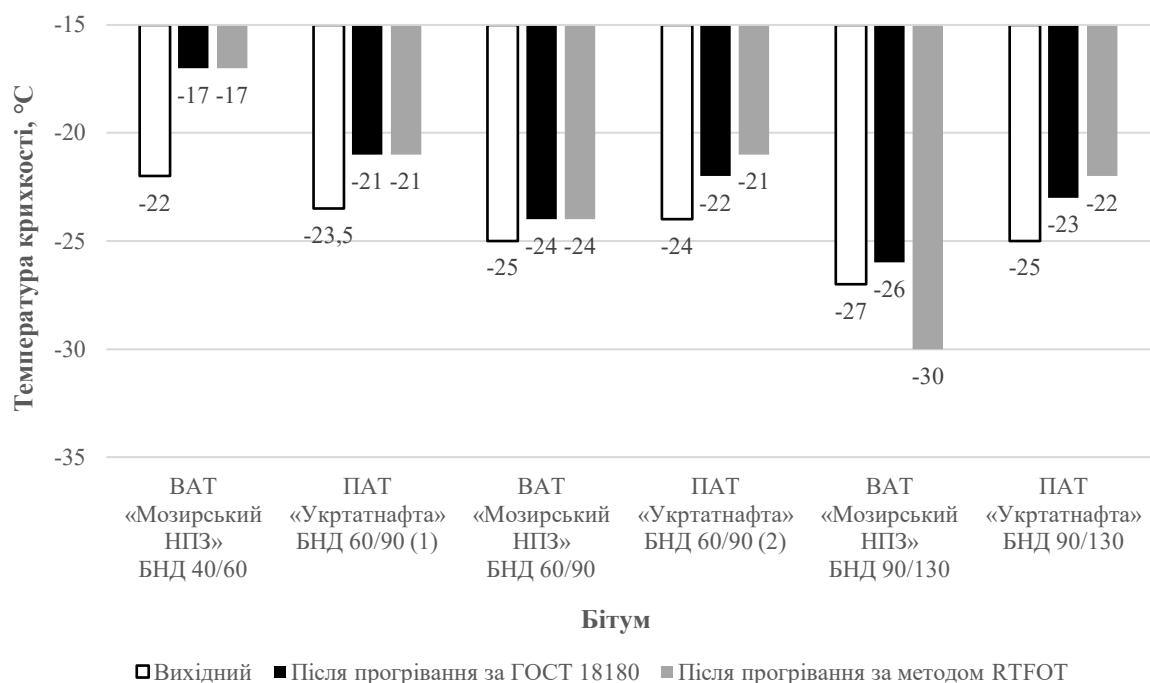


Рисунок 3.7 – Вплив прогрівання бітуму на температуру крихкості

На відміну від близьких значень залишкової пенетрації бітумів ВАН «Мозирський НПЗ» при їх прогріванні за обома методами, зміни температури розм'якшеності є більш суттєвими. Прогрівання за методом RTFOT призводить до більших змін температури розм'якшеності. При цьому чим більша в'язкість бітуму тим більшою є різниця між температурами розм'якшеності визначеними після прогрівання за двома методами. Для бітумів ПАТ «Укртатнафта» спостерігається така ж тенденція у змінах температури розм'якшеності.

Температура крихкості бітумів при прогріванні зростає менш інтенсивно. Прогрівання за методом RTFOT призводить до дещо більших змін температури крихкості ніж прогрівання за ГОСТ 18180. Найбільше зростання температури крихкості спостерігається при прогріванні бітуму марки БНД 40/60 ВАН «Мозирський НПЗ». Менше зростання температури крихкості при одночасному більш інтенсивному зростанні температури розм'якшеності призводить до розширення інтервалу пластичності випробуваних бітумів в бік більш високих температур.

При прогріванні бітумів за обома методами відбувається зростання динамічної в'язкості (рисунок 3.8).

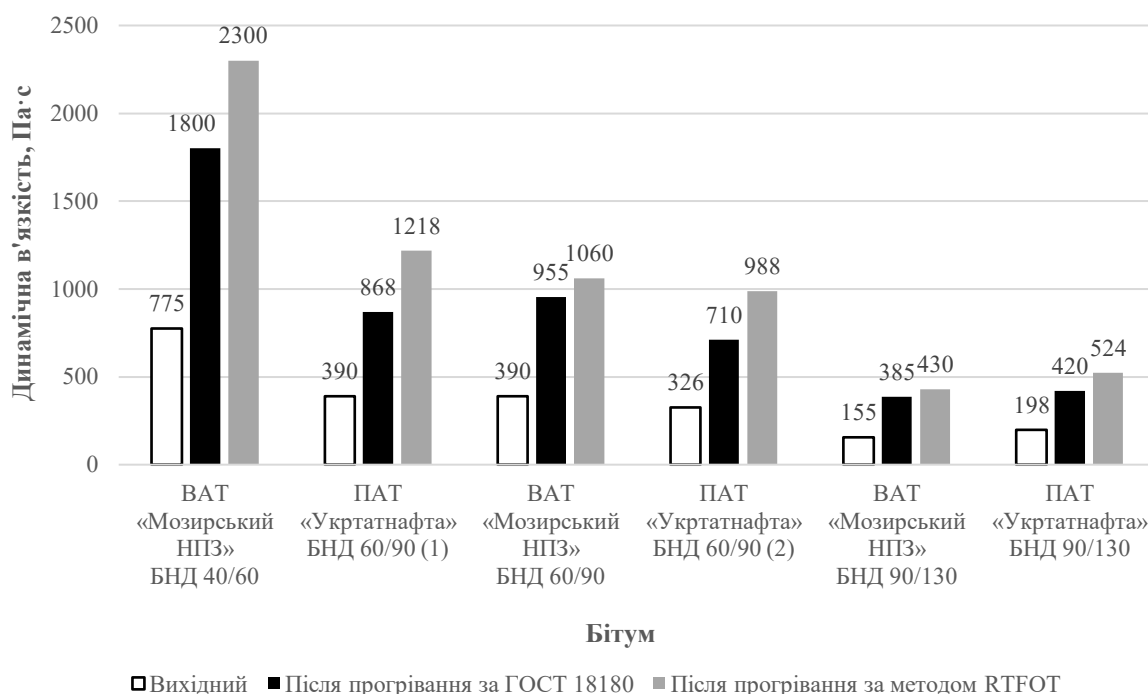


Рисунок 3.8 – Вплив прогрівання бітуму на динамічну в'язкість

Як і в попередніх випадках прогрівання за методом RTFOT призводить до більших змін ніж прогрівання за ГОСТ 18180. Однак на відміну від залишкової пенетрації за температури 25 °С, де з підвищенням в'язкості бітумів має місце її зростання як при прогріванні за ГОСТ 18180 так, і, за методом RTFOT (рисунок 3.9), індекс старіння бітуму БАТ «Мозирський НПЗ» при прогріванні за ГОСТ 18180 знижується, а при прогріванні за методом RTFOT – зростає (рисунок 3.10). Для бітумів ПАТ «Укртатнафта» зростання індексу старіння при підвищенні в'язкості бітуму має місце при прогріванні за обома методами. При цьому слід зазначити, що більш стійкими до старіння вважаються бітуми з меншим індексом старіння.

Отже вищі значення індексу старіння більш в'язких бітумів протирічать загальному уявленню про те, що більш в'язкі бітуми є стійкішими до термоокиснювального старіння ніж бітуми з меншою в'язкістю [18, 78, 79].

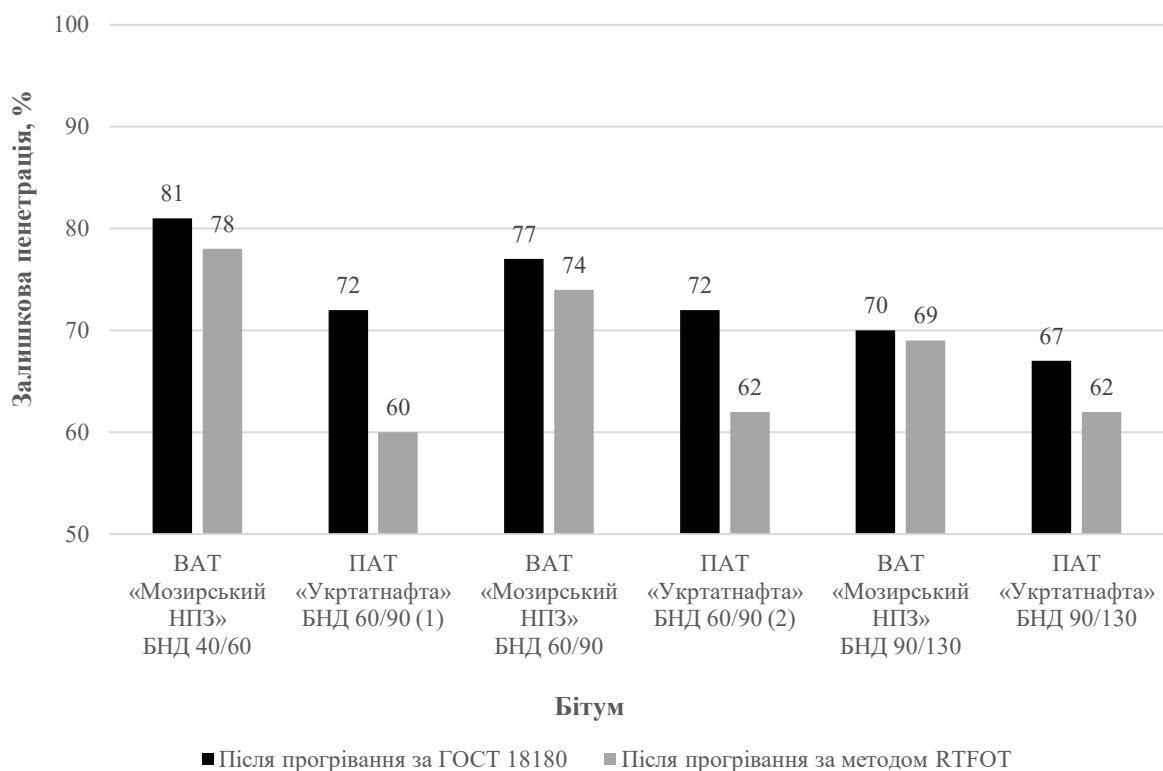


Рисунок 3.9 – Залишкова пенетрація бітумів

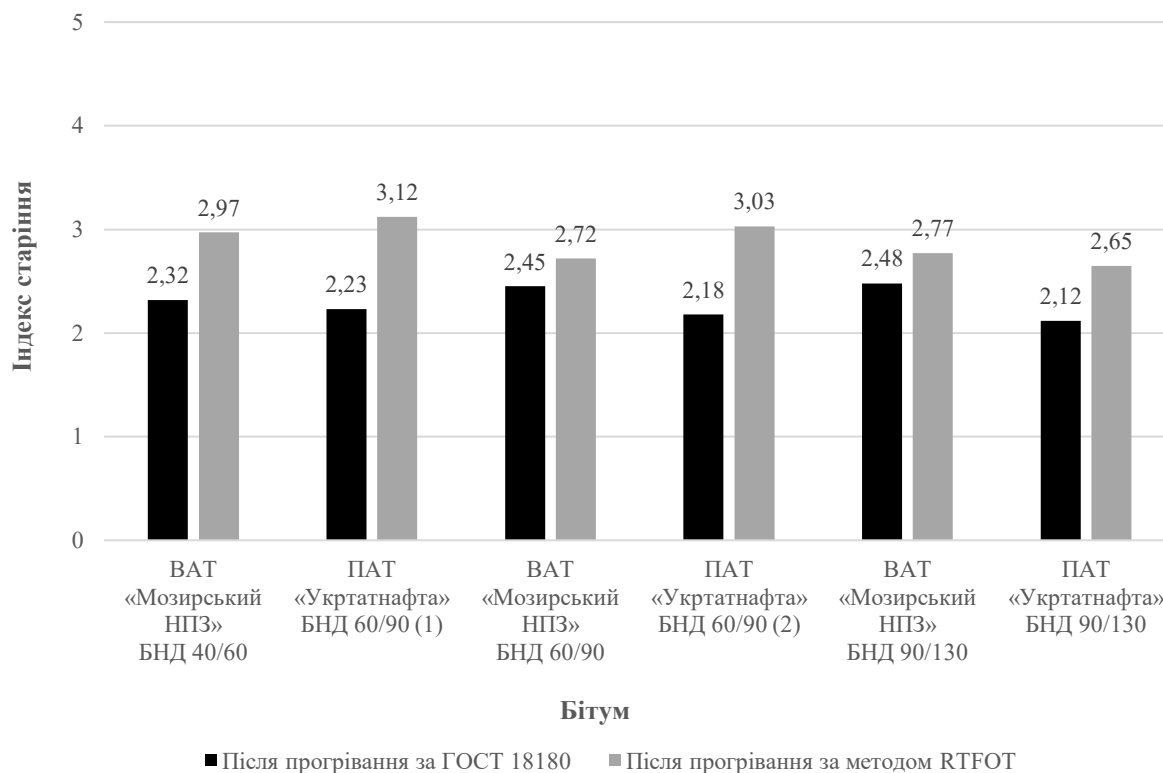


Рисунок 3.10 – Індекс старіння бітумів

3.4 Дослідження змін властивостей залишкових бітумів під час термоокиснювального старіння

Результати випробування бітумів після старіння наведено в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Результати визначення впливу старіння на властивості залишкових бітумів

Найменування показника	Результати випробувань бітуму		
	Nynas 50/70	Nynas 70/100	Nynas 100/150
Глибина проникності голки (пенетрація) за температури 25 °С, 0,1 мм			
Вихідного	52	77	106
Після прогрівання за ГОСТ 18180	39	56	74
Після прогрівання за методом RTFOT	32	49	69
Температура розм'якшеності за кільцем і кулею, °С			
Вихідного	51,0	46,2	42,2
Після прогрівання за ГОСТ 18180	54,2	49,6	45,9
Після прогрівання за методом RTFOT	56,0	51,1	47,0
Температура крихкості, °С			
Вихідного	-15	-17	-19
Після прогрівання за ГОСТ 18180	-17	-18	-21
Після прогрівання за методом RTFOT	-18	-18	-22
Динамічна в'язкість за температури 60 °С, Па · с			
Вихідного	680	345	168
Після прогрівання за ГОСТ 18180	1458	585	272
Після прогрівання за методом RTFOT	1930	750	345
Зміна маси, %			
Після прогрівання за ГОСТ 18180	0,49	0,53	0,58
Після прогрівання за методом RTFOT	0,49	0,58	0,70
Індекс старіння			
Після прогрівання за ГОСТ 18180	2,14	1,70	1,62
Після прогрівання за методом RTFOT	2,84	2,17	2,05
Залишкова пенетрація			
Після прогрівання за ГОСТ 18180	75	73	70
Після прогрівання за методом RTFOT	62	64	65

Прогрівання залишкових бітумів за ГОСТ 18180 та за методом RTFOT призводить до зміни їх властивостей. Пенетрація бітумів після прогрівання знижується (рисунок 3.11).

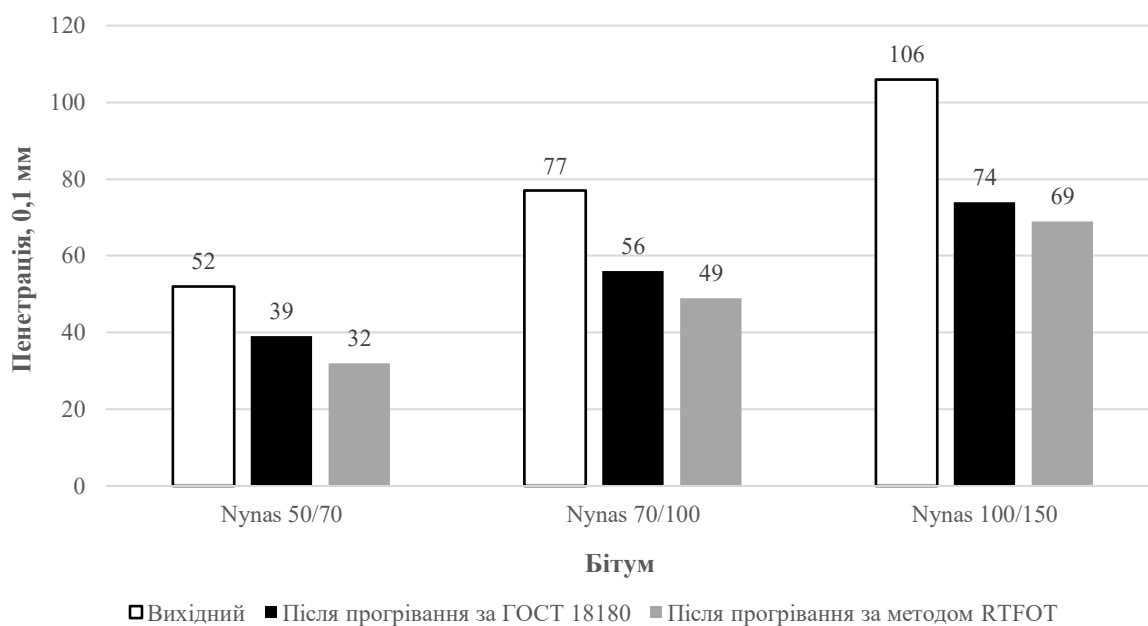


Рисунок 3.11 – Вплив прогрівання бітуму на пенетрацію

При цьому, чим більша пенетрація вихідного бітуму тим меншою є його залишкова пенетрація при прогріванні за ГОСТ 18180. В той же час прогрівання за методом RTFOT призводить до зовсім протилежних результатів, залишкова пенетрація є більшою у менш в'язкого бітуму. Це ймовірно свідчить про різний механізм термоокиснювального старіння бітумів при прогріванні за вказаними методами.

Більш інтенсивне старіння бітуму відбувається при його прогріванні за методом RTFOT. Як і у випадку окиснених бітумів різниця між залишковими пенетраціями тим менша чим більша пенетрація бітуму (рисунок 3.12).

Температура розм'якшеності бітумів при їх прогріванні зростає (рисунок 3.13). Більше зростання температури розм'якшеності бітуму відбувається при його прогріванні за методом RTFOT. При цьому різниця температур розм'якшеності є тим меншою чим більша пенетрація бітуму. Також слід зазначити, що для менш в'язкого бітуму, при його прогріванні

за методом RTFOT, властиві менші зміни температури розм'якшеності ніж для більш в'язкого бітуму. При прогріванні згідно ГОСТ 18180 отримуємо дзеркальні результати – чим меш в'язкий бітум тим більше зростання температури розм'якшеності.

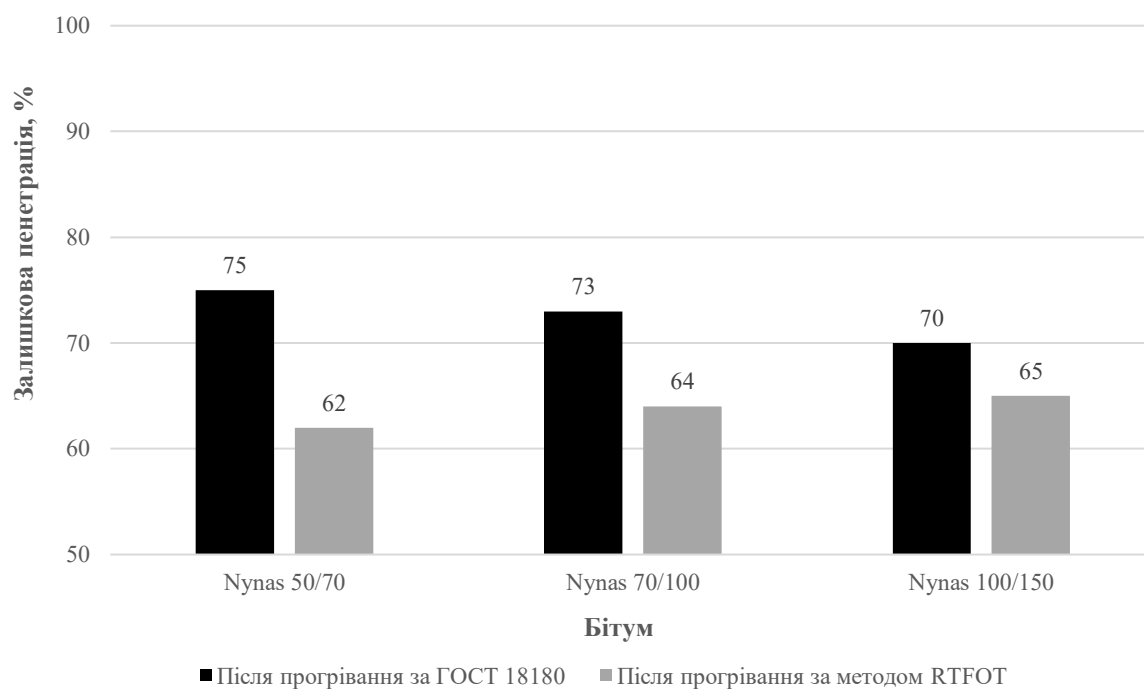


Рисунок 3.12 – Залишкова пенетрація бітумів

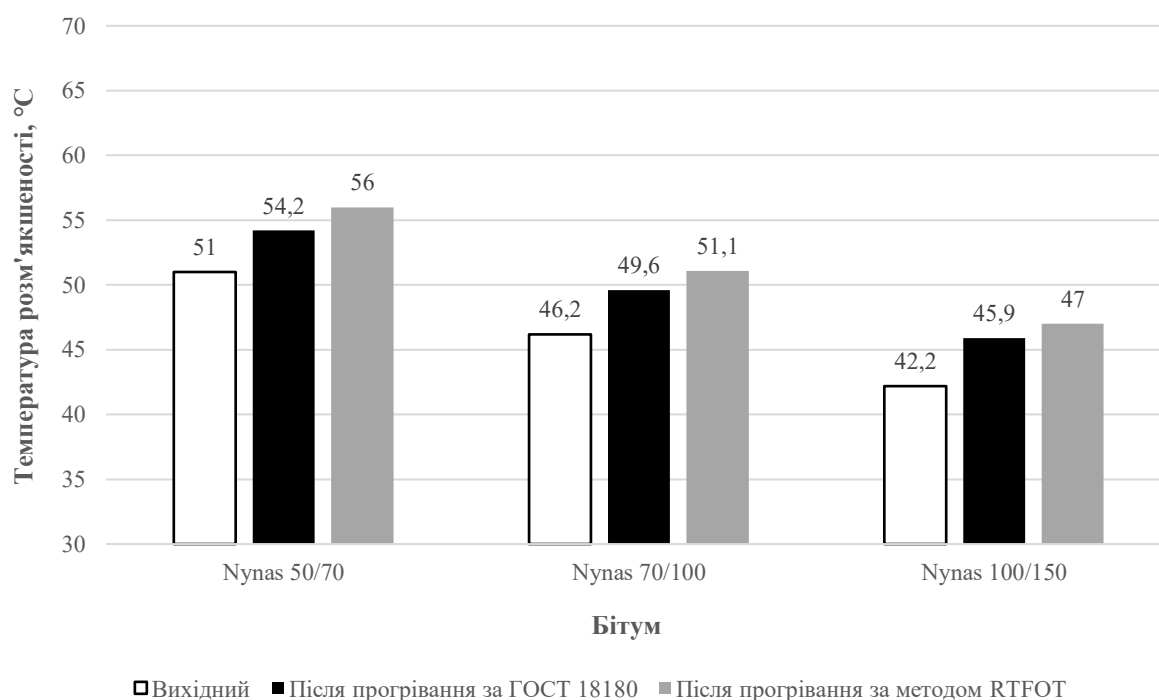


Рисунок 3.13 – Вплив прогрівання бітуму на температуру розм'якшеності

Температура крихкості залишкових бітумів при прогріванні знижується (рисунок 3.14). Прогрівання за методом RTFOT призводить до більшого зниження температури крихкості ніж прогрівання за ГОСТ 18180. Зниження температури крихкості при одночасному підвищенні температури розм'якшеності призводить до розширення інтервалу пластичності випробуваних бітумів з (59 – 65) °С до (67 – 74) °С.

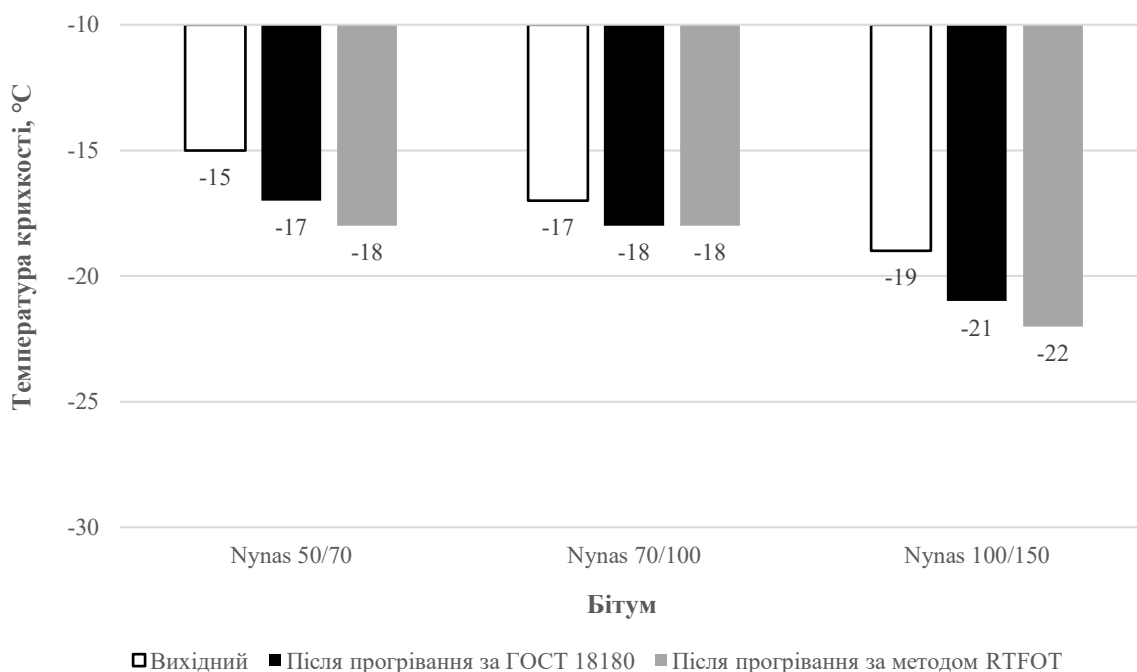


Рисунок 3.14 – Вплив прогрівання бітуму на температуру крихкості

При прогріванні бітумів за обома методами відбувається зростання динамічної в'язкості (рисунок 3.15). Як і в попередніх випадках прогрівання за методом RTFOT призводить до більших змін ніж прогрівання за ГОСТ 18180.

Індекс старіння бітумів при прогріванні за методом RTFOT, як і у випадку окиснених бітумів, збільшується із зниженням пенетрації вихідного бітуму (рисунок 3.16). Також слід зазначити, що на відміну від залишкової пенетрації бітумів, прогрітих згідно ГОСТ 18180, яка із збільшенням в'язкості вихідного бітуму зменшується, індекс старіння є меншим у бітумів з більшою глибиною проникнення голки.

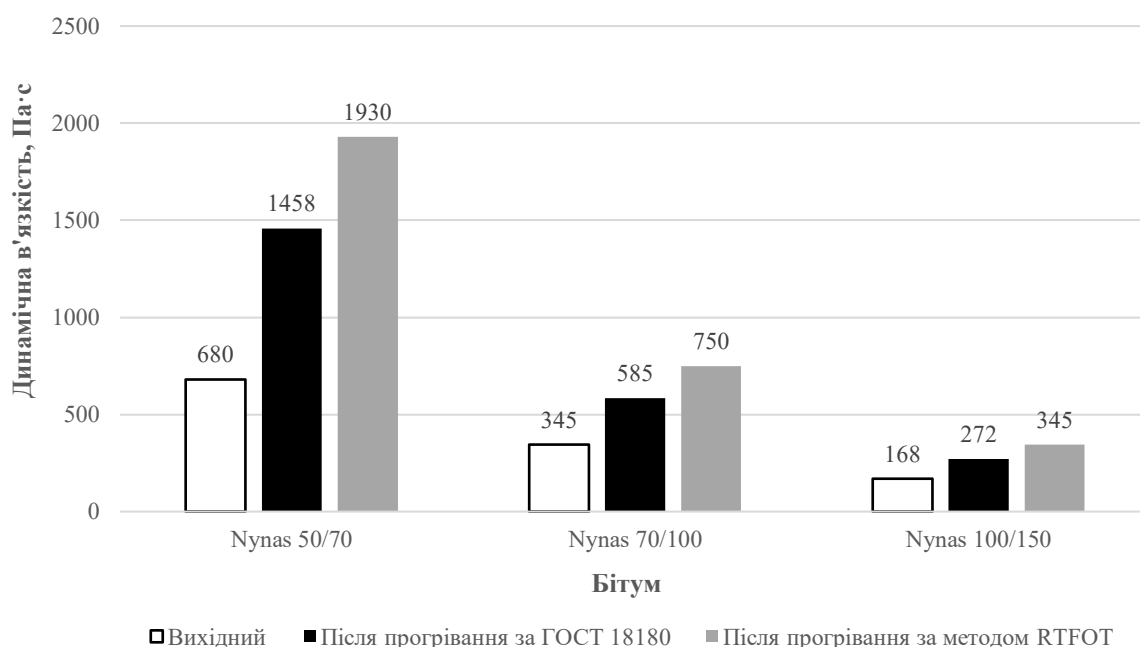


Рисунок 3.15 – Вплив прогрівання бітуму на динамічну в'язкість

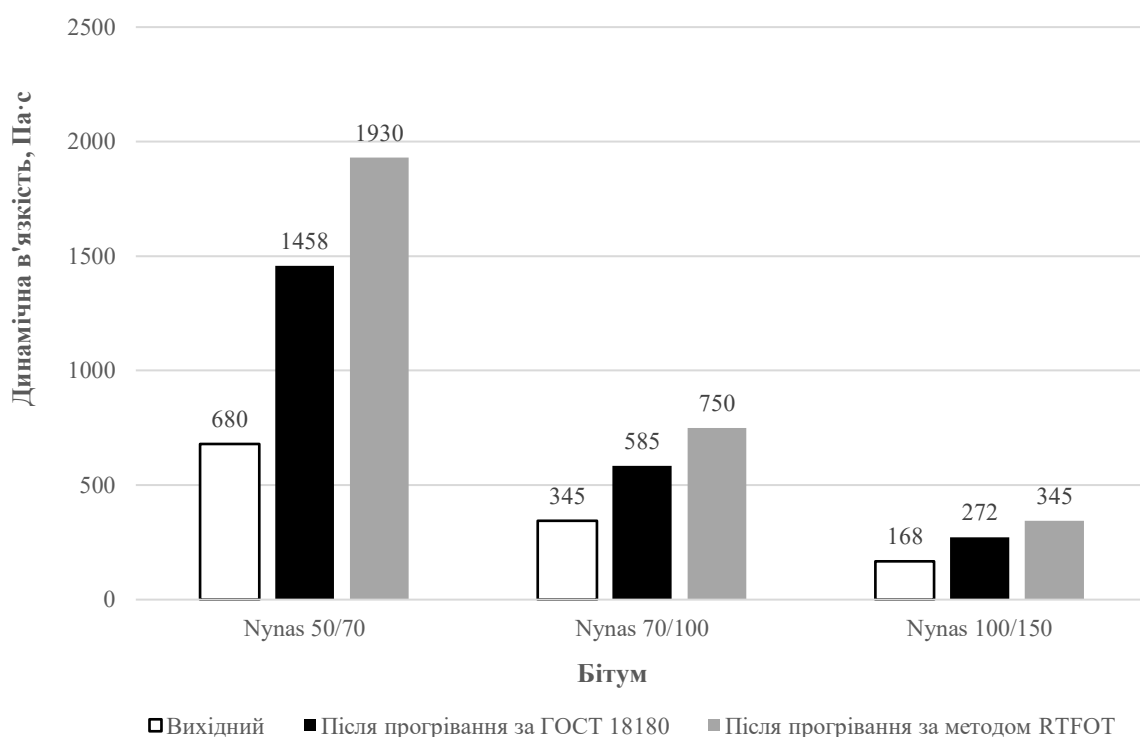


Рисунок 3.16 – Індекс старіння бітумів

Отримані результати випробувань залишкових бітумів підтверджують припущення, що бітуми з більшою пенетрацією є більш стійкими до термоокиснювального старіння.

3.5 Порівняльний аналіз зміни властивостей окиснених та залишкових бітумів

Для порівняльного аналізу було прийнято європейські бітуми Nynas марок 50/70, 70/100, 100/150, а також окиснені бітуми ВАТ «Мозирський НПЗ» марок БНД 40/60, БНД 60/90 і БНД 90/130 з близькою пенетрацією кожної пари. Результати випробування наведено в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Результати визначення впливу старіння на властивості бітуму

Найменування показника	Результати випробування бітуму					
	50/70	БНД 40/60	70/100	БНД 60/90	100/150	БНД 90/130
Глибина проникності голки (пенетрація) за температури 25 °С, 0,1 мм	52	58	77	77	106	106
Температура розм'якшеності за кільцем і кулею, °С	51,0	52,0	46,2	48,5	42,2	46,0
Температура крихкості, °С	-15	-22	-17	-25	-19	-27
Зміна маси, %						
- після прогрівання за ГОСТ 18180	0,49	0,31	0,53	0,42	0,58	0,62
- після прогрівання за методом RTFOT	0,49	0,37	0,58	0,48	0,70	0,70
Залишкова пенетрація, %						
- після прогрівання за ГОСТ 18180	75	81	73	77	70	70
- після прогрівання за методом RTFOT	62	78	64	74	65	69
Зміна температури розм'якшеності, °С						
- після прогрівання за ГОСТ 18180	3,2	3,6	3,4	4,3	3,7	3,7
- після прогрівання за методом RTFOT	5,0	5,0	4,9	5,5	4,8	4,4
Зміна температури крихкості, °С						
- після прогрівання за ГОСТ 18180	- 2,0	+ 5,0	- 1,0	+ 1,0	- 2,0	+ 1,0
- після прогрівання за методом RTFOT	- 3,0	+ 5,0	- 1,0	+ 1,0	- 3,0	- 3,0
Когезія за температури 25 °С						
- вихідного	0,232	0,110	0,091	0,067	0,057	0,037
- після прогрівання за ГОСТ 18180	0,223	0,139	0,107	0,104	0,059	0,068
- після прогрівання за методом RTFOT	0,271	0,151	0,135	0,102	0,069	0,061
Індекс пенетрації						
- вихідного	-0,86	-0,36	-1,18	-0,52	-1,56	-0,29
- після прогрівання за ГОСТ 18180	-0,77	-0,04	-1,04	-0,13	-1,37	-0,31
- після прогрівання за методом RTFOT	-0,79	+0,15	-0,98	+0,07	-1,23	-0,16

Отримані результати свідчать про те, що окиснені бітуми в порівнянні з залишковими при практично однакових значеннях пенетрації мають: трохи більшу температуру розм'якшеності; на $(7 - 8) ^\circ\text{C}$ нижчу температуру крихкості; більш широкий інтервал пластичності (на $8 ^\circ\text{C} - 11 ^\circ\text{C}$); більш високі значення індексу пенетрації. Всі перераховані результати свідчать про прояв типових ознак поведінки окиснених бітумів, представників бітумів зі структурою «золь-гель», залишкових - «золь». З урахуванням такої тенденції доцільно розглядати і вплив технологічного старіння на властивості прийнятих до дослідження об'єктів.

Зміна маси бітумів після прогрівання згідно з ГОСТ 18180 нарастає в міру збільшення глибини проникності голки окисненого бітуму від $58 \times 0,1$ мм до $77 \times 0,1$ мм і $106 \times 0,1$ мм відповідно в 1, 1,35 і 2 рази, для залишкових аналогів це співвідношення дорівнює 1, 1,08 і 1,18 разів (рисунок 3.17). Після старіння згідно з RTFOT втрата маси є трохи більшою, ніж після витримування в чашці Петрі згідно з ГОСТ 18180, а співвідношення мас в ряду окислених бітумів складає 1, 1,29, 1,89. В ряду залишкових бітумів ці співвідношення рівні 1, 1,18 і 1,43.

Результати випробувань за методом RTFOT, які оцінюються за цим співвідношенням, є більш чутливими до структурного типу бітумів. Втрати маси згідно з RTFOT є трохи вищими, ніж в разі випробування згідно ГОСТ 18180 (на $0,2 \% - 0,12 \%$).

Температура розм'якшеності після старіння згідно ГОСТ 18180 і RTFOT слабо реагує на перехід від більш в'язкого до менш в'язкого бітуму (рисунок 3.18): різниця в ряду залишкових бітумів, зістарених згідно з ГОСТ 18180, становить $0,5 ^\circ\text{C}$, а окиснених – $0,7 ^\circ\text{C}$; для залишкових бітумів, зістарених згідно з RTFOT, вона відповідає $0,2 ^\circ\text{C}$, а окиснених – $0,4 ^\circ\text{C}$. Ці відхилення знаходяться в межах помилки випробувань як згідно з ГОСТ 18180 ($1,0 ^\circ\text{C}$) так і згідно RTFOT ($1,5 ^\circ\text{C}$).

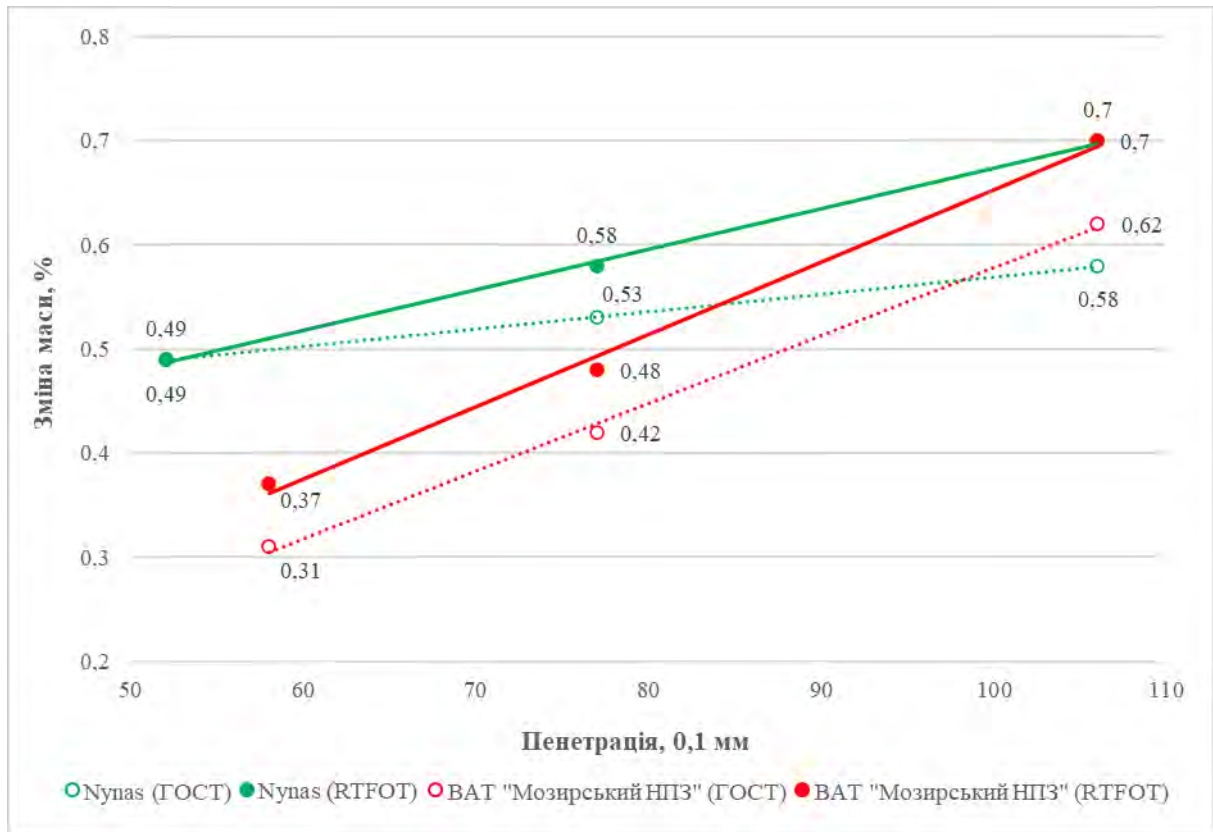


Рисунок 3.17 – Залежність зміни маси бітуму від пенетрації

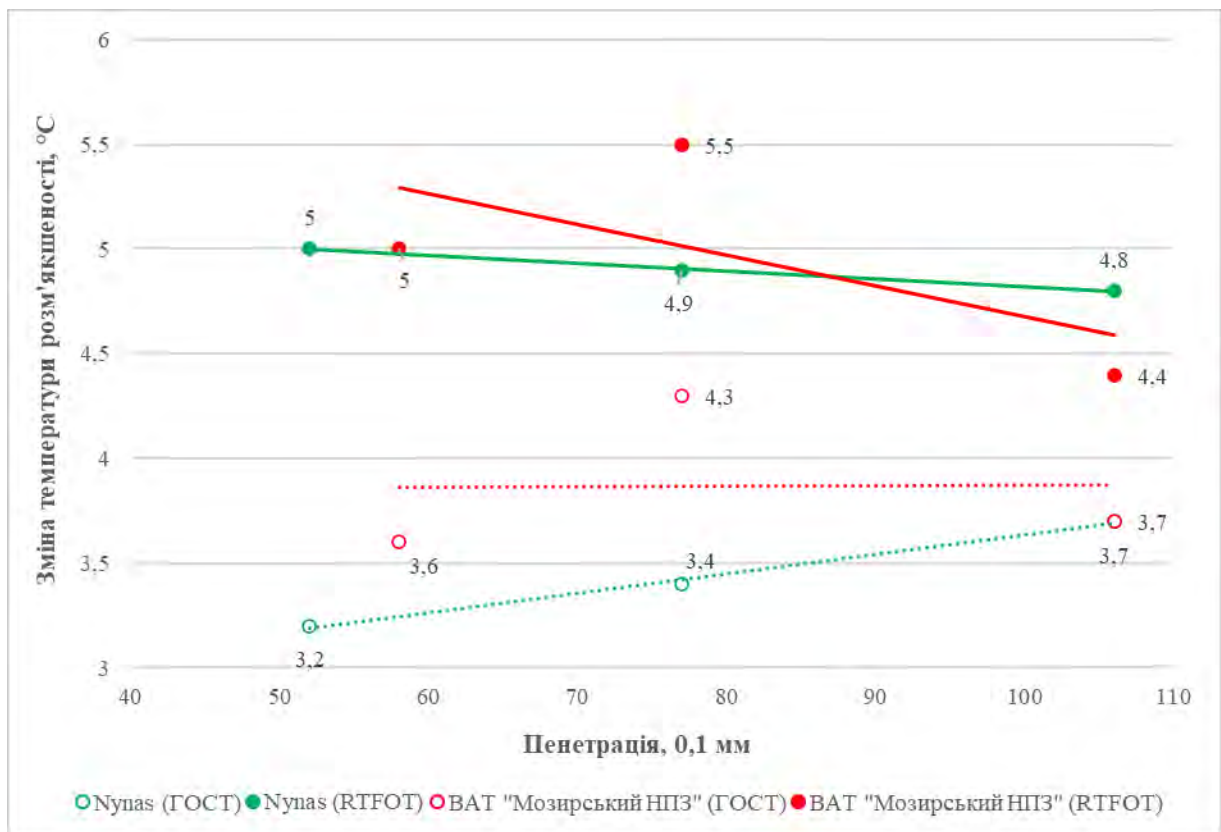


Рисунок 3.18 – Залежність зміни температури розм'якшеності бітуму від пенетрації

У той же час режим випробування з продувкою повітрям згідно з методом RTFOT призводить до більших змін самої температури розм'якшеності, ніж режим випробування згідно з ГОСТ 18180. Для залишкових бітумів ця зміна знаходиться в межах $(4,4 - 5,0) ^\circ\text{C}$, а для окиснених – $(3,6 - 4,3) ^\circ\text{C}$. Ці дані добре збігаються з даними наведеними в [85], згідно з якими середній приріст температури розм'якшеності бітуму з пенетрацією $(35, 40, 37, 38) \times 0,1$ мм дорівнює $5,3 ^\circ\text{C}$. Проте, така реакція температури розм'якшеності на прогрівання за обома методами бітумів різних марок і структурного типу не дозволяє розглядати її в якості надійної характеристики для оцінки старіння бітумів.

Залишкова пенетрація із зміною консистенції окиснених бітумів в 1,82 рази, а залишкових в 2,04 рази, під час прогрівання згідно з ГОСТ 18180 змінюється в першому випадку на 11 %, у другому на – 5 % (рисунок 3.19). Під час прогрівання згідно з RTFOT ці зміни відповідно становлять 9 % і 3 %.

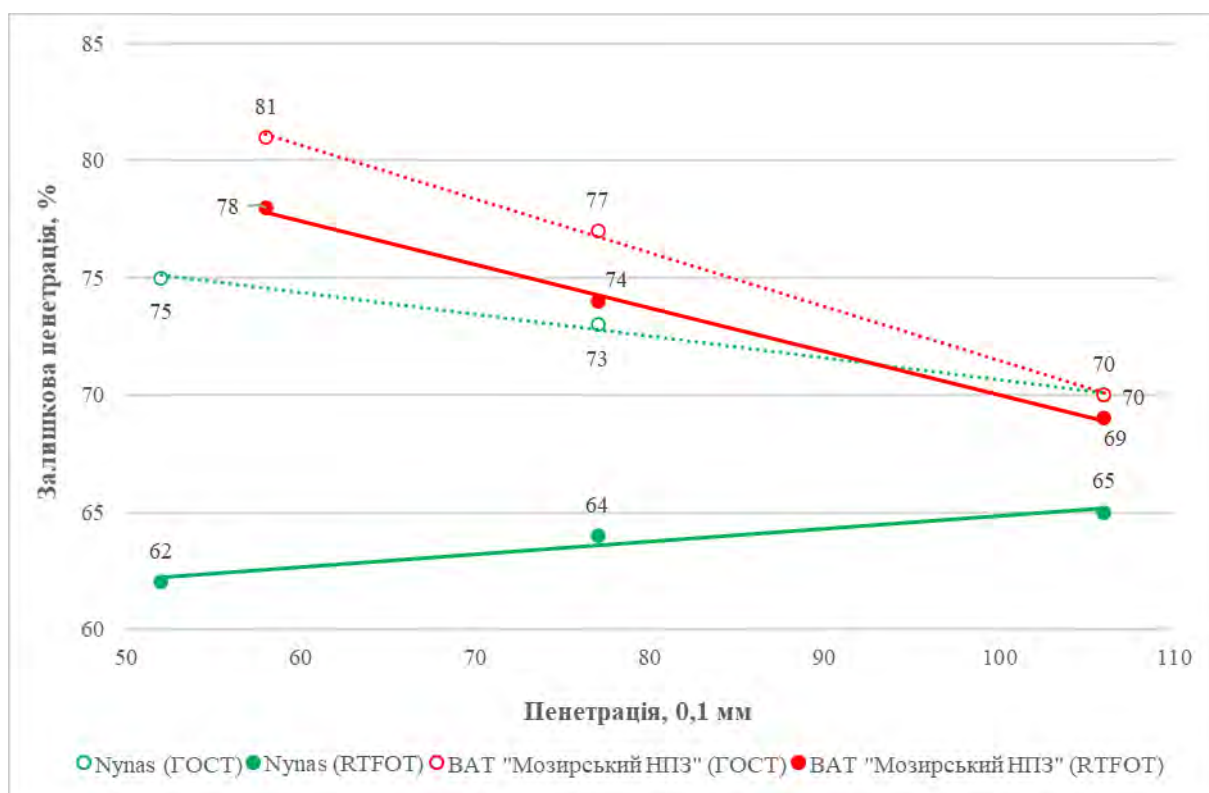


Рисунок 3.19 – Залежність залишкової пенетрації бітуму від пенетрації

Залишкова пенетрація після прогрівання згідно з RTFOT, для всіх досліджуваних бітумів менше, ніж залишкова пенетрація, отримана після прогрівання згідно з ГОСТ 18180. Для залишкових бітумів вона вище на (13, 9, 5) %, а для окиснених на (4, 3, 1) %. Одним з пояснень високих значень залишкової пенетрації при пасивному прогріванні бітуму в тонкому шарі (ГОСТ 18180) може служити те, що в цьому випадку головною причиною старіння є випаровування легких фракцій, тоді як у разі RTFOT в цей процес включається і окиснювальна полімеризація, ініційована рівномірним контактом всієї маси бітуму з повітрям, а не тільки його поверхні. Певною мірою можна вважати, що метод RTFOT близький за своєю сутністю до технології отримання бітумів окисненням.

З потенційних показників оцінки старіння виключена зміна розтяжності після старіння, тому що розтяжність бітумів визначається, головним чином, вмістом в них смол [18]. Великий вміст смол призводить до величезної (більше 2 м) розтяжності залишкових бітумів типу «золь», а малий їх вміст до вкрай низької розтяжності окиснених бітумів типу «гель» (до 20 см). У той же час в процесі старіння вміст смол в бітумах змінюється незначним чином [18], і, отже, мало змінюється еластичність, а зміна їх когезії при цьому майже в 5 разів менше, ніж когезії масел. За даними [87] в ряду залишкових бітумів з пенетрацією (45, 41, 45, 47) $\times$ 0,1 мм після старіння згідно RTFOT вміст смол змінився відповідно на: 2,7 %, 1,1 %, 1,9 % і 2,5 %. До того ж, значення показників розтяжності погано відтворюється на малій кількості зразків.

Температура крихкості, як температура переходу бітуму в склуватий стан, в останні роки піддається небезпідставній критиці з багатьох причин. У зв'язку з цим в систему SHRP Superpave [86] включено еквімодульну температуру (T_{300}), яка відповідає значенню модуля жорсткості бітуму 300 МПа, і коефіцієнту пластичності рівному 0,3, який визначають, використовуючи балочний реометр. Не вдаючись в аналіз переваг і недоліків цього методу і критеріїв, можна відзначити, що за даними [87],

наведеним в таблиці 3.12, роздільна здатність ізомодульних температур (T_{300}) щодо оцінки старіння бітумів різних марок (з пенетрацією від $18 \cdot 0,1$ мм до $66 \cdot 0,1$ мм) не є вищою за температуру крихкості за Фраасом: відхилення по ізомодульній температурі для всіх досліджених зразків після прогрівання в порівнянні з T_{300} до прогрівання становить $0,93$ °С, а по температурі крихкості - $0,91$ °С.

Таблиця 3.12 – Вплив прогрівання згідно з RTFOT на ізомодульні температури і коефіцієнти пластичності за даними [87]

Марка бітуму	Ізомодульна температура		Коефіцієнт пластичності	
	до прогрівання	після RTFOT	до прогрівання	після RTFOT
35/50 (1)	-15,5/-10	-14,5/-9	0,33	0,32
35/50 (2)	-13,3/-8	-12,3/-8	0,31	0,29
35/50 (3)	-17,6/-12	-16,5/-11	0,31	0,29
35/50 (4)	-18,7/-16	-17,4/-14	0,32	0,29
50/70 (5)	-16,7/-13	-15,9/-13	0,32	0,29
50/70 (6)	-16,7/-11	-16,3/-12	0,32	0,30
50/70 (7)	-19,5/-17	-18,3/-15	0,33	0,30
50/70 (8)	-18,7/-18	-17,8/-16	0,33	0,31
10/20 (10)	-12,8/-7	-11,8/-7	0,32	0,31
10/20 (11)	-11,8/-7	-10,3/-6	0,30	0,29
20/30 (12)	-14,3/-7	-13,3/-4	0,30	0,28
20/30 (13)	-14,8/-9	-13,7/-8	0,30	0,28

Якщо ізомодульні температури дійсно відповідають переходу бітуму з пружньо-в'язкого в крихкий (склуватий) стан, то коефіцієнти пластичності не повинні залежати від консистенції і ступеню старіння. За цієї температури коефіцієнти пластичності всіх об'єктів повинні бути практично однаковими. Це по суті і впливає з даних [87]: середнє значення коефіцієнта пластичності по 12 об'єктам до прогрівання дорівнює 0,301, а після прогрівання 0,296. Максимальне відхилення від середнього відповідно становить 0,015 і 0,024. Оскільки значення « m » визначають графічно, то важко припустити, що відхилення в межах (5 – 8) % може об'єктивно

відображати особливості старіння бітумів. Швидше це свідчить про користь порівняльного для всіх бітумів ступеня наближення до крихкого стану.

3.6 Оцінювання старіння бітумів за реологічними показниками

Типові залежності між напруженням і швидкістю зсуву для окиснених бітумів наведено на рисунку 3.20, а значення коефіцієнтів аномалії в'язкості в таблиці 3.13. Судячи зі значень «с» плин всіх вихідних бітумів за температури 60 °С і прийнятих напруженнях зсуву є близьким до ньютонівського. Підвищення температури випробування ще більше наближає бітуми до систем з ньютонівським типом плину. Це підтверджується характером кривих плину бітумів БНД 40/60, БНД 60/90 і БНД 90/130.

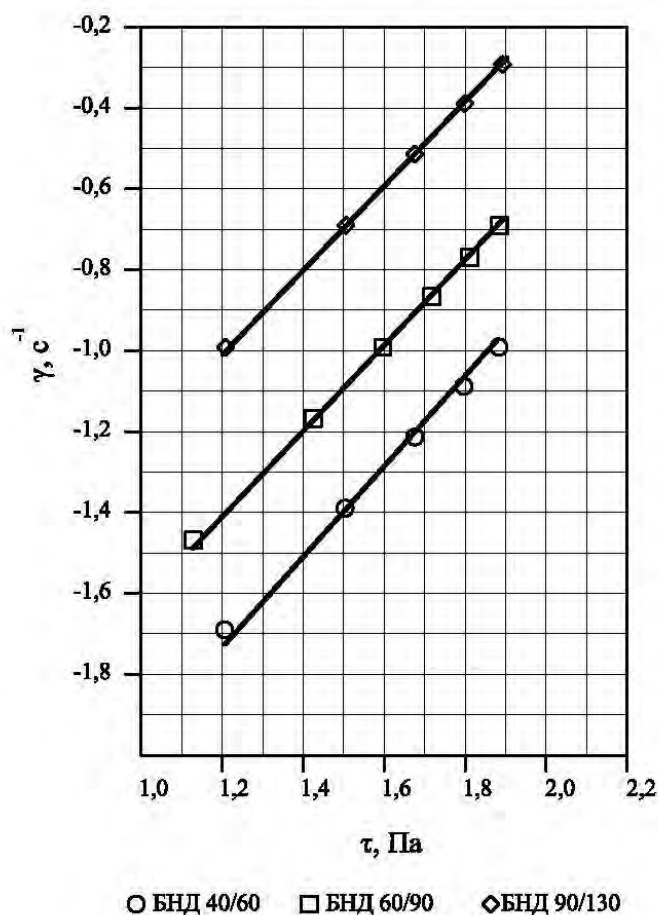


Рисунок 3.20 – Криві плину окиснених бітумів за температури 60 °С

Таблиця 3.13 – Коефіцієнт аномалії в'язкості

Коефіцієнт аномалії в'язкості за температури 60 °C	Бітум					
	Nynas 50/70	Nynas 70/100	Nynas 100/150	БНД 40/60	БНД 60/90	БНД 90/130
До прогрівання	0,97	0,98	0,98	0,89	0,94	0,96
Після прогрівання згідно з ГОСТ 18180	0,96	0,98	0,98	0,86	0,92	0,91
Після прогрівання згідно з RTFOT	0,95	0,97	0,98	0,85	0,90	0,90

Старіння бітумів згідно обох методів призводить до підвищення в'язкості, завжди більшого під час випробування згідно з RTFOT (таблиця 3.14). Це збільшення за температури 60 °C в окиснених бітумів змінюється в межах: 1,28; 1,11; 1,12. У дистиляційних бітумів воно змінюється від 1,32 до 1,28 і 1,27. Отже, дистиляційні бітуми більше реагують на метод прогрівання з продувкою повітрям. Це підтверджується і результатами випробування за температури 90 °C, 135 °C і 160 °C.

Різна реакція на метод прогрівання згідно з RTFOT окиснених і дистиляційних бітумів може бути пов'язана з різним характером протікання в них фізичних та хімічних процесів. У перших можуть превалювати процеси випаровування летких фракцій, у других - реакції полімеризації в присутності повітря, яким вони не піддавалися в процесі дистиляції. У стандартах ЄС і США допускається збільшення маси в процесі прогрівання, що передбачає можливість таких процесів. Незалежно від цього, як і передбачалося, в'язкість є показником, що найбільшою мірою реагує на зміни складу та структури бітуму під час старіння.

Для оцінки інтенсивності старіння використаний індекс, що є відношенням в'язкості після старіння до вихідної в'язкості бітуму. Результати визначення індексу старіння при двох методах прогрівання наведено в таблиці 4.6. Вони свідчать про те, що жодна інша характеристика не може зрівнятися з в'язкістю щодо чутливості бітумів до прогрівання.

Найменування показника	Результати випробування бітуму					
	Nynas 50/70	Nynas 70/100	Nynas 100/150	БНД 40/60	БНД 60/90	БНД 90/130
Динамічна в'язкість за температури розм'якшеності, Па·с:						
— вихідного	3140/1,0	2260/1,0	2900/1,0	2000/1,0	2400/1,0	1260/1,0
— після прогрівання згідно з ГОСТ 18180	3200/1,02	3500/1,54	3000/1,03	3000/1,5	2600/1,08	2100/1,67
— після прогрівання згідно з RTFOT	3400/1,08	3600/1,59	3100/1,07	3100/1,65	2800/1,17	2300/1,82
Динамічна в'язкість за температури 60 °С, Па·с:						
— вихідного	680/1,0	775/1,0	345/1,0	390/1,0	168/1,0	155/1,0
— після прогрівання згідно з ГОСТ 18180	1458/2,14	1800/2,32	585/1,7	955/2,45	272/1,62	385/2,48
— після прогрівання згідно з RTFOT	1930/2,83	2300/2,96	750/2,17	1060/2,71	345/2,05	430/2,77
Динамічна в'язкість за температури 90 °С, Па·с:						
— вихідного	14,3/1,0	20,0/1,0	9,7/1,0	14,3/1,10	6,0/1,0	4,0/1,0
— після прогрівання згідно з ГОСТ 18180	30,9/2,16	37,5/1,87	16,6/1,71	22,0/1,53	9,6/1,6	8,0/2,0
— після прогрівання згідно з RTFOT	41,0/2,86	38,5/1,92	21,1/2,17	23,6/1,65	12,2/2,0	7,7/1,9
Динамічна в'язкість за температури 135 °С, Па·с:						
— вихідного	0,43/1,0	0,73/1,0	0,37/1,0	0,55/1,0	0,27/1,0	0,26/1,10
— після прогрівання згідно з ГОСТ 18180	0,93/2,16	1,17/1,60	0,63/1,7	0,81/1,47	0,43/1,6	0,39/1,50
— після прогрівання згідно з RTFOT	1,23/2,86	1,13/1,65	0,81/2,18	0,86/1,56	0,55/2,01	0,38/1,46
Динамічна в'язкість за температури 160 °С, Па·с						
— вихідного	0,12/1,0	0,17/1,0	0,11/1,17	0,12/1,0	0,08/1,0	—
— після прогрівання згідно з ГОСТ 18180	0,26/2,16	0,31/1,76	0,19/1,7	0,24/2,0	0,13/1,62	—
— після прогрівання згідно з RTFOT	0,35/2,9	0,33/1,94	0,24/1,04	0,25/2,08	0,17/2,1	—
Еквів'язка температура, °С						
— вихідного	133	141	131	137	126	124
— після прогрівання згідно з ГОСТ 18180	147	151	140	145	133	131
— після прогрівання згідно з RTFOT	153	152	145	146	137	131

Примітка. У знаменнику наведено індекс старіння

Величина індексу старіння по в'язкості в межах однієї пенетрації дистиляційних бітумів практично не залежить від температури визначення в'язкості в межах від 60 °С до 160 °С. У цьому діапазоні температур в'язкість бітуму Nynas 50/70 в результаті випробування за методом RTFOT зростає в 2,83 - 2,90 рази, по методу ГОСТ 18180 – в 2,14 - 2,15 рази.

За тих же умов індекс старіння бітуму Nynas 70/100 при випробуванні згідно з RTFOT знаходиться в межах 2,17 - 2,18, а по ГОСТ 18180 він близький до 1,7. Індекс старіння бітуму Nynas 100/150 відповідає 2,0 - 2,1 і 1,60 - 1,62. Абсолютне значення індексу старіння при випробуванні по RTFOT для залишкових бітумів завжди значно вище, ніж за методом ГОСТ 18180. У той же час відносно окиснених бітумів ця тенденція не настільки очевидна. Більш того, значення індексу старіння зменшуються з підвищенням температури. Крім того, збільшується розкид результатів випробувань – на 36 вимірювань окиснених бітумів припадає 7 викидів, які полягають в порушенні співвідношення між індексами старіння, отриманими для дистиляційних і окиснених бітумів.

Така нестабільність результатів вимірювання в'язкості окиснених бітумів може бути пов'язана з меншою їх колоїдною стабільністю, що підтверджується і розкидом індексів пенетрації, розрахованих за пенетрацією та температурою розм'якшеності. Значення індексу пенетрації залишкових бітумів після прогрівання підвищується на 0,07, 0,20, 0,32, а окиснених бітумів на 0,50, 0,59, 0,45.

Результати визначення в'язкості за температури розм'якшеності показують, що ця температура не є еквів'язкою, як зазвичай прийнято вважати. Для залишкових бітумів в'язкість змінюється від 3140 Па·с ($T_p = 51\text{ °C}$) до 2400 Па·с ($T_p = 42\text{ °C}$), тобто зміни температури розм'якшеності на 1 °С відповідає зміна в'язкості на 82 Па·с. Для окиснених бітумів ця зміна становить 167 Па·с.

Однією з найважливіших технологічних характеристик бітуму є температура його нагрівання для забезпечення якісного перемішування

асфальтобетонних сумішей. Ця температура ($T_{0,5}$) повинна відповідати в'язкості $0,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ($0,2 \text{ Па}\cdot\text{с}$ – в Європі). Зміна цієї температури на будь-якій стадії підготовки бітуму (при завантаженні в бітумовози, при транспортуванні або нагріванні на АБЗ) може змінити її в сторону підвищення через перегрів. Ігнорування цього факту може призвести до погіршення умов перемішування і ущільнення, так як виробнича температура може бути меншою, ніж $T_{0,5}$. Для дослідження впливу термостаріння за двома способам на $T_{0,5}$ були використані температурні залежності в'язкості (рисунк 3.21, таблиця 3.15).

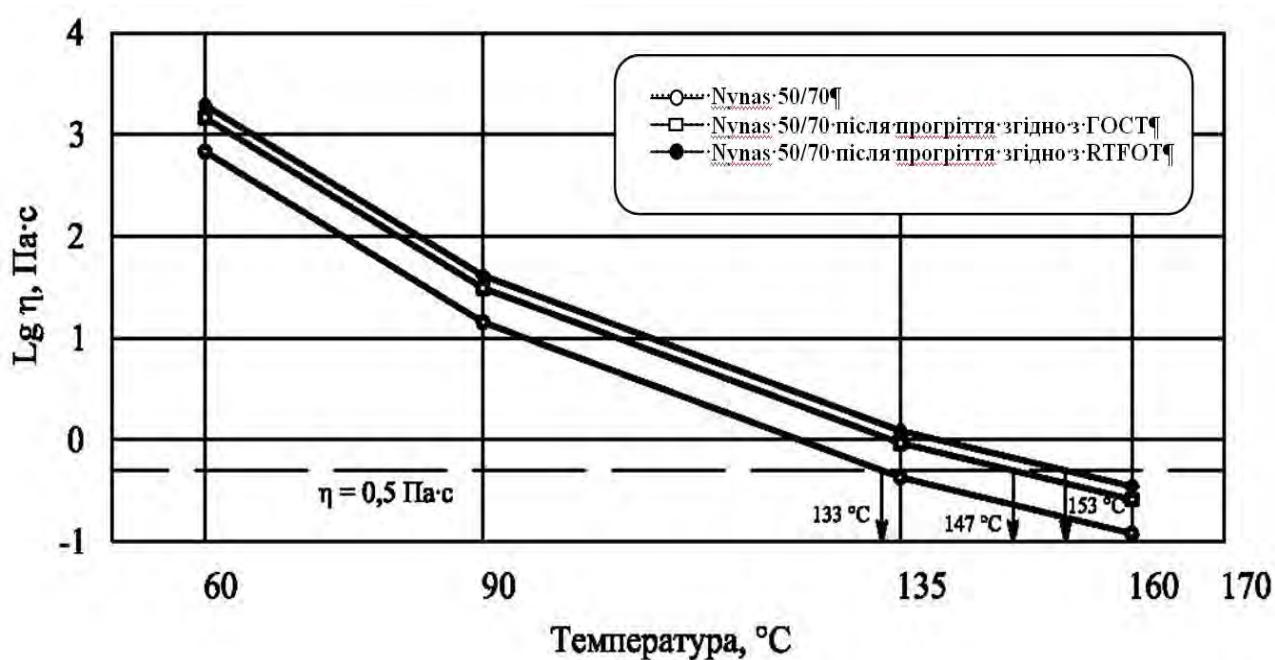


Рисунок 3.21 – Залежність в'язкості бітуму від температури

Таблиця 3.15 – Зміна еквів'язкої температури після старіння

Показник	Бітум					
	Nynas 50/70	Nynas 70/100	Nynas 100/150	БНД 40/60	БНД 60/90	БНД 90/130
Еквів'язка температура, °C						
– вихідного	133	131	126	141	137	124
– після прогрівання згідно з ГОСТ 18180	<u>147</u> △ 14	<u>140</u> △ 9	<u>133</u> △ 7	<u>151</u> △ 10	<u>145</u> △ 8	<u>131</u> △ 7
– після прогрівання згідно з RTFOT	<u>153</u> △ 20	<u>145</u> △ 14	<u>137</u> △ 11	<u>152</u> △ 11	<u>146</u> △ 9	<u>131</u> △ 7

Еквіпенетраційні температури вихідних бітумів зменшуються в міру зниження penetрації. В ряду залишкових бітумів це зменшення становить 7°C , а в ряду окиснених – 17°C . Температура $T_{0,5}$ після прогрівання залишкових бітумів згідно з RTFOT зростає на $(11 - 20)^{\circ}\text{C}$, а окиснених бітумів на $(7 - 11)^{\circ}\text{C}$. Після прогрівання по ГОСТ 18180 це збільшення для залишкових бітумів складає $(7 - 14)^{\circ}\text{C}$, а окиснених – $(7 - 10)^{\circ}\text{C}$. Подібна тенденція спостерігається і щодо залишкової penetрації окиснених бітумів. Після прогрівання по ГОСТ 18180 залишкова penetрація бітумів БНД 40/60, БНД 60/90 і БНД 90/130 дорівнює 81 %, 77 %, 70 %, а після прогрівання по RTFOT – відповідно 78 %, 74 %, 69 %, тобто різниця залишкових penetрацій становить 3,3 % і 1 %. У цих же умовах різниця залишкової penetрації дистиляційних бітумів Nynas 50/70, Nynas 70/100 та Nynas 100/150 дорівнює відповідно 13 %, 9 % і 7 %.

3.7 Вплив добавки на основі поверхнево-активних речовин на стійкість бітуму до технологічного старіння

Результати випробувань бітумів з добавкою на основі поверхнево-активних речовин (далі – ПАР) наведено в таблиці 3.16.

Прогрівання вихідного бітуму згідно ГОСТ 18180 призводить до зниження його penetрації за температури 25°C з $67 \cdot 0,1$ мм до $48 \cdot 0,1$ мм, а при прогріванні згідно методу RTFOT – до $40 \cdot 0,1$ мм (рисунок 3.22). Penетрація бітуму, що вміщує ПАР, при прогріванні за обома методами знижується менш інтенсивно, що вказує на підвищення стійкості бітуму до термоокиснювального старіння. Підтвердженням цього також є значення залишкової penetрації бітумів (рисунок 3.23). Залишкова penetрація вихідного бітуму після прогрівання за методом ГОСТ 18180 та методом RTFOT становить 72 % та 60 %, відповідно. При введенні 0,5 % ПАР залишкова penetрація після прогрівання за методом ГОСТ 18180 зростає до 79 %, а після прогрівання за методом RTFOT – до 72 %.

Таблиця 3.16 – Вплив ПАР на стійкість бітуму до старіння

Найменування показників	Результати випробувань бітуму ПАТ «Укртатнафта» марки БНД 60/90 з вмістом ПАР, %			
	0,0	0,5	0,75	1,0
Глибина проникності голки (пенетрація) за температури 25 °С, 0,1 мм:				
- до прогрівання	67	68	70	72
- після прогрівання за ГОСТ 18180	48	54	55	57
- після прогрівання за методом RTFOT	40	49	52	54
Температура розм'якшеності за кільцем і кулею, °С:				
- до прогрівання	49,7	49,2	48,8	48,2
- після прогрівання за ГОСТ 18180	53,2	52,6	52,2	51,8
- після прогрівання за методом RTFOT	54,7	53,8	53,2	52,5
Температура крихкості, °С:				
- до прогрівання	- 23,5	- 22	- 22	- 22
- після прогрівання за ГОСТ 18180	- 21	- 20	- 20	- 20
- після прогрівання за методом RTFOT	- 21	- 18	- 18	- 18
Динамічна в'язкість за температури 60 °С, Па · с:				
- до прогрівання	390	420	405	380
- після прогрівання за ГОСТ 18180	870	820	790	730
- після прогрівання за методом RTFOT	1217	1090	1020	940
Зміна маси, %:				
- після прогрівання за ГОСТ 18180	-0,35	-0,15	-0,17	-0,20
- після прогрівання за методом RTFOT	-0,03	-0,11	-0,11	-0,14
Індекс старіння:				
- після прогрівання за ГОСТ 18180	2,23	1,95	1,95	1,92
- після прогрівання за методом RTFOT	3,12	2,60	2,52	2,47
Залишкова пенетрація:				
- після прогрівання за ГОСТ 18180	72	79	79	79
- після прогрівання за методом RTFOT	60	72	74	75
Зміна температури розм'якшеності, °С:				
- після прогрівання за ГОСТ 18180	3,5	3,4	3,4	3,6
- після прогрівання за методом RTFOT	5,0	4,6	4,4	4,3
Зміна температури крихкості, °С:				
- після прогрівання за ГОСТ 18180	+ 2,5	+ 2	+ 2	+ 2
- після прогрівання за методом RTFOT	+ 2,5	+ 4	+ 4	+ 4

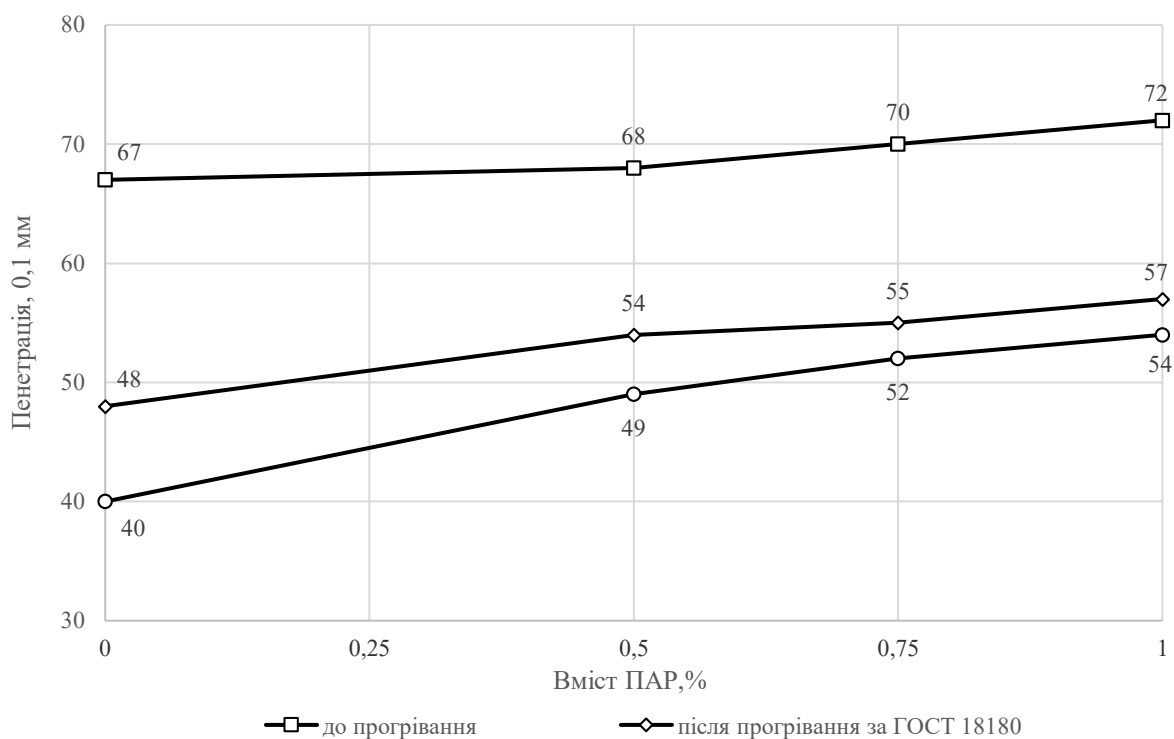


Рисунок 3.22 – Вплив вмісту ПАР на пенетрацію бітуму

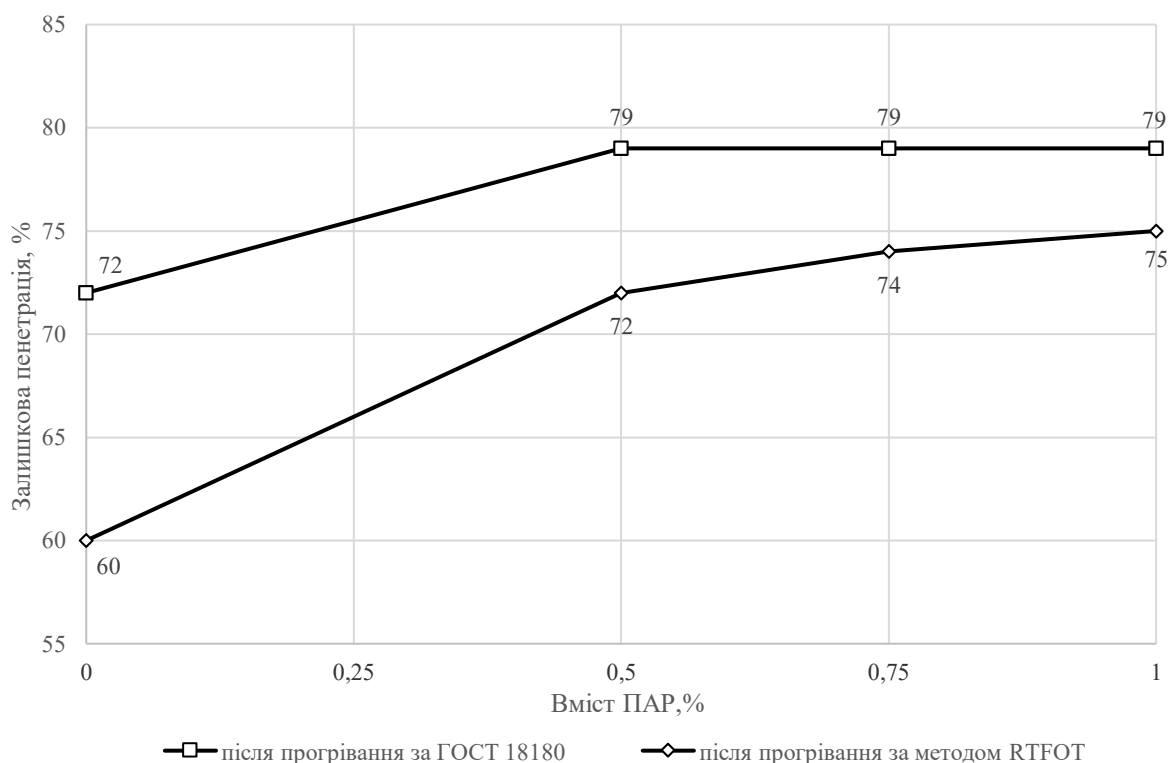


Рисунок 3.23 – Вплив вмісту ПАР на залишкову пенетрацію бітуму

При збільшенні вмісту ПАР до 0,75 % – 1,0 % не відбувається подальшого зростання залишкової пенетрації бітуму після прогрівання за методом ГОСТ 18180, а після прогрівання згідно методу RTFOT залишкова пенетрація зростає до 74 % – 75 %.

Раніше зазначалося, що при прогріванні бітумів за методом ГОСТ 18180 на поверхні досліджуваного зразка утворюються захисна плівка, що перешкоджає доступу повітря в об'єм зразка. При цьому чим менш стійким є бітум до старіння тим швидше утворюється захисна плівка. При прогріванні бітуму за методом RTFOT поверхня бітуму, що контактує з повітрям постійно оновлюється, що унеможливорює утворення захисної плівки. Вищесказане було підтверджено експериментальним шляхом.

Значення залишкової пенетрації досліджених бітумів вказують на те, що захисна плівка на поверхні бітумів, що вміщують добавку ПАР, утворюється менш інтенсивно ніж на поверхні вихідного бітуму, адже різниця залишкових пенетрацій вихідного бітуму становить 16 %, а бітумів з ПАР – 5 % - 9 %. При цьому чим більший вміст добавки тим меншою є різниця залишкових пенетрацій.

Прогрівання бітуму за методом ГОСТ 18180 та RTFOT призводить до зростання температури розм'якшеності бітуму (рисунок 3.24).

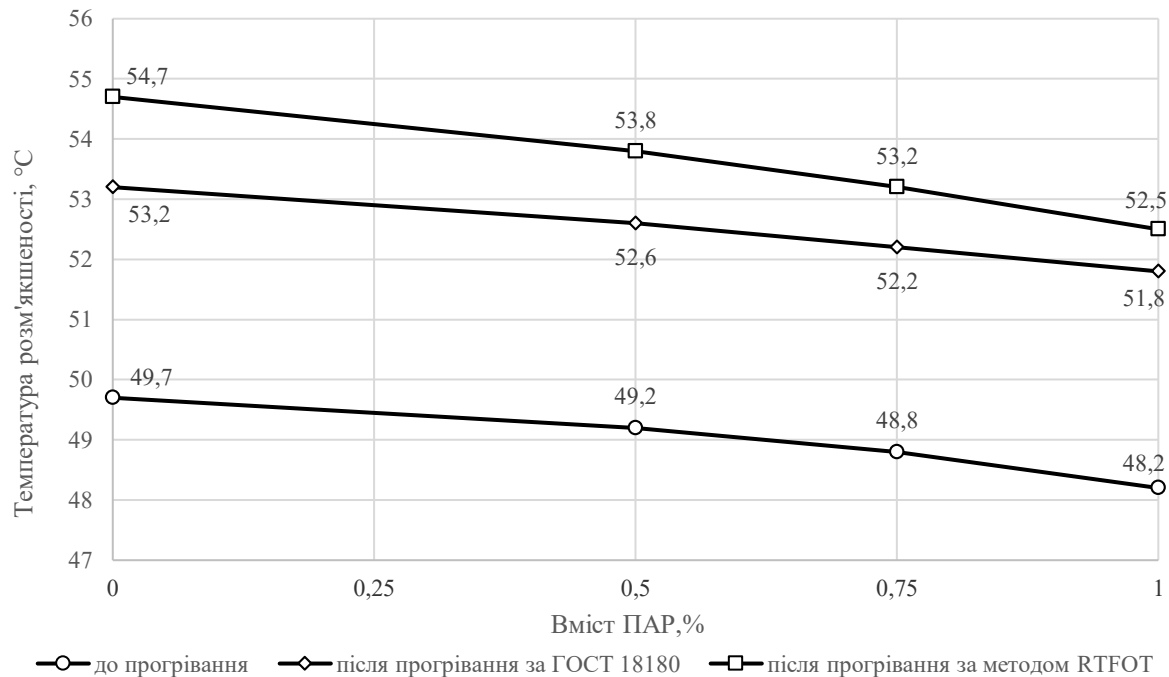


Рисунок 3.24 – Вплив вмісту ПАР на температуру розм'якшеності бітуму

Зміна температури розм'якшеності при прогріванні за методом ГОСТ 18180 є практично однаковою для всіх бітумів. Значення результатів

випробувань знаходяться в межах похибки експерименту. При прогріванні за методом RTFOT, отримуємо результати, що вказують на підвищення стійкості бітумів до старіння при введенні ПАР (рисунок 3.25). Адже зміна температури розм'якшеності вихідного бітуму становить $5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для бітуму з $0,5\%$ добавки ПАР – $4,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. При збільшенні вмісту добавки до $0,75\%$ та $1,0\%$ зміна температури розм'якшеності є ще меншою ($4,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $4,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, відповідно).

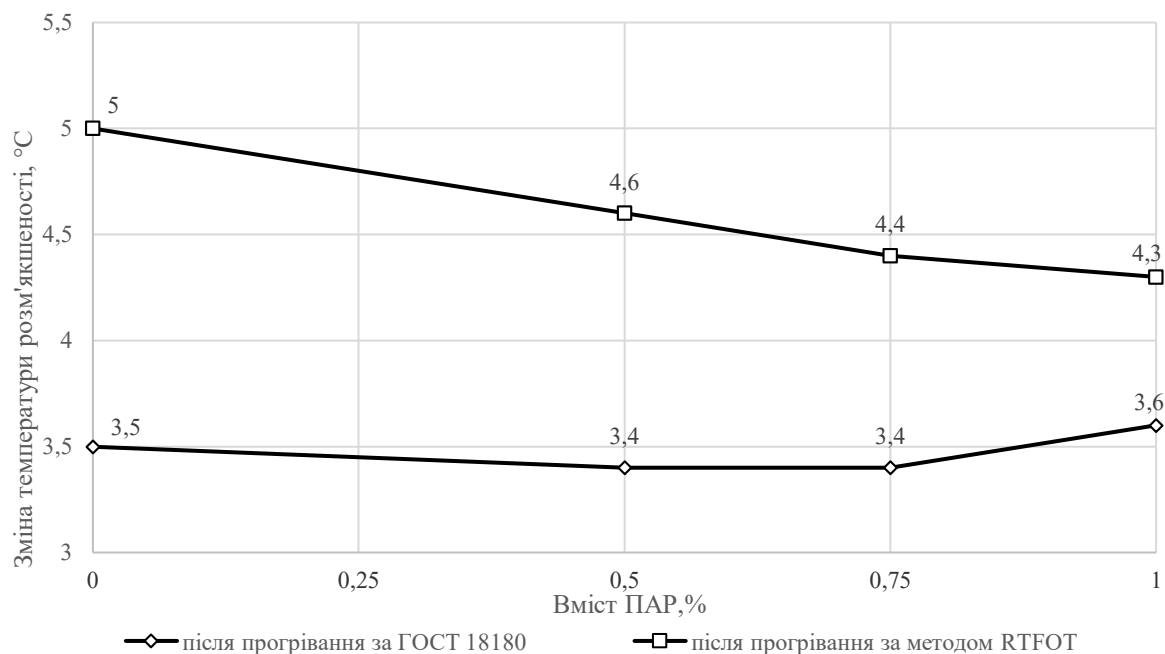


Рисунок 3.25 – Вплив вмісту ПАР на зміну температури розм'якшеності бітуму

Динамічна в'язкість бітумів зростає при їх прогріванні за обома методами (рисунок 3.26). Для бітумів з добавкою ПАР зростання динамічної в'язкості є меншим ніж для вихідного бітуму. В результаті меншого зростання динамічної в'язкості бітумів з ПАР їх індекси старіння також є меншими (рисунок 3.27). Все це вказує на підвищення стійкості бітумів до термоокиснювального старіння при введенні до їх складу ПАР.

Також слід відзначити, що різниця індексів старіння, отриманих при прогріванні бітумів за двома методами для бітумів з $0,5\%$ ПАР є меншою ніж у вихідного бітуму ($0,65$ проти $0,89$), що також може свідчити про меншу інтенсивність утворення захисної окиснювальної плівки на поверхні досліджуваних зразків при їх прогріванні за ГОСТ 18180. Для бітумів з $0,75\%$ та $1,0\%$ ПАР різниця індексів старіння є ще меншою.

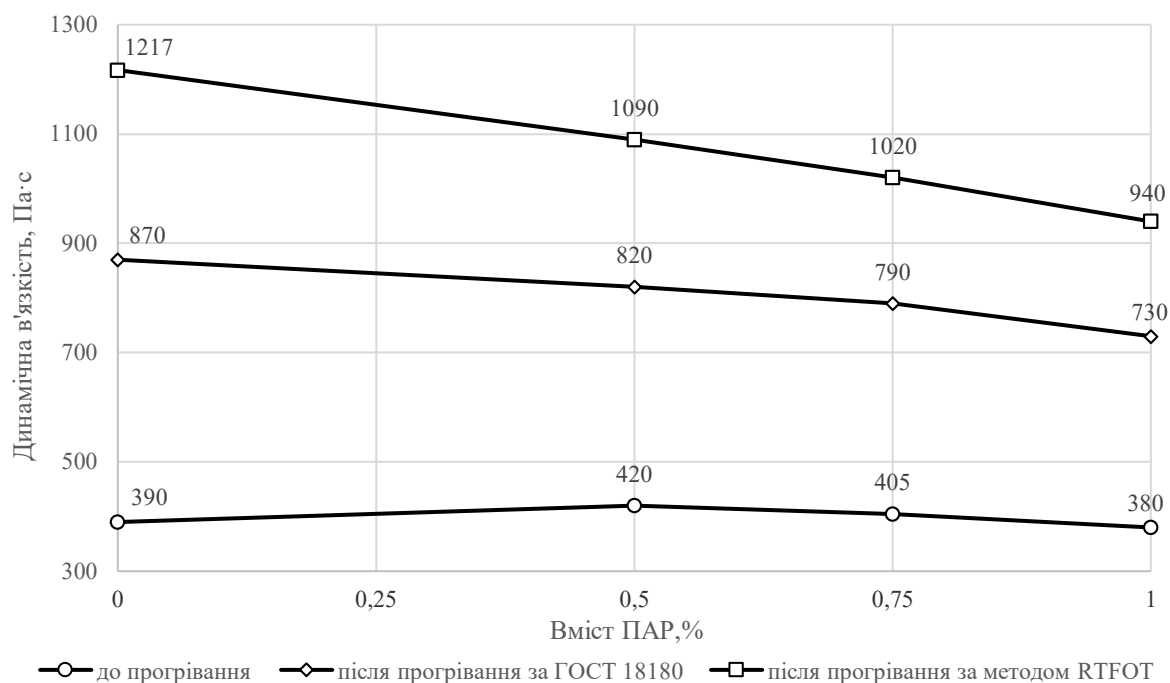


Рисунок 3.26 – Вплив вмісту ПАР на динамічну в'язкість бітуму

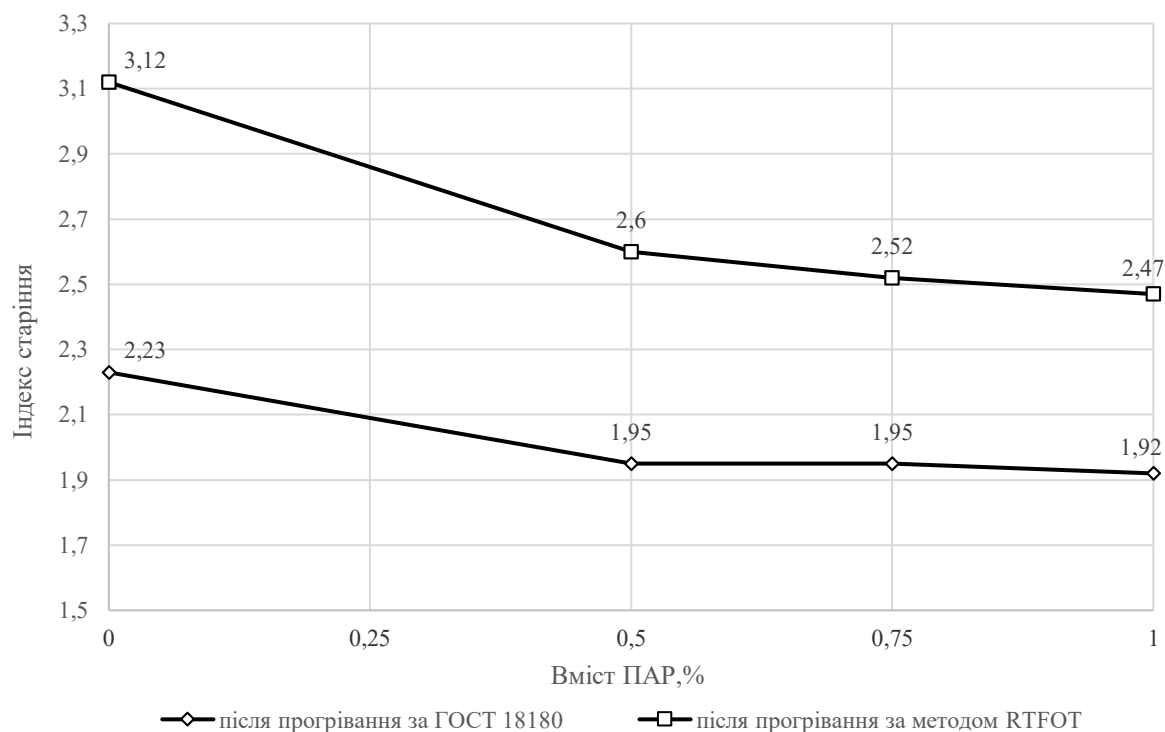


Рисунок 3.27 – Вплив вмісту ПАР на індекс старіння бітуму

Температура крихкості бітумів підвищується при їх прогріванні згідно обох методів (рисунок 3.28). Більше підвищення температури крихкості спостерігається при прогріванні бітумів згідно методу RTFOT. При цьому вміст ПАР не впливає на підвищення температури крихкості (рисунок 3.29).

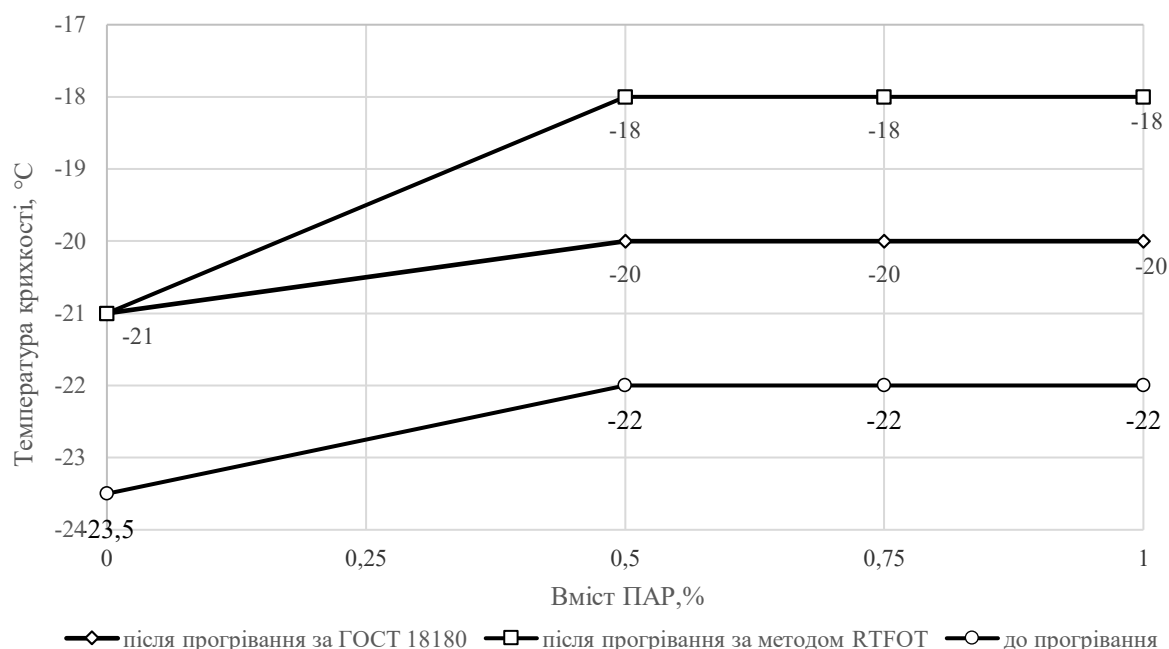


Рисунок 3.28 – Вплив вмісту ПАР на температуру крихкості бітуму

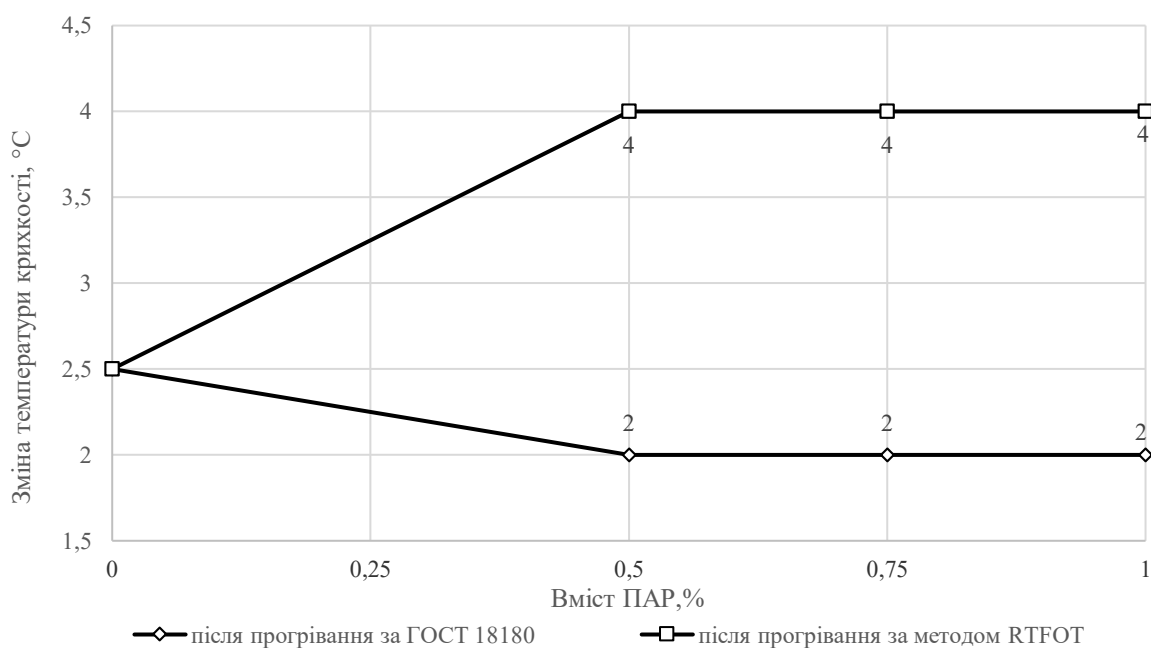


Рисунок 3.29 – Вплив вмісту ПАР на зміну температури крихкості бітуму

При прогріванні бітумів має місце зміна їх маси (рисунок 3.30). При прогріванні згідно ГОСТ 18180 бітуми з ПАР відзначаються меншими змінами маси ніж вихідний бітум. В той же час зміна маси бітумів з ПАР при прогріванні за методом RTFOT є більшою ніж у вихідного бітуму. Незважаючи на більші зміни фізико-технічних властивостей бітумів при їх

прогріванні за методом RTFOT, зміна їх маси після прогрівання за вказаним методом є меншою ніж при прогріванні за методом згідно ГОСТ 18180.

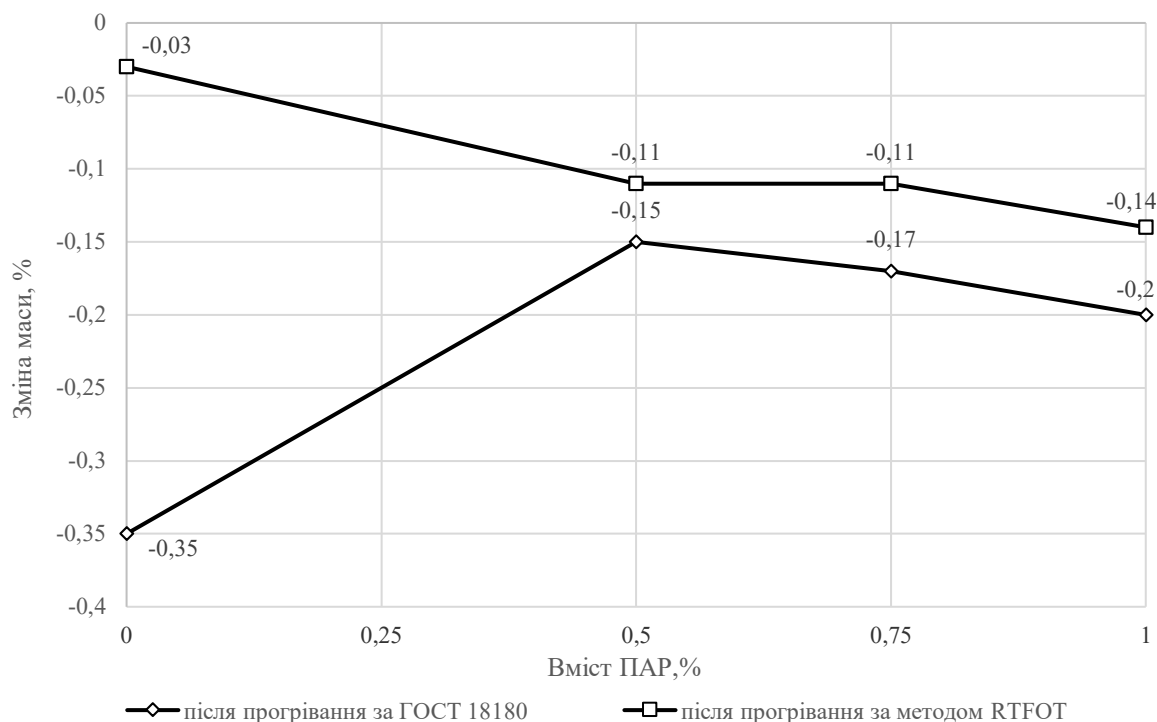


Рисунок 3.30 – Вплив вмісту ПАР на зміну маси бітуму

Таким чином встановлено, що введення ПАР сприяє підвищенню стійкості бітумів до термоокиснювального старіння, що проявляється в менших змінах їх властивостей при прогріванні згідно ГОСТ 18180 та RTFOT.

3.8 Вплив полімеру типу термоеластопластів на стійкість бітуму до технологічного старіння

Основний ефект від модифікації бітуму полімерами полягає в збільшенні температурного інтервалу працездатності та наданні еластичності. Однак, враховуючи те, що внаслідок набрякання та розчинення полімеру відбувається поглинання ним масляних фракцій бітуму, можна припустити, що завдяки цьому полімер може підвищити стійкість бітуму до старіння.

Результати досліджень засвідчили, що термоеластопласт підвищує стійкість бітумів до старіння (таблиця 3.17).

Таблиця 3.17 – Зміна властивостей бітумів, модифікованих полімером, при прогріванні

Бітум	Вміст термоеласто-пласту, %	Результати випробувань					
		Зміна маси, %, при прогріванні згідно		Залишкова пенетрація, %, при прогріванні згідно		Зміна температури розм'якшеності, °С, при прогріванні згідно	
		ГОСТ 18180	RTFOT	ГОСТ 18180	RTFOT	ГОСТ 18180	RTFOT
ВАТ «Мозирський НПЗ» марки БНД 40/60	0	0,31	0,37	81	78	3,6	5,0
ВАТ «Мозирський НПЗ» марки БНД 60/90	0	0,42	0,48	77	74	4,3	5,5
	3	0,25	0,07	88	82	2,0	5,0
ВАТ «Мозирський НПЗ» марки БНД 90/130	0	0,62	0,70	70	69	3,7	4,4
	3	0,36	0,11	89	80	-2,0	1,0
	5	0,24	0,06	96	92	-3,1	-1,0
	9	0,16	0,05	98	98	-0,2	1,0
ПАТ «Укртатнафта» марки БНД 60/90	0	0,35	0,03	72	60	3,5	5,0
	3	0,26	0,02	93	88	3,0	5,0
ПАТ «Укртатнафта» марки БНД 90/130	0	0,46	0,14	67	62	4,1	5,1
	3	0,29	0,10	88	81	-2,0	1,5
	5	0,24	0,07	94	84	-3,0	-2,0
Нунас марки 70/100	0	0,53	0,58	73	64	3,4	4,9
Нунас марки 100/150	0	0,58	0,70	70	65	3,7	4,8
	3	0,42	0,18	81	71	-3,0	1,0
	5	0,34	0,08	91	78	-4,8	-2,2

При введенні 3,0 % термоеластопласту в бітум марки БНД 60/90 ВАТ «Мозирський НПЗ», його залишкова пенетрація після прогрівання згідно з ГОСТ 18180 зростає з 77 % до 88 %, а при прогріванні згідно RTFOT з 74 % до 82 %. Введення тієї ж кількості термоеластопласту в бітум марки БНД 90/130 ВАТ «Мозирський НПЗ» призводить до зростання залишкової пенетрації з 70 % та 69 % до 89 % та 80 %, відповідно. Збільшення вмісту термоеластопласту до 5,0 % призводить до подальшого зростання залишкової пенетрації до 96 % та 92 %, відповідно. При вмісті в бітумі 9,0 % термоеластопласту його залишкова пенетрація становить 98 %, тобто консистенція в'язучого після прогрівання фактично не змінюється.

Введення термоеластопласту в бітуми ПАТ «Укртатнафта» призводить до більшого зростання залишкової пенетрації ніж в бітуми ВАТ «Мозирський НПЗ». Так, для бітуму марки БНД 60/90 ПАТ «Укртатнафта», залишкова пенетрація зростає з 72 % до 93 % при прогріванні згідно ГОСТ 18180, та з 60 % до 88 % при прогріванні згідно RTFOT. Тобто зростання залишкової пенетрації становило 21 % та 28 %. В той же час зростання залишкової пенетрації бітуму марки БНД 60/90 ВАТ «Мозирський НПЗ» становить 11 % та 8 %. При цьому модифіковані бітуми мають близькі значення залишкової пенетрації.

Можна припустити, що незалежно від схильності вихідного окисненого бітуму до старіння, схильність модифікованого бітуму до старіння буде залежати від вмісту термоеластопласту і чим більш схильний до старіння вихідний бітум, тим більшим буде вклад термоеластопласту в підвищення його стійкості до старіння.

Найменшою стійкістю до старіння, за залишковою пенетрацією, відзначаються дистиляційні модифіковані бітуми. В порівнянні з залишковою пенетрацією, підвищення стійкості бітумів до старіння за зміною температури розм'якшеності є набагато меншим.

В більшості випадків результати випробувань знаходяться в межах похибки експерименту. А для бітумів марок БНД 90/130 та 100/150, модифікованих 3,0 % термоеластопласту, після прогрівання згідно ГОСТ 18180 спостерігається зниження температури розм'якшеності в порівнянні з початковим бітумом. Причиною цього може бути деструкція термоеластопласту, але враховуючи незначний приріст температури розм'якшеності після прогрівання згідно EN 12607-1 можна припустити, що зниження температури розм'якшеності відбувається в результаті розшарування модифікованого бітуму при його витримуванні в нерухомому стані за високої температури впродовж тривалого часу. Підтвердженням останнього є також те, що після випробування модифікованого бітуму згідно ГОСТ 18180 у центрі чашки спостерігається утворення студню.

Порівнюючи два способи старіння бітумів, слід відзначити, що при прогріванні бітумів за методом ГОСТ 18180 залишкова penetрація у всіх випадках є більшою, а зміна температури розм'якшеності меншою. Тобто за цим методом старіння бітуму відбувається менш інтенсивно.

В результаті поглинання термоеластопластом масляного середовища бітуму зміна маси модифікованого бітуму після прогрівання за ГОСТ 18180 та EN 12607-1 є значно меншою ніж у вихідного бітуму. На відміну від значень залишкової penetрації та зміни температури розм'якшеності, більші зміни маси модифікованого бітуму відбуваються при його прогріванні згідно ГОСТ 18180.

Таким чином встановлено, що введення полімеру призводить до підвищення стійкості бітумів до термоокиснювального старіння, що проявляється в менших змінах їх властивостей при прогріванні згідно ГОСТ 18180 та RTFOT. Підвищення стійкості бітуму до старіння відбувається як за рахунок зростання його в'язкості, так і за рахунок поглинання полімером масляних фракцій бітуму.

3.9 Оцінювання зміни властивостей асфальтобетонів під час старіння

Старіння бітуму відбувається не тільки на етапі виробництва асфальтобетонних сумішей, але і в процесі служби у складі дорожнього одягу. Для встановлення кількісної зміни властивостей асфальтобетону в часі, було виконання старіння асфальтобетонних сумішей за методом RILEM відповідно до 3.2. Результати випробування асфальтобетонів наведено в таблиці 3.18, таблиці 3.19 та таблиці 3.20.

Таблиця 3.18 – Вплив старіння на властивості асфальтобетону

Найменування показника	Вихідний асфальтобетон на основі АБС, витриманої					
	за температури 135 °С впродовж			за температури 135 °С впродовж 4 год та за температури 85 °С впродовж		
	0	2 год	4 год	2 днів	5 днів	9 днів
Середня густина, г/см ³	2,372	2,368	2,364	2,355	2,347	2,338
Водонасичення, %	1,8	1,9	1,9	2,3	2,6	2,9
Міцність за температури 0 °С, МПа	7,9	8,3	8,7	9,4	9,9	10,6
Міцність за температури 20 °С, МПа	3,1	3,3	3,6	4,0	4,3	4,5
Міцність за температури 50 °С, МПа	1,4	1,5	1,7	2,0	2,4	2,8
Коефіцієнт довготривалої водостійкості	0,91	0,92	0,90	0,88	0,87	0,85

Результати випробування показують, що асфальтобетони з асфальтобетонної суміші, що витримана за температури 135 °С впродовж 2 год та 4 год, відзначаються меншою середньою густиною ніж асфальтобетон, що виготовлений одразу після змішування компонентів (рисунк 3.31). Ймовірно це пов'язано як із старінням бітуму під час якого збільшується його в'язкість, так і з додатковою адсорбцією бітуму мінеральним матеріалом в результаті чого зменшується кількість об'ємного бітуму, що заповнює пори між мінеральним матеріалом в асфальтобетоні.

Таблиця 3.19 – Вплив старіння на властивості асфальтобетону, модифікованого 0,5 % ПАР

Найменування показника	Вихідний асфальтобетон на основі АБС, витриманої					
	за температури 135 °С впродовж			за температури 135 °С впродовж 4 год та за температури 85 °С впродовж		
	0	2 год	4 год	2 днів	5 днів	9 днів
Середня густина, г/см ³	2,375	2,373	2,369	2,364	2,359	2,350
Водонасичення, %	1,6	1,7	1,8	2,0	2,1	2,3
Міцність за температури 0 °С, МПа	8,5	8,7	8,8	9,0	9,2	9,5
Міцність за температури 20 °С, МПа	4,2	4,3	4,5	4,7	4,9	5,0
Міцність за температури 50 °С, МПа	2,0	2,1	2,3	2,5	2,7	2,8
Коефіцієнт довготривалості водостійкості	0,93	0,93	0,92	0,91	0,90	0,90

Таблиця 3.20 – Вплив старіння на властивості асфальтобетону, модифікованого 3,0 % полімеру

Найменування показника	Вихідний асфальтобетон на основі АБС, витриманої					
	за температури 135 °С впродовж			за температури 135 °С впродовж 4 год та за температури 85 °С впродовж		
	0	2 год	4 год	2 днів	5 днів	9 днів
Середня густина, г/см ³	2,391	2,390	2,388	2,385	2,380	2,376
Водонасичення, %	1,2	1,2	1,3	1,4	1,5	1,7
Міцність за температури 0 °С, МПа	7,5	7,6	7,8	8,0	8,1	8,3
Міцність за температури 20 °С, МПа	3,3	3,5	3,7	3,9	4,1	4,2
Міцність за температури 50 °С, МПа	1,6	1,7	1,8	2,0	2,2	2,3
Коефіцієнт довготривалості водостійкості	0,98	1,00	0,98	0,97	0,96	0,96

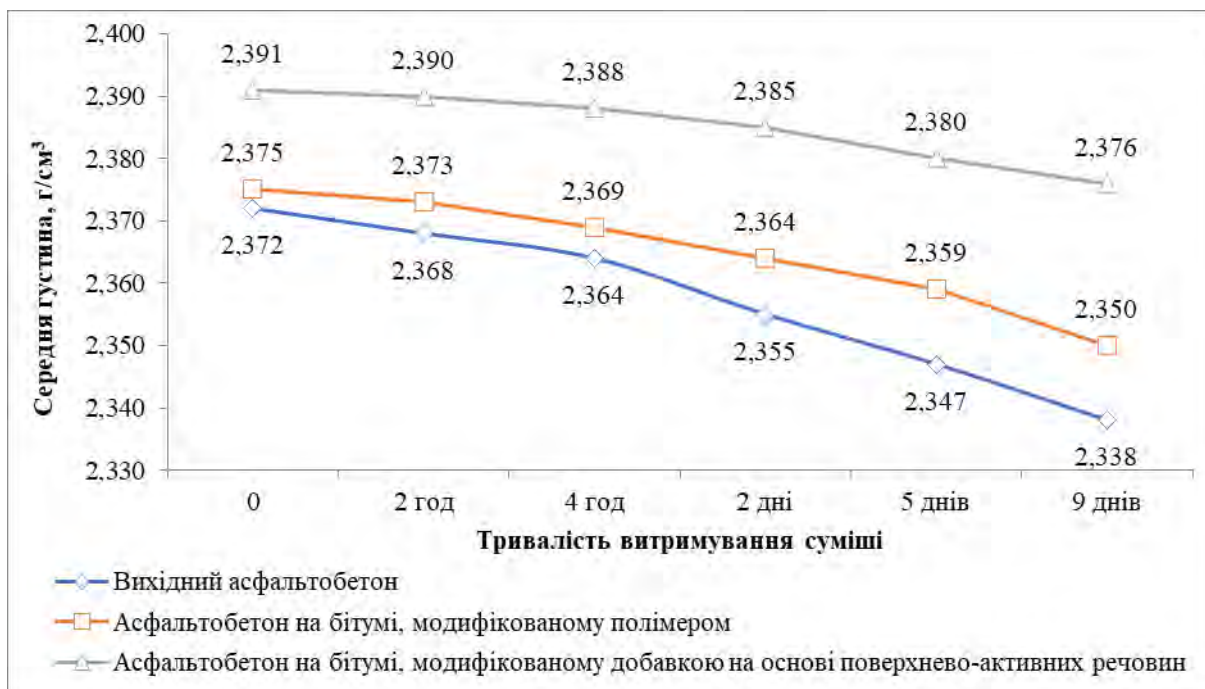


Рисунок 3.31 – Вплив тривалості витримання суміші на середню густину асфальтобетонів

Під час подальшого витримання асфальтобетонної суміші за температури 85 °С впродовж 2 днів, 5 днів та 9 днів, отримані з неї асфальтобетони мають ще нижчу середню густину.

За весь процес старіння середня густина асфальтобетону знижується з 2,372 г/см³ до 2,338 г/см³ або ж на 0,034 г/см³. Також має місце зниження середньої густини асфальтобетону при витримванні асфальтобетонних сумішей на бітумі, модифікованому ПАР та полімером. Однак після 9 днів витримання суміші зниження середньої густини для асфальтобетону з полімером становить 0,025 г/см³, а для асфальтобетону з ПАР - 0,015 г/см³. Це дає змогу стверджувати, що полімер та ПАР знижують як технологічне, так і експлуатаційне старіння бітуму. При цьому, за рахунок того, що початково асфальтобетони з ПАР мають більшу середню густину, після старіння їх густина наближається до густини чистого вихідного асфальтобетону та асфальтобетону з полімером.

Аналогічно зниженню середньої густини асфальтобетону відбувається зростання його водонасичення в результаті старіння

асфальтобетонної суміші (рисунк 3.32). Для вихідного асфальтобетону та асфальтобетону з ПАР зміна водонасичення після 4 год старіння асфальтобетонної суміші за температури 135 °С змінюється всього на 0,1 %, а для асфальтобетону з полімером – на 0,2 %. Тобто різниця у значенні показника водонасичення знаходиться в межах похибки випробування. Подальше витримування асфальтобетонної суміші впродовж 9 днів за температури 85 °С призводить до більш суттєвого зростання водонасичення. Для вихідного асфальтобетону таке зростання становить 1,1 %, для асфальтобетону з полімером – 0,7 %, а для асфальтобетону з ПАР – 0,5 %. Зростання водонасичення свідчить про збільшення вмісту пор в асфальтобетоні і, відповідно, це свідчить, що з часом збільшується об'єм асфальтобетону, що піддається окисненню повітрям.

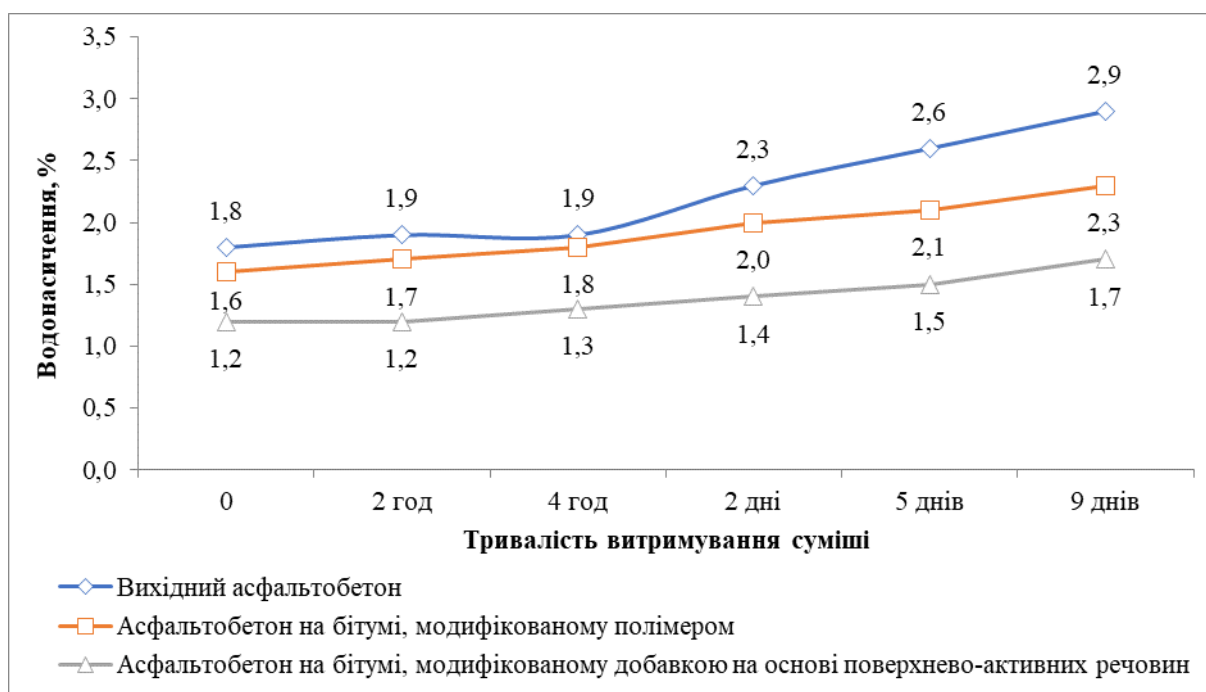


Рисунок 3.32 – Вплив тривалості витримування суміші на водонасичення асфальтобетонів

Цікавими виявилися результати визначення міцності асфальтобетону (рисунк 3.33, рисунок 3.34 та рисунок 3.35). Вже після витримування асфальтобетонної суміші впродовж 4 год за температури 135 °С міцність за температури 0 °С зростає на 10 %, а після витримування

суміші впродовж 9 днів за температури 85 °С міцність зростає практично на 35 %. Для асфальтобетону з ПАР відповідний приріст міцності становить 4 % та 11 %, а для асфальтобетону з полімером – 3,5 % та 12 %.

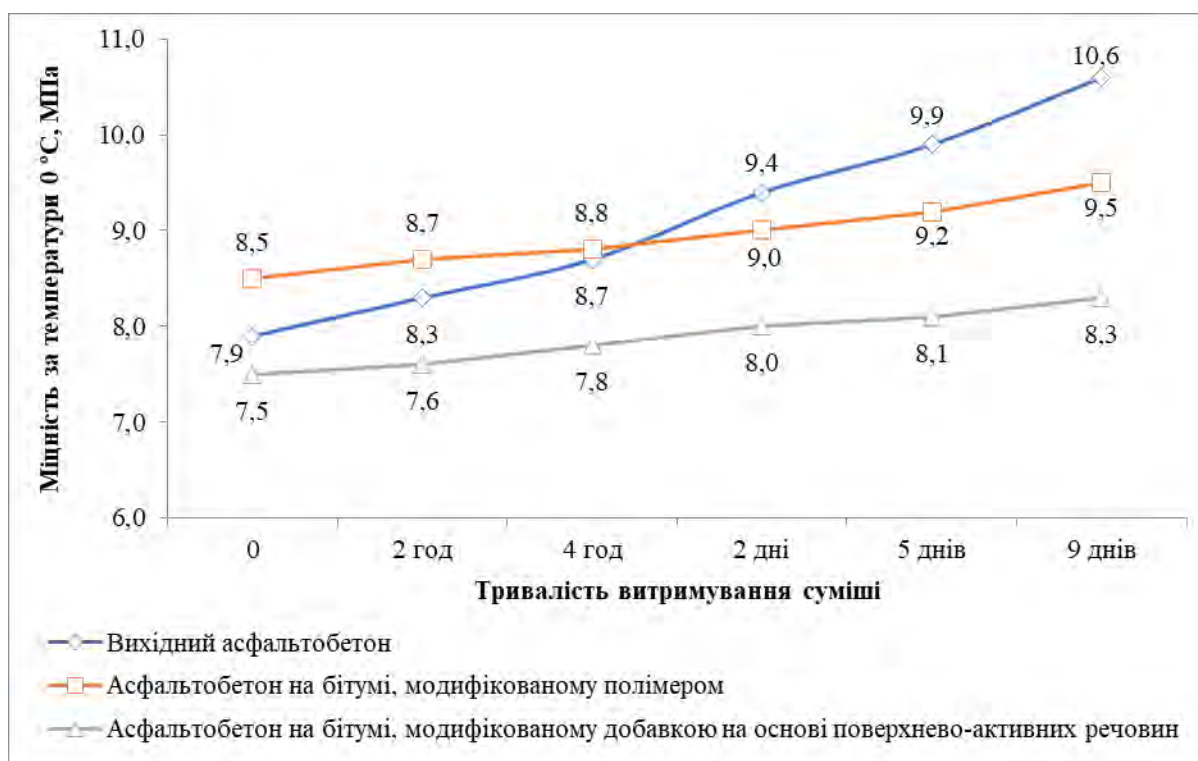


Рисунок 3.33 – Вплив тривалості витримання суміші на міцність асфальтобетону за температури 0 °С

Таким чином встановлено, що інтенсивність зміни міцності вихідного асфальтобетону за температури 0 °С є практично в три рази більшою за інтенсивність зміни властивостей асфальтобетону з ПАР та полімером. Якщо у випадку асфальтобетону з полімером зниження старіння може досягатися за рахунок більшої в'язкості бітуму, то у випадку асфальтобетону з ПАР – виключно за рахунок впливу ПАР на термоокиснювальні процеси.

Також варто звернути увагу на те, що після 9 днів старіння асфальтобетон на вихідному бітумі має найвищу серед досліджуваних асфальтобетонів міцність за температури 0 °С, що опосередковано може свідчити про його найнижчу тріщиностійкість, тобто застосування ПАР та полімеру дозволяє зберігати пластичність асфальтобетону за низьких температур впродовж більш тривалого часу, що повинно позитивно вплинути на довговічність асфальтобетону.

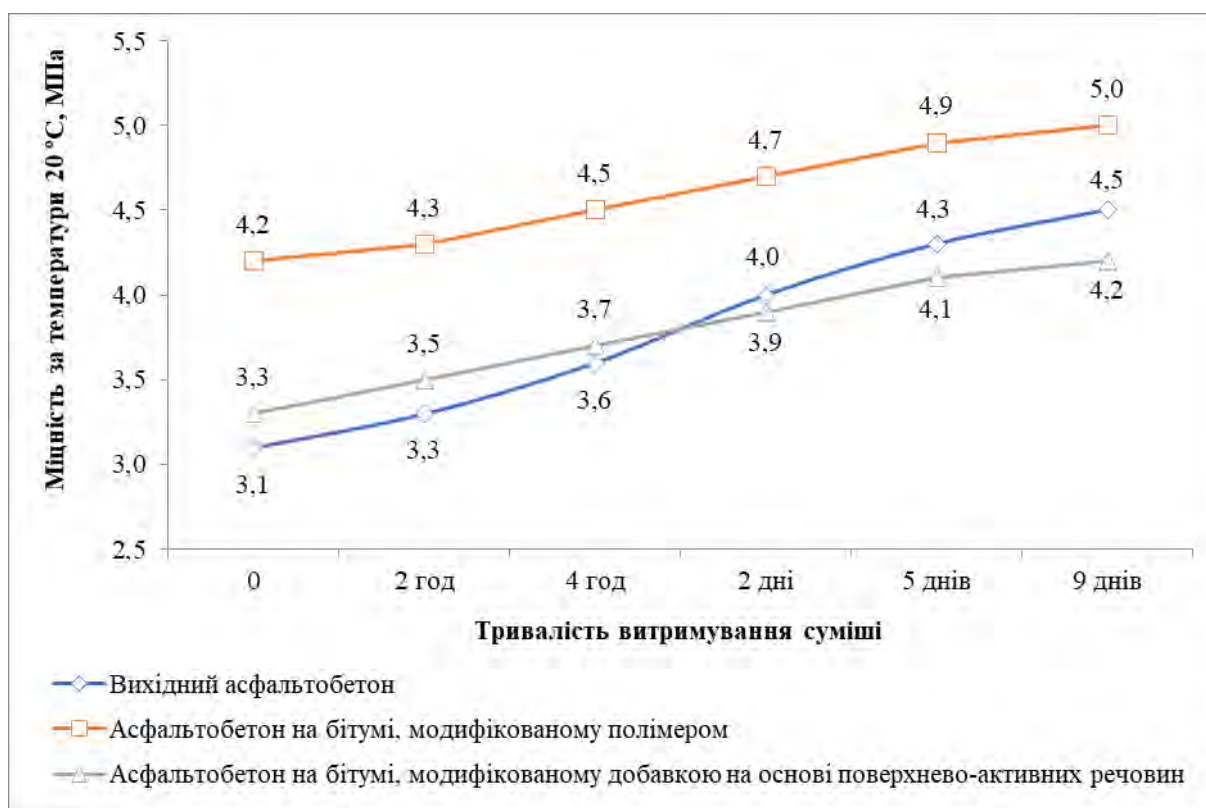


Рисунок 3.34 – Вплив тривалості витримання суміші на міцність асфальтобетону за температури 20 °C

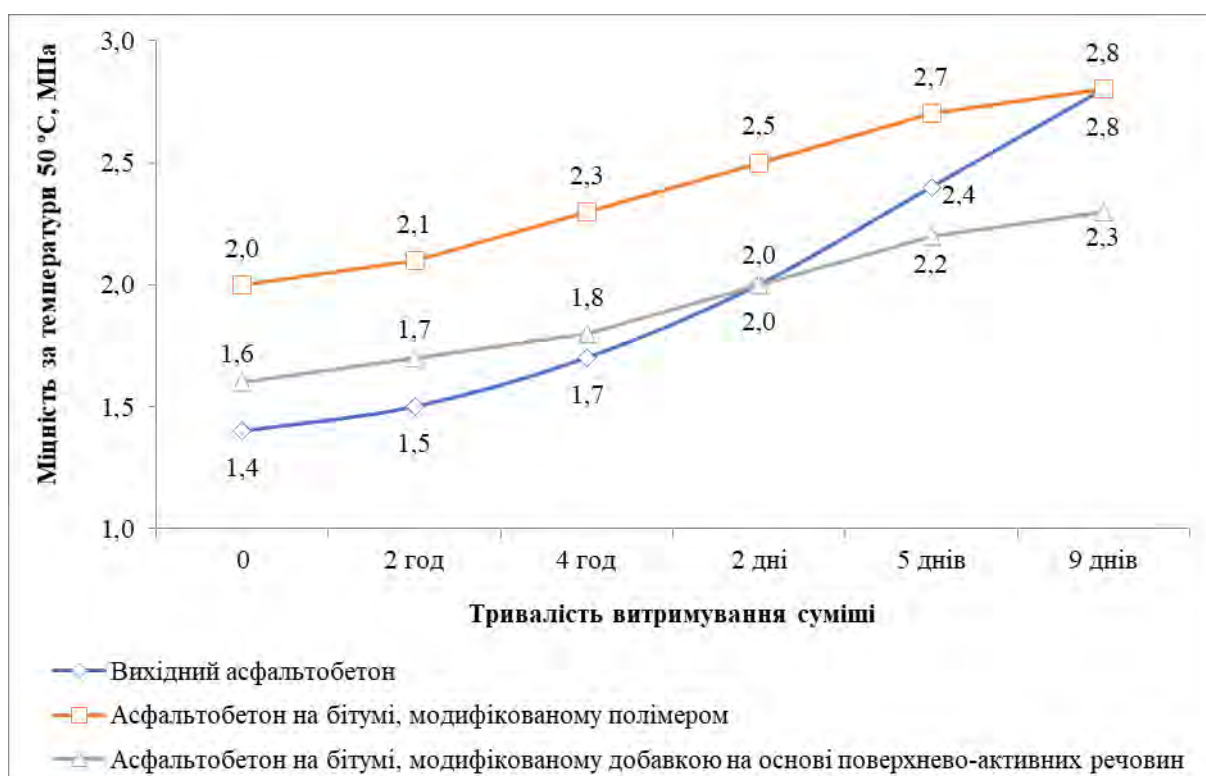


Рисунок 3.35 – Вплив тривалості витримання суміші на міцність асфальтобетону за температури 50 °C

Подібним чином змінюється міцність асфальтобетону за температури 20 °C та 50 °C. Для асфальтобетону на вихідному бітумі після витримання асфальтобетонної суміші продовж 4 год за температури 135 °C приріст міцності за температури 20 °C становить 16 %, а за температури 50 °C – 21 %. Після 9 днів витримання суміші приріст міцності відповідно становить 45 % та 100 %. Для асфальтобетону з ПАР приріст міцності за температури 20 °C становить 12 % та 27 %, за температури 50 °C – 12,5 % та 44 %. Для асфальтобетону з полімером відповідний приріст міцності відповідно становить 7 % та 19 % і 15 % та 40 %.

Порівнюючи різні асфальтобетони приходимо до висновку, що асфальтобетон на вихідному бітумі старіє більш інтенсивно ніж асфальтобетон з ПАР та полімером.

Приріст міцності за помірної та високої експлуатаційної температури, який перш за все відбувається в результаті зростання в'язкості бітуму, може розглядатися як позитивний, оскільки під час зростання в'язкості бітуму зростає стійкість асфальтобетону до пластичних деформацій.

Однак старіння бітуму може негативно відобразитися на взаємодії бітуму з мінеральним матеріалом, про що і свідчать результати визначення водостійкості асфальтобетону під час тривалого водонасичення (рисунок 3.36). Якщо для асфальтобетону з ПАР після 9 днів витримання асфальтобетонної суміші коефіцієнт водостійкості знижується всього на 0,02, а для асфальтобетону з полімером 0,03, то для асфальтобетону на вихідному бітумі така зміна становить 0,06.

Отримані результати свідчать про значну зміну властивостей асфальтобетонів в процесі експлуатації в результаті старіння бітуму. При цьому, стійкість асфальтобетонів до старіння може бути підвищено за рахунок використання добавок на основі ПАР та полімерів.

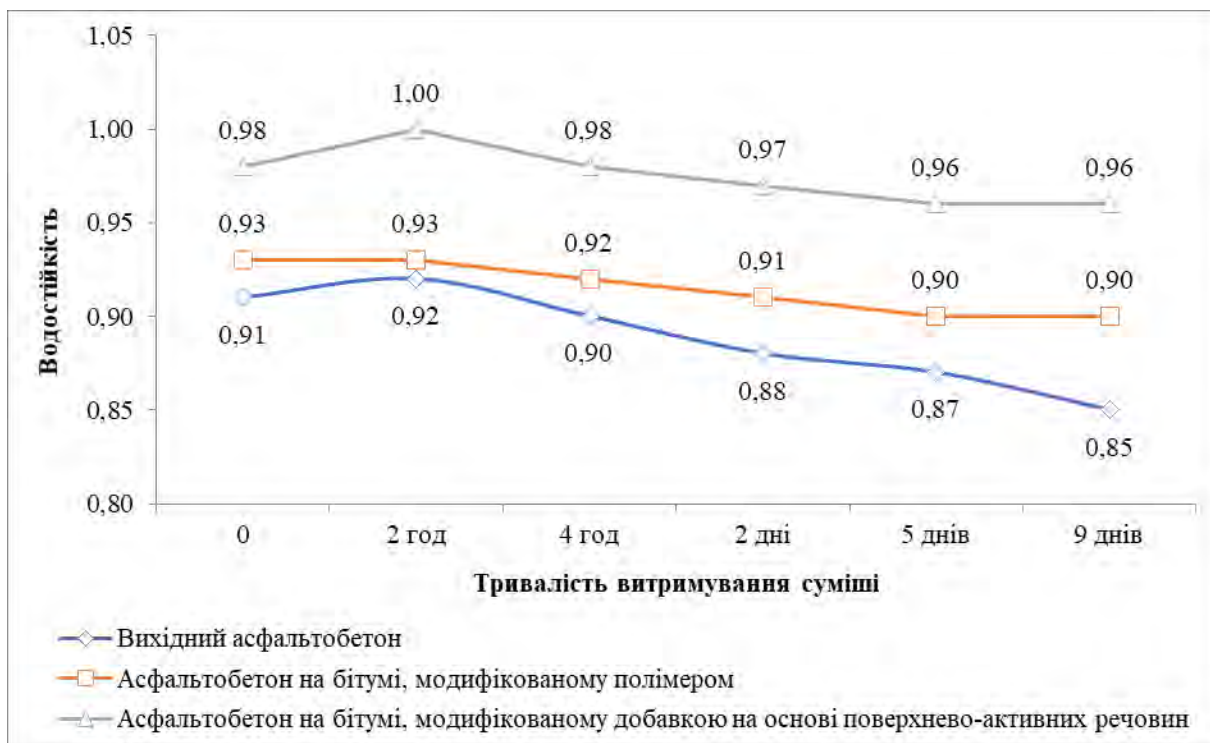


Рисунок 3.36 – Вплив тривалості витримання суміші на водостійкість асфальтобетону

3.10 Втомна довговічність асфальтобетонів

Зменшення технологічного старіння бітумів шляхом використання добавок на основі ПАР та полімерів дозволяє зберегти їх пластичні властивості. Оскільки основним руйнуванням, яке має місце під час старіння асфальтобетону в процесі експлуатації, є утворення тріщин від втоми матеріалу, було проведено випробування з визначення втомної довговічності асфальтобетонів. Для випробування використовували асфальтобетонні зразки, отримані з асфальтобетонних сумішей, що не піддавалися технологічному старінню, асфальтобетонних сумішей, що піддавалися технологічному старінню впродовж 4 год за температури 135 °С та асфальтобетонних сумішей, що піддавалися технологічному старінню впродовж 4 год за температури 135 °С та експлуатаційному старінню впродовж 9 днів за температури 85 °С. При цьому, використовували асфальтобетонні суміші на вихідному бітумі, бітумі, модифікованому добавкою на основі ПАР та бітуму, модифікованого полімером. За випробувальне навантаження приймали навантаження рівне

0,3 від міцності лабораторних зразків на згин. Всі випробування проводили за температури 20 °С за частоти навантаження 10 Гц. Результати випробування наведено в таблиці 3.20, таблиці 3.21 та таблиці 3.22.

Таблиця 3.20 – Результати визначення втомної довговічності асфальтобетонів на бітумі марки БНД 60/90

Найменування показника	Результати випробування асфальтобетону		
	із суміші, що не піддавалась старінню	із суміші, що піддавалась технологічному старінню	із суміші, що піддавалась експлуатаційному старінню
Міцність на згин, МПа	1,9	2,3	3,0
Кількість циклів до руйнування	$1,10 \cdot 10^5$	$9,92 \cdot 10^4$	$6,85 \cdot 10^4$

Таблиця 3.21 – Результати визначення втомної довговічності асфальтобетонів на бітумі марки БНД 60/90, модифікованому 0,5 % ПАР

Найменування показника	Результати випробування асфальтобетону		
	із суміші, що не піддавалась старінню	із суміші, що піддавалась технологічному старінню	із суміші, що піддавалась експлуатаційному старінню
Міцність на згин, МПа	1,7	1,9	2,5
Кількість циклів до руйнування	$1,21 \cdot 10^5$	$1,15 \cdot 10^4$	$9,28 \cdot 10^4$

Таблиця 3.22 – Результати визначення втомної довговічності асфальтобетонів на бітумі марки БНД 60/90, модифікованому 3,0 % полімеру

Найменування показника	Результати випробування асфальтобетону		
	із суміші, що не піддавалась старінню	із суміші, що піддавалась технологічному старінню	із суміші, що піддавалась експлуатаційному старінню
Міцність на згин, МПа	2,8	2,9	3,5
Кількість циклів до руйнування	$1,74 \cdot 10^5$	$1,70 \cdot 10^5$	$1,48 \cdot 10^5$

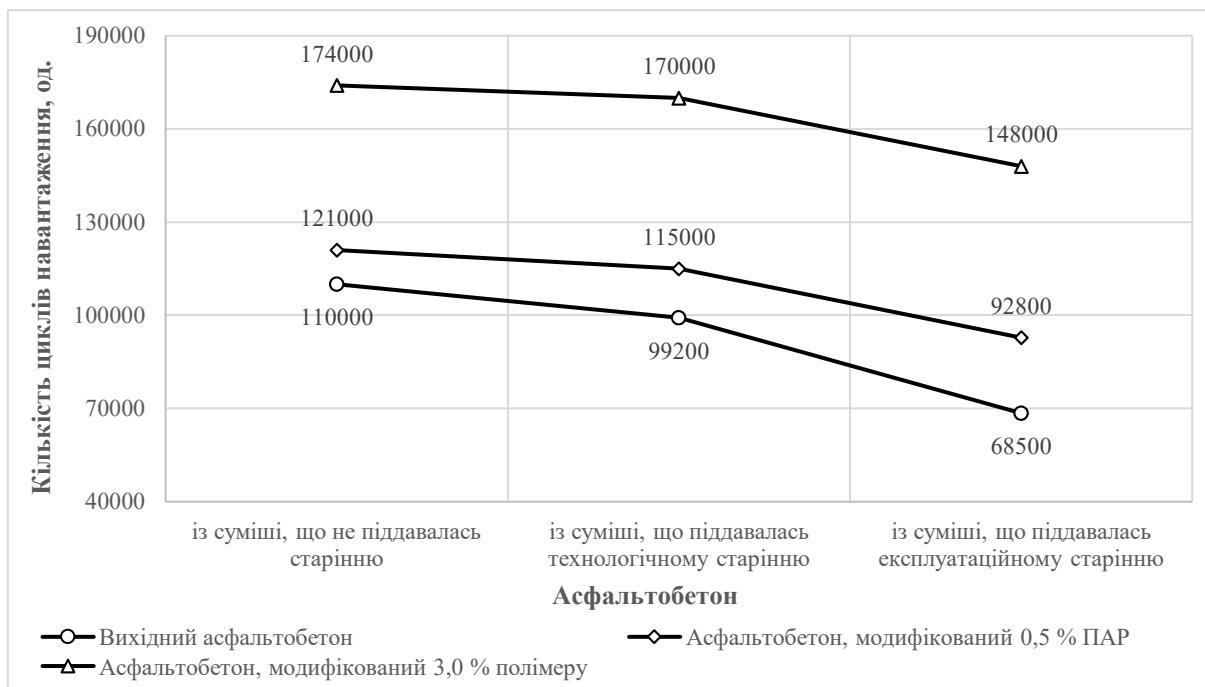


Рисунок 3.37 – Залежність втомної довговічності асфальтобетону на різних етапах життєвого циклу

До технологічного старіння асфальтобетон на бітумі, модифікованому 3,0 % полімеру, має в 1,58 рази більшу втомну довговічність ніж асфальтобетон на бітумі марки БНД 60/90 та в 1,44 рази – за асфальтобетон на бітумі з ПАР. Вже після етапу технологічного старіння має місце зменшення втомної довговічності (рисунок 3.38).

Коефіцієнт старіння, що визначено за відношенням зменшення втомної довговічності в результаті старіння до вихідної втомної довговічності, для асфальтобетону з полімером становить 0,02, асфальтобетону з ПАР – 0,05, а асфальтобетону на БНД 60/90 – 0,10. Ще більшою різниця є після експлуатаційного старіння.

Отримані експериментальні дані підтверджують теоретичні припущення щодо підвищення довговічності асфальтобетонного покриття при застосуванні добавок на основі катіонних ПАР та полімерів типу СБС.

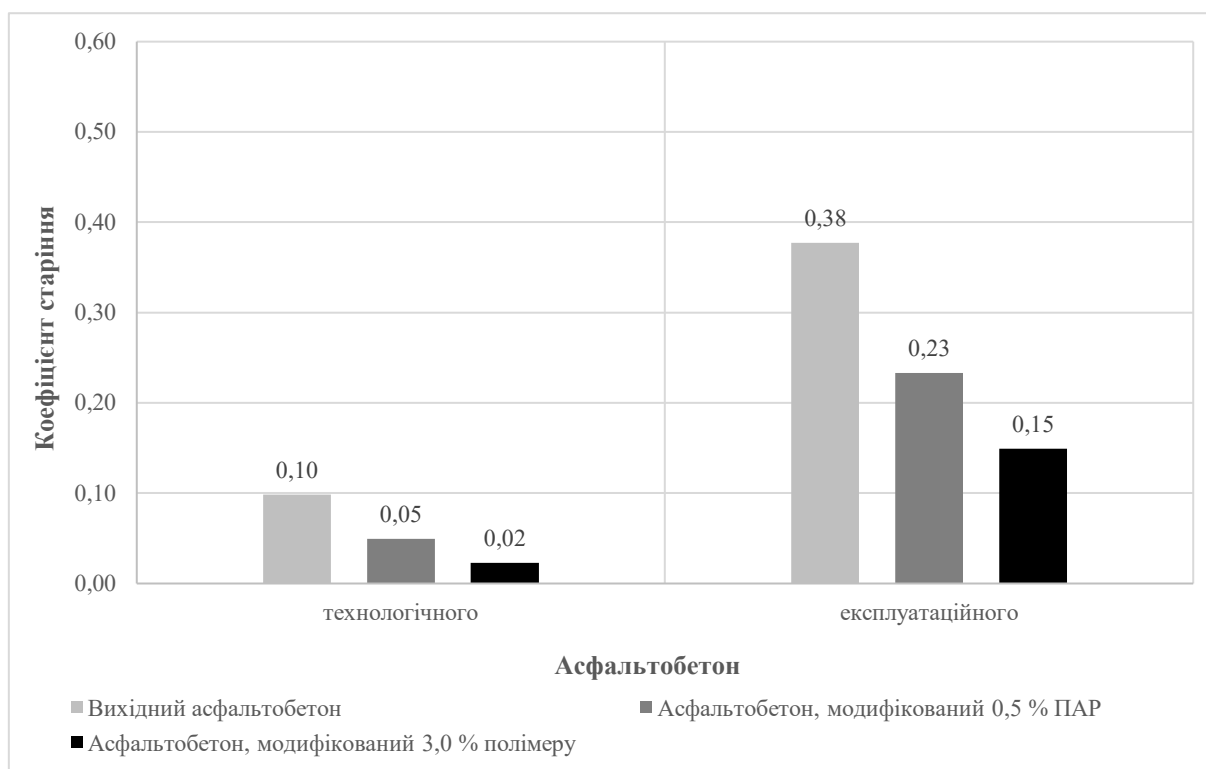


Рисунок 3.38 – Коефіцієнт старіння асфальтобетонів за втомною довговічністю

3.11 Встановлення впливу технологічного старіння бітуму на розрахункові модулі пружності асфальтобетону

Для дослідження прийнято вихідний бітум виробництва ПАТ «Укртатнафта» марки БНД 60/90, а також даний бітум, модифікований 0,5 % ПАР та 3,0 % полімеру.

Властивості даних бітумів після технологічного старіння наведено в таблиці 3.23.

Таблиця 3.23 – Властивості зістарених бітумів

Найменування показника	Результати випробування бітуму		
	БНД 60/90	БНД 60/90, модифікованого 0,5 % ПАР	БНД 60/90, модифікованого 3,0 % полімеру
Пенетрація за температури 25 °С, 0,1 мм	40	49	38
Температура розм'якшеності, °С	54,7	53,8	64

Як видно з даних таблиці 3.23, після технологічного старіння пенетрація за температури 25 °С бітуму, модифікованого 3,0 % полімеру, є практично такою ж як пенетрація вихідного бітуму (також після технологічного старіння). Такі результати досягаються за рахунок суттєвого зменшення технологічного старіння бітуму. При цьому, температура розм'якшеності бітуму, модифікованого 3,0 % полімеру, є практично на 10 °С вищою. Це дозволяє прогнозувати вищі модулі пружності асфальтобетону на модифікованому бітумі. В той же час, бітум, модифікований 0,5 % ПАР, має найвищу пенетрацію за температури 25 °С та найнижчу температуру розм'якшеності, що також пов'язано з більшою стійкістю даного бітуму до старіння.

Визначені на основі залежностей (3.3) та (3.4) в'язкість та пенетрація за різних температур наведені в таблиці 3.24. Графічне зображення залежності логарифмів пенетрації та в'язкості від температури зображено на рисунку 3.39 та рисунку 3.40.

Таблиця 3.24 – Залежність пенетрації та в'язкості від температури

Температура	Результати визначення					
	пенетрації бітуму, 0,1 мм			в'язкості бітуму, 10 ⁶ пз		
	вихідного	з 0,5 % ПАР	з 3,0 % полімеру	вихідного	з 0,5 % ПАР	з 3,0 % полімеру
-20	0,4	0,62	1,1	216230	91908	24015
-15	0,7	1,0	1,7	69098	30711	9937
-10	1,2	1,6	2,5	22100	10270	4114
-5	2	2,7	3,6	7074	3437	1704
0	3	4,3	5,4	2266	1151	706
5	5	7,0	8,0	726	386	293
10	9	11	12	233	129	121
15	15	19	17	74,9	43,5	50,4
20	24	30	26	24,1	14,6	20,9
25	40	49	38	7,8	4,9	8,7
30	66	80	56	2,5	1,7	3,6
35	110	129	83	0,80	0,56	1,5
40	182	210	123	0,26	0,19	0,63
45	301	341	181	0,08	0,06	0,26
50	498	553	268	0,027	0,021	0,1085
55	824	899	396	0,0088	0,0072	0,0452
60	1365	1459	585	0,0028	0,0024	0,0189
65	2260	2370	865	0,0009	0,0008	0,0079

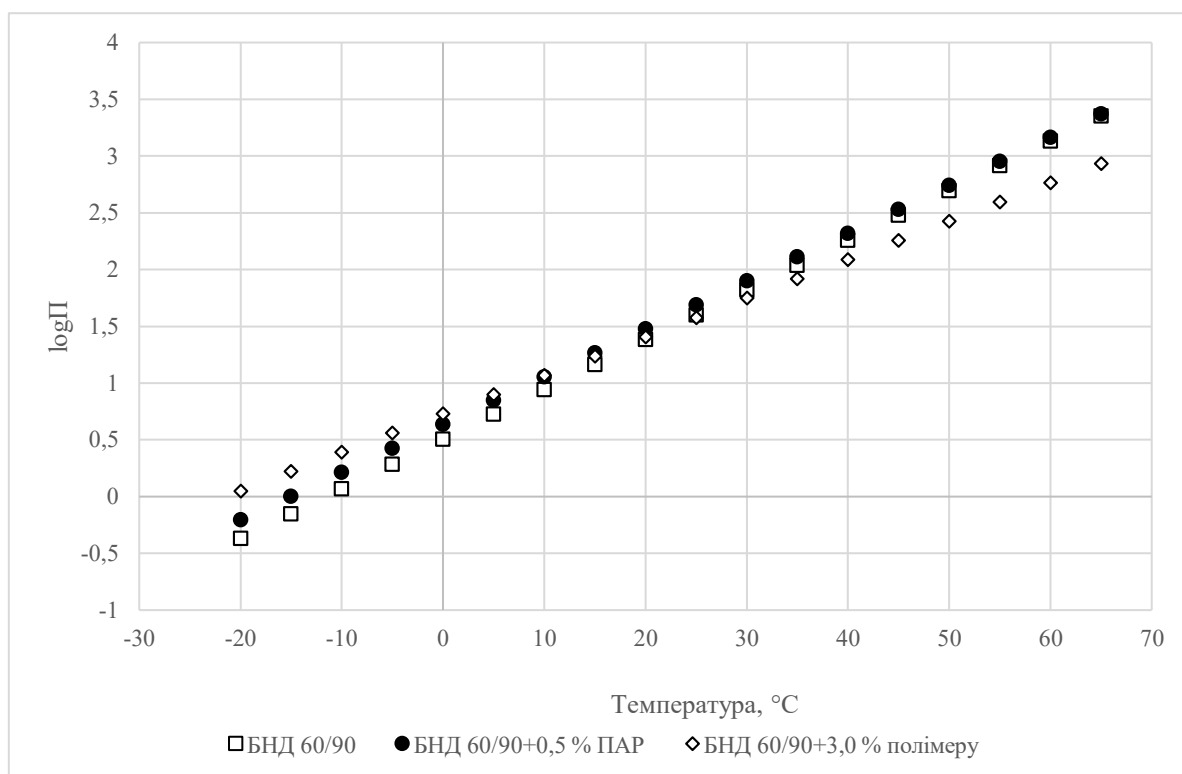


Рисунок 3.39 – Залежність логарифму пенетрації від температури

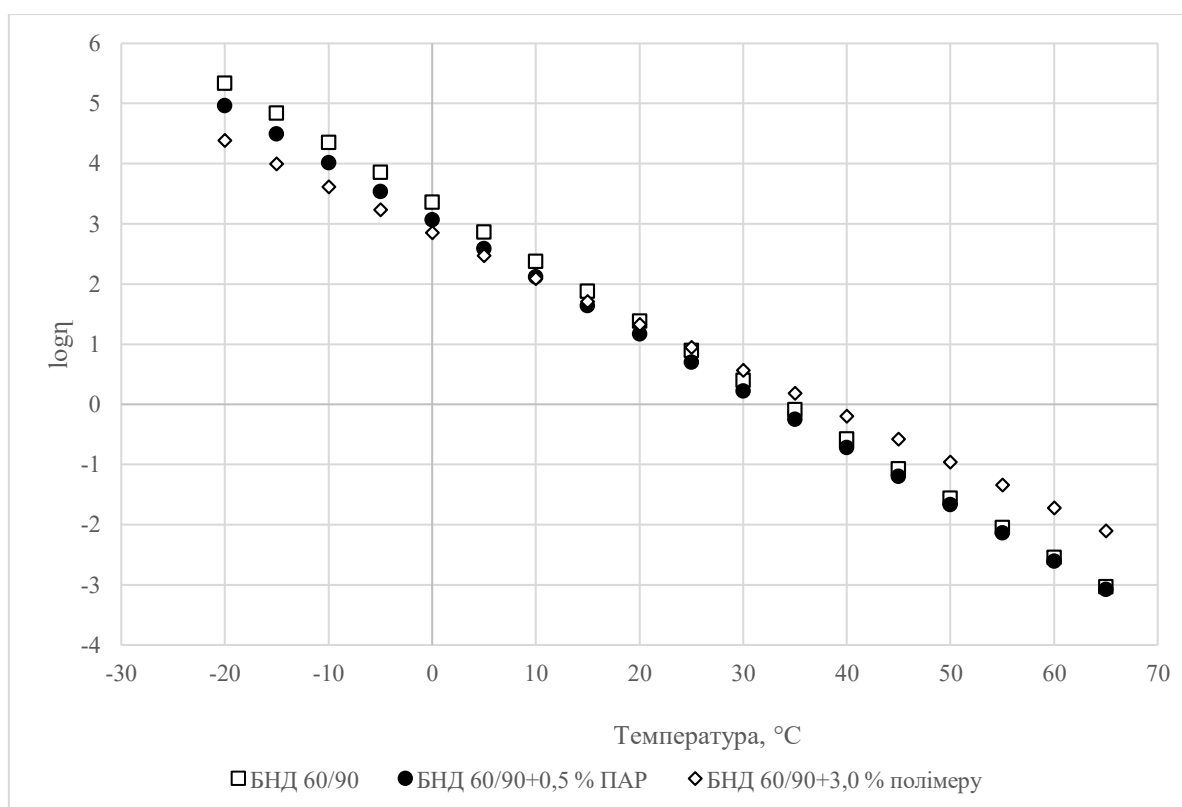


Рисунок 3.40 – Залежність логарифму в'язкості від температури

Як видно з результатів визначення пенетрації та в'язкості, за температури 10 °C бітум, модифікований 3,0 % полімеру, та бітум, модифікований 0,5 % ПАР мають близькі значення, а бітум марки

БНД 60/90 має на (18 – 25) % нижчу пенетрацію та практично в два рази вищу в'язкість.

При підвищенні температури відбувається кардинальна зміна властивостей бітумів, і, якщо за температури 60 °С пенетрація та в'язкість бітуму марки БНД 60/90 та бітуму, модифікованого 0,5 % ПАР є близькими, то пенетрація бітуму, модифікованого 3,0 % полімеру, є меншою на (2,61 – 2,74), а в'язкість – практично в 10 разів вищою. Це свідчить про більшу теплостійкість бітуму, модифікованого полімером, за високих експлуатаційних температур.

У випадку низьких температур маємо наступні дані. Пенетрація бітуму, модифікованого 3,0 % полімеру, є в 2,75 більшою за пенетрацію бітуму марки БНД 60/90, а бітуму, модифікованого 0,5 % ПАР, – в 1,55 рази. В'язкість бітуму, модифікованого 3,0 % полімеру, становить 0,11 від в'язкості бітуму марки БНД 60/90, а для бітуму, модифікованого 0,5 % ПАР, це відношення становить 0,43. Таким чином модифіковані є більш пластичними за температури мінус 20 °С, що свідчить про їх можливу більшу тріщиностійкість. Підтвердженням цьому також може бути те, що установлена за даними залежностями температура крихкості бітуму, модифікованого 3,0 % полімеру становить мінус 22 °С, бітуму, модифікованого 0,5 % ПАР – мінус 15 °С, а бітуму марки БНД 60/90 – мінус 12 °С.

На основі встановлених залежностей в'язкості бітуму від температури, даних щодо гранулометричного складу асфальтобетону та його об'ємних властивостей, визначено модулі пружності асфальтобетону за частоти навантаження 1,59 Гц. Результати визначень наведено в таблиці 3.25. Графічне зображення залежності логарифмів модуля пружності від температури зображено на рисунку 3.41.

Таблиця 3.25 – Залежність логарифму модуля пружності від температури

Температура	Результати визначення модуля пружності асфальтобетону, МПа, на бітумі		
	вихідному	з 0,5 % ПАР	з 3,0 % полімеру
-20	20901	19432	17225
-15	18842	17362	15459
-10	16670	15220	13683
-5	14437	13060	11928
0	12207	10945	10231
5	10051	8938	8625
10	8042	7102	7141
15	6241	5483	5803
20	4694	4113	4628
25	3423	2998	3622
30	2423	2129	2785
35	1670	1477	2105
40	1125	1005	1568
45	746	675	1153
50	490	450	840
55	322	301	608
60	212	202	438
65	142	137	316

Найвищим значенням модуля пружності за температури 10 °С відзначається асфальтобетон на бітумі марки БНД 60/90. Він є в 1,13 рази вищим за модуль пружності асфальтобетону на бітумі, модифікованому 0,5 % ПАР, та бітумі, модифікованому 3,0 % полімеру.

З підвищенням температури залежність зміни модуля пружності асфальтобетону на бітумі марки БНД 60/90 є більшою ніж для асфальтобетону на інших бітумах. В результаті цього за температури 65 °С модуль пружності асфальтобетону на бітумі марки БНД 60/90 є в 1,04 рази більшим за модуль пружності асфальтобетону на бітумі, модифікованому 0,5 % ПАР, а модуль пружності асфальтобетону на бітумі, модифікованому 3,0 % полімеру, – в 2,2 рази більшим за модуль пружності асфальтобетону на бітумі марки БНД 60/90.

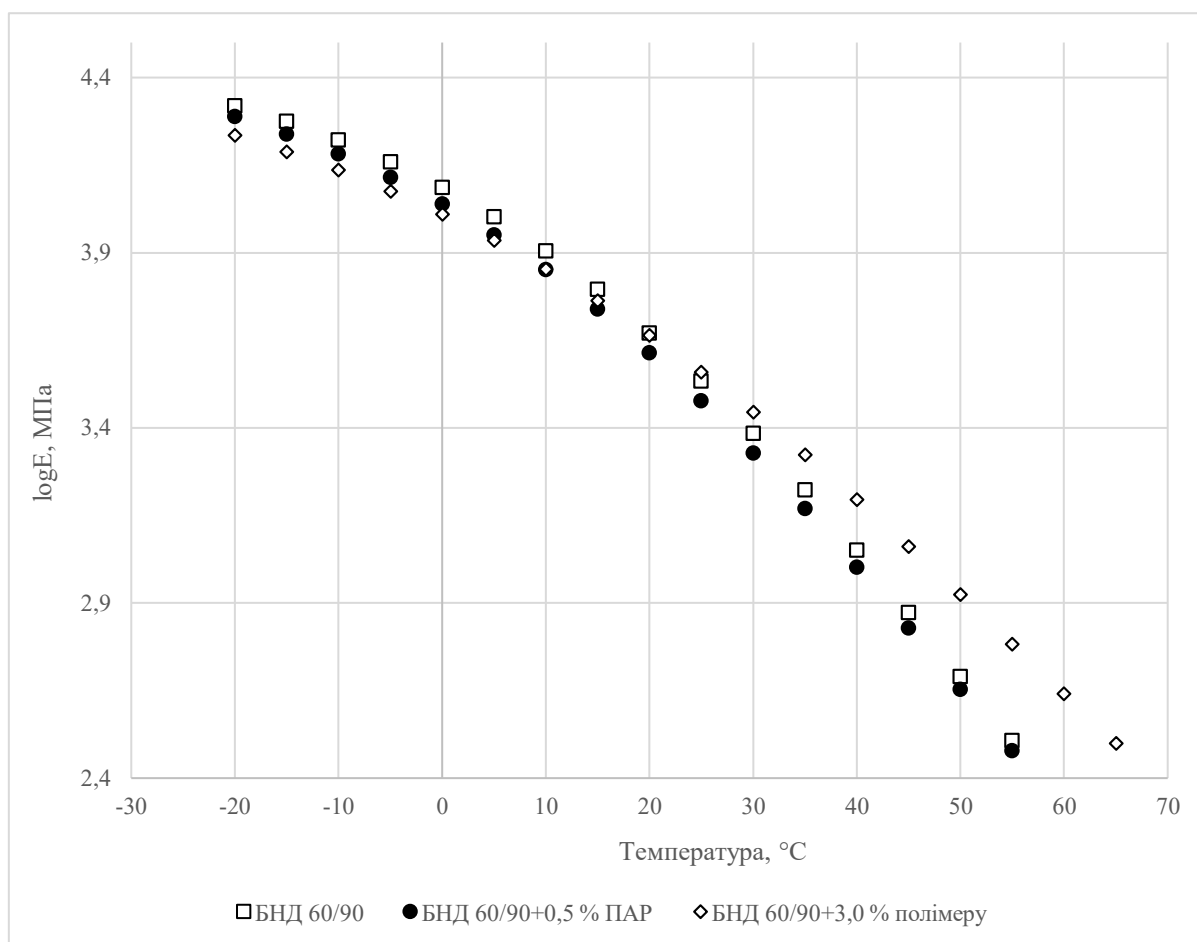


Рисунок 3.41 – Залежність логарифму модуля пружності від температури

У випадку зниження температур спостерігається відповідна тенденція. У цьому випадку, за температури мінус 20 °C, модуль пружності асфальтобетону на бітумі БНД 60/90 є в 1,08 рази більшим за модуль пружності асфальтобетону на бітумі, модифікованому 0,5 % ПАР, та в 1,21 рази більшим за модуль пружності асфальтобетону на бітумі, модифікованому 3,0 % полімеру. Таким чином, модифіковані асфальтобетони є більш деформативними за низьких температур.

На модуль пружності асфальтобетону також суттєво впливає режим навантаження. Тому було визначено вплив частоти деформування на значення модуля пружності досліджуваних асфальтобетонів. Результати визначення модуля пружності наведено в таблиці 3.26 та на рисунках 3.42 – 3.44.

Таблиця 3.26 – Вплив частоти на модуль пружності асфальтобетону

Темпе- ратура, °C	Частота, Гц	Результати визначення модуля пружності асфальтобетону, МПа, з урахуванням технологічного старіння на бітумі			K _{ПАР}	K _{полімер}
		вихідному	з 0,5 % ПАР	з 3,0 % полімеру		
-20	0,01	13255	11630	9317	0,88	0,70
	0,05	15775	14138	11745	0,90	0,74
	0,1	16851	15228	12836	0,90	0,76
	0,5	19277	17728	15412	0,92	0,80
	1	20276	18774	16520	0,93	0,81
	5	22464	21093	19035	0,94	0,85
	10	23341	22035	20079	0,94	0,86
-10	0,01	8957	7673	6364	0,86	0,71
	0,05	11318	9916	8456	0,88	0,75
	0,1	12381	10946	9443	0,88	0,76
	0,5	14896	13431	11880	0,90	0,80
	1	15980	14521	12973	0,91	0,81
	5	18444	17037	15551	0,92	0,84
	10	19468	18098	16658	0,93	0,86
0	0,01	5374	4520	4032	0,84	0,75
	0,05	7275	6250	5661	0,86	0,78
	0,1	8188	7098	6472	0,87	0,79
	0,5	10480	9271	8580	0,88	0,82
	1	11524	10280	9573	0,89	0,83
	5	14022	12734	12020	0,91	0,86
	10	15109	13819	13116	0,91	0,87
10	0,01	2846	2375	2374	0,83	0,83
	0,05	4135	3511	3515	0,85	0,85
	0,1	4798	4106	4115	0,86	0,86
	0,5	6586	5741	5765	0,87	0,88
	1	7455	6551	6584	0,88	0,88
	5	9668	8649	8709	0,89	0,90
	10	10689	9633	9708	0,90	0,91
20	0,01	1348	1133	1313	0,84	0,97
	0,05	2080	1768	2033	0,85	0,98
	0,1	2484	2123	2432	0,85	0,98
	0,5	3656	3169	3593	0,87	0,98
	1	4268	3723	4202	0,87	0,98
	5	5939	5262	5873	0,89	0,99
	10	6762	6033	6700	0,89	0,99
40	0,01	255	227	361	0,89	1,42
	0,05	410	364	583	0,89	1,42
	0,1	504	448	716	0,89	1,42
	0,5	811	722	1141	0,89	1,41
	1	991	884	1387	0,89	1,40
	5	1557	1397	2141	0,90	1,38
	10	1877	1689	2556	0,90	1,36

Кінець таблиці 3.26

Темпе- ратура, °C	Частота, Гц	Результати визначення модуля пружності асфальтобетону, МПа, з урахуванням технологічного старіння на бітумі			K _{ПАР}	K _{полімер}
		вихідному	з 0,5 % ПАР	з 3,0 % полімеру		
55	0,01	79	75	139	0,90	1,76
	0,05	120	113	220	0,95	1,83
	0,1	146	137	269	0,94	1,84
	0,5	230	215	433	0,94	1,88
	1	282	264	533	0,93	1,89
	5	455	425	856	0,94	1,88
	10	559	522	1046	0,93	1,87
65	0,01	41	40	78	0,93	1,90
	0,05	59	57	119	0,98	2,02
	0,1	69	67	143	0,97	2,07
	0,5	104	101	227	0,97	2,18
	1	126	122	278	0,97	2,21
	5	198	191	447	0,97	2,26
	10	242	233	550	0,96	2,27

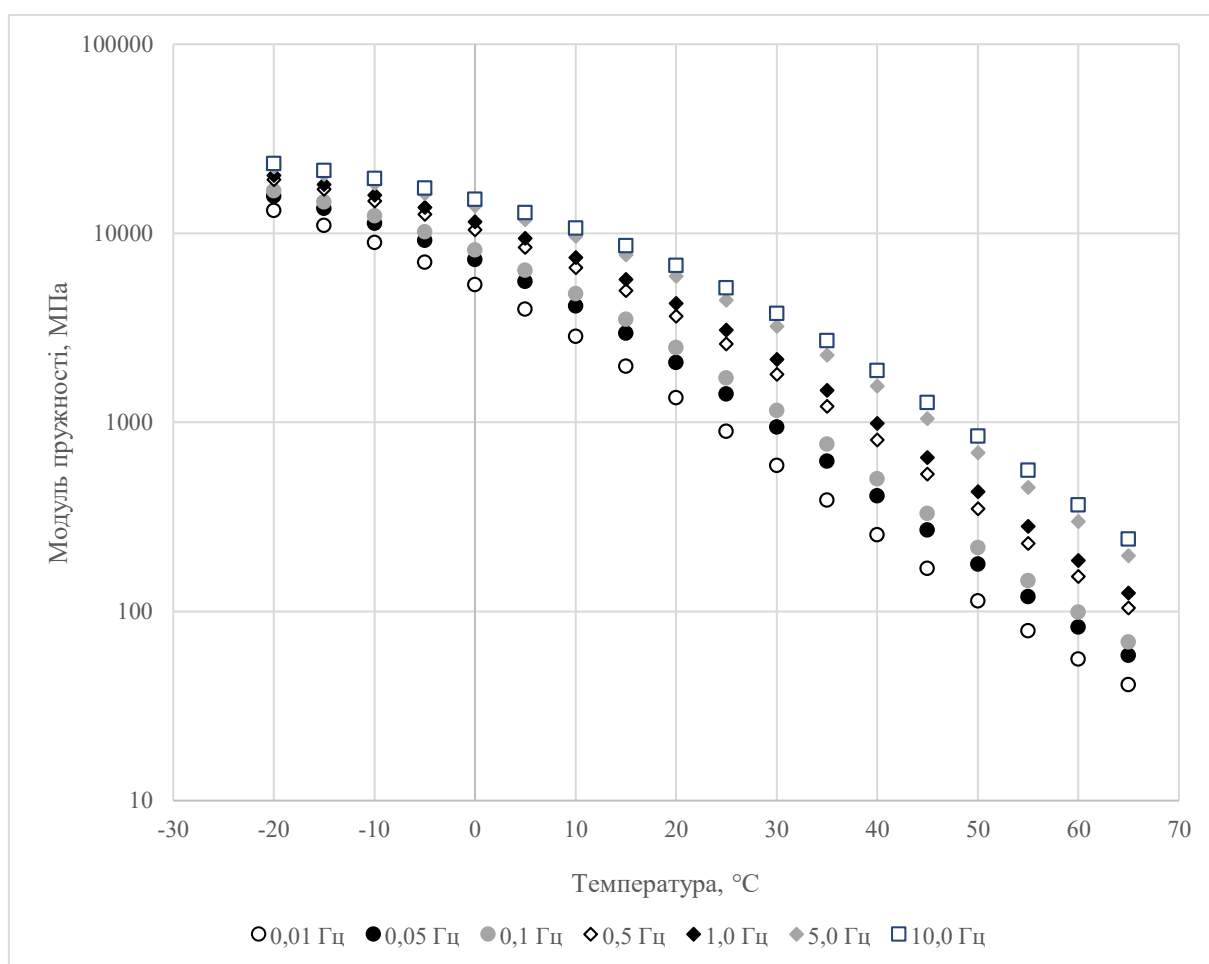


Рисунок 3.42 – Залежність модуля пружності асфальтобетону на бітумі марки БНД 60/90 від частоти

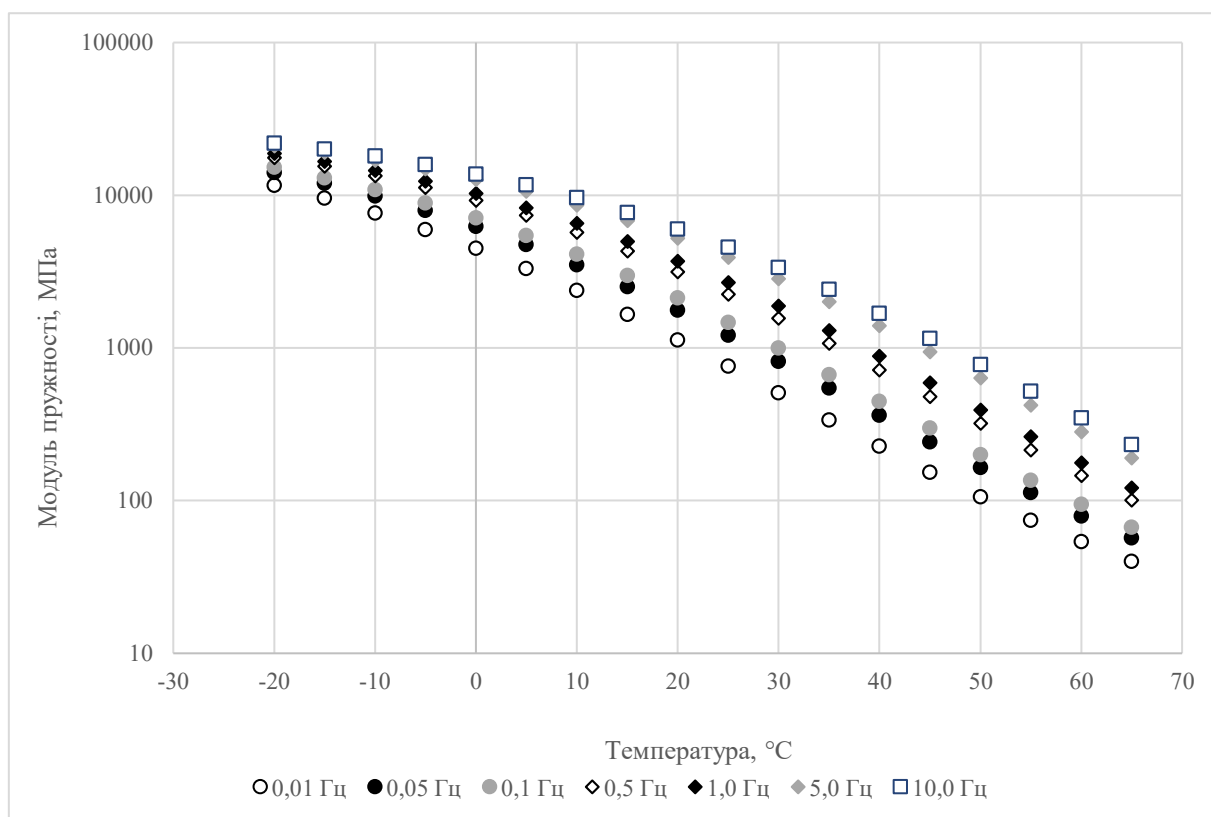


Рисунок 3.43 – Залежність модуля пружності асфальтобетону на бітумі марки БНД 60/90, модифікованого 0,5 % ПАР, від частоти

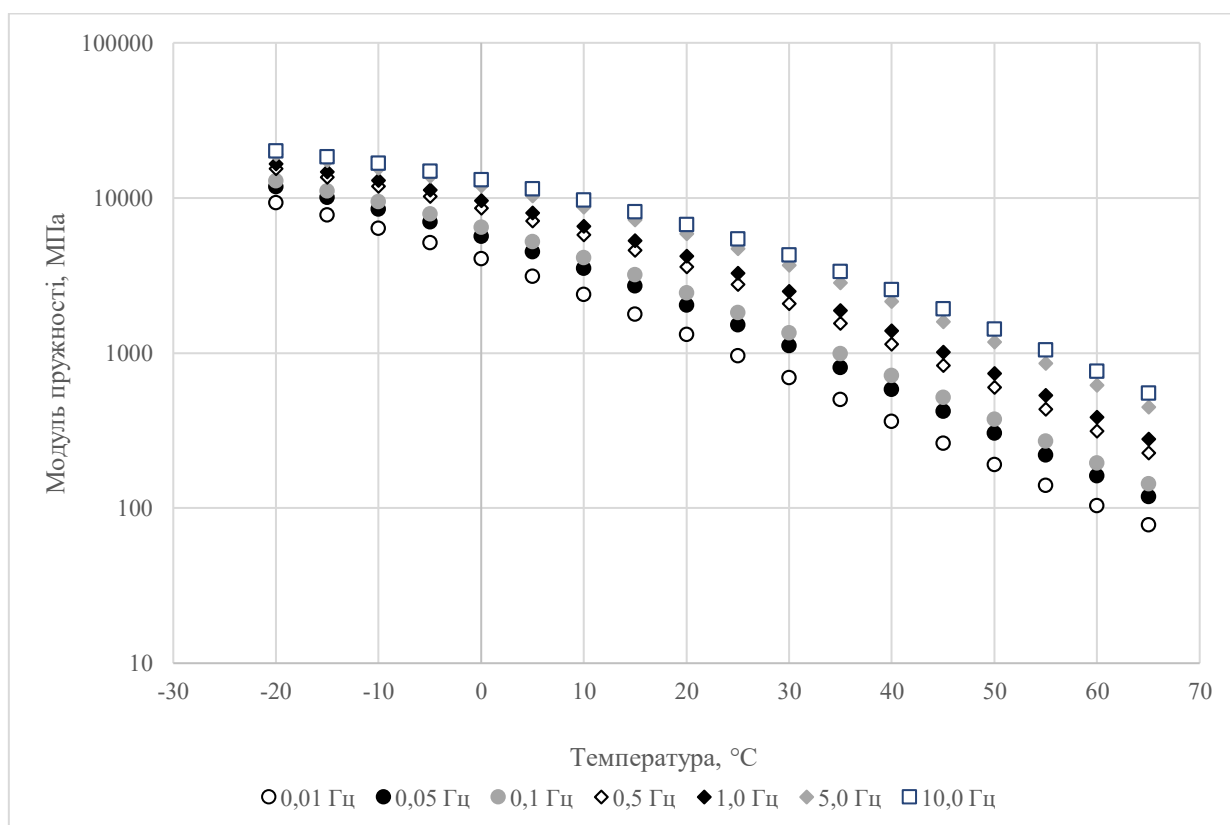


Рисунок 3.44 – Залежність модуля пружності асфальтобетону на бітумі марки БНД 60/90, модифікованого 3,0 % полімеру, від частоти

Результати засвідчили, що із зростанням частоти відбувається підвищення модуля пружності асфальтобетону. Якщо за температури мінус 20 °С та частоти 10 Гц модуль пружності асфальтобетону на бітумі БНД 60/90 є більшим в 1,76 рази ніж за частоти 0,01 Гц, то за температури 10 °С таке відношення становить 3,76, а за температури 65 °С – 5,90.

У випадку асфальтобетону на бітумі марки БНД 60/90, модифікованому 0,5 % ПАР, таке відношення становить 1,89, 4,06 та 5,83, а бітуму марки БНД 60/90, модифікованому 3,0 % полімеру, – 2,16, 4,09 та 7,05. Тобто, залежність модуля пружності асфальтобетону на бітумі марки БНД 60/90, модифікованому 3,0 % полімеру, за всіх температур та частоти є більшою ніж для інших асфальтобетонів.

Отримані значення модуля пружності значно перевищують розрахункові значення модуля пружності асфальтобетону згідно з [150]. Це може бути пов'язано з тим, що розрахункові значення модуля пружності не враховують технологічне старіння бітумів. У зв'язку з цим було виконано порівняння залежностей отримуваних модулів пружності асфальтобетонів від в'язкості вихідного бітуму та його стійкості до старіння. Вихідні дані щодо властивостей прийнятих для дослідження бітумів наведено в таблиці 3.27, склад та властивості асфальтобетону відповідали наведеним в 3.1.4.

Таблиця 3.27 – Властивості досліджуваних бітумів

Ч. ч.	Найменування показника	Значення показника для бітуму					
		Б 65-А	Б 65-Б	Б 75-А	Б 75-Б	Б 85-А	Б 85-Б
1	Глибина проникності голки (пенетрація) за температури 25 °С, 0,1 мм:						
	- до технологічного старіння	65	65	75	75	85	85
	- після технологічного старіння	39	52	45	60	51	68
2	Температура розм'якшеності за кільцем і кулею, °С						
	- до технологічного старіння	51	51	49	49	47	47
	- після технологічного старіння	56	54	54	52	52	50

Як видно з даних таблиці 3.27 в результаті технологічного старіння відбуваються суттєві зміни властивостей бітумів і, в результаті, не стійкі до технологічного старіння бітуми переходять в більш в'язку марку. В той же час бітуми Б 75-Б та Б 85-Б залишаються в марці вихідного бітуму.

Результати визначення модулів пружності асфальтобетонів на вищезазначених бітумах наведено в таблиці 3.28.

Таблиця 3.28 – Вплив в'язкості бітуму та його стійкості до технологічного старіння на модуль пружності асфальтобетону

Температура	Результати визначення модуля пружності асфальтобетону, МПа, на бітумі								
	Б 65	Б 65-Ас	Б 65-Бс	Б 75	Б 75-А	Б 75-Б	Б 85	Б 85-А	Б 85-Б
-20	16353	18739	16880	16136	18473	16584	16234	18460	16562
-15	14211	16636	14796	13945	16321	14458	13972	16248	14376
-10	12078	14477	12705	11772	14119	12334	11727	13985	12195
-5	10017	12320	10664	9684	11929	10274	9574	11739	10086
0	8091	10228	8734	7748	9820	8340	7588	9585	8115
5	6356	8268	6968	6020	7860	6587	5827	7596	6343
10	4852	6497	5411	4539	6108	5057	4334	5834	4811
15	3599	4959	4088	3322	4604	3774	3123	4339	3542
20	2597	3676	3006	2364	3368	2741	2185	3127	2534
25	1828	2649	2156	1640	2394	1941	1489	2187	1767
30	1259	1860	1513	1114	1658	1344	994	1491	1205
35	853	1278	1042	745	1125	915	654	995	808
40	572	863	708	494	751	616	427	654	537
45	382	577	478	327	496	412	279	427	355
50	256	383	322	218	328	276	184	279	236
55	173	256	219	147	218	187	124	184	159
60	119	172	150	101	146	128	85	123	109
65	83	118	104	71	100	90	60	85	76

Дані таблиці 3.29 показують, що на модуль пружності суттєво впливає в'язкість та стійкість бітуму до технологічного старіння. За однакової марки вихідних бітумів модуль пружності за температури 10 °С, яку в Україні приймають за розрахункову, отриманих на їх основі асфальтобетонів може відрізнятись в 1,5 рази, що свідчить про важливість урахування технологічного старіння бітумів при розрахунку дорожнього одягу.

Висновки до розділу 3

1. Характер зміни властивостей бітуму при термоокиснювальному старінні залежно від методу оцінювання старіння є різним. Так, оцінюючи старіння за залишковою пенетрацією (змінною пенетрації при прогріванні), можна припустити, що більш стійкими до старіння є бітуми з меншою глибиною проникності голки (тобто більш в'язкі). При оцінці старіння за індексом старіння отримуємо результати, які свідчать про більшу стійкість до старіння бітумів з меншою в'язкістю.

2. Стандартна методика випробування бітумів на старіння (ГОСТ 18180) не відтворює реальної картини старіння в'язучого, тому що на поверхні випробуваних зразків утворюється полімерна оксидна плівка, яка перешкоджає доступу кисню повітря в об'єм в'язучого. Відбуваються тільки процеси полімеризації в поверхневому шарі, як це має місце в асфальтобетонному покритті при його експлуатації. При цьому чим більша схильність в'язучого до старіння, тим швидше утворюється захисна плівка і тим менш адекватний кінцевий результат.

3. Більш адекватні результати дозволяє отримати метод RTFOT, за яким схильність в'язучих до старіння оцінюють за кордоном. На відміну від ГОСТ 18180 прогрівання в'язучих виконується в скляних стаканах з

постійним перемішуванням, що забезпечує оновлення поверхні в'язучого та контакт з повітрям, яке безперервно подається в термошафу. Таким чином можна зазначити, що метод RTFOT більш точно моделює старіння бітуму в процесі приготування асфальтобетонної суміші.

4. Підвищити стійкість бітумів до старіння можна шляхом їх модифікації полімерними добавками та добавками на основі поверхнево-активних речовин. Модифіковані бітуми у порівнянні з не модифікованими бітумами, відзначаються більшою залишковою пенетрацією та меншими змінами температури розм'якшеності, як при випробовуванні згідно з ГОСТ 18180 так, і, при випробовуванні згідно з методом RTFOT, а також результати визначення властивостей асфальтобетонів після старіння.

5. Модуль пружності асфальтобетону суттєво залежить від в'язкості та стійкості бітуму до технологічного старіння. За однакової марки вихідних бітумів модуль пружності за температури 10 °С, яку в Україні приймають за розрахункову, отриманих на їх основі асфальтобетонів може відрізнятись в 1,5 рази, що свідчить про важливість урахування технологічного старіння бітумів при розрахунку дорожнього одягу.

6. Завдяки збереженню властивостей бітумів на етапі технологічного старіння підвищується втомна довговічність асфальтобетонів. При цьому більш довговічним є асфальтобетон на бітумі, модифікованому полімером. Підвищена втомна довговічність модифікованого асфальтобетону зберігається під час експлуатаційного старіння, що свідчить про підвищення довговічності асфальтобетонного покриття в цілому. Це підтверджує теоретичні припущення щодо підвищення довговічності асфальтобетонного покриття при застосуванні добавок на основі катіонних ПАР та полімерів типу СБС.

Результати досліджень третього розділу викладено у наступних публікаціях: [15, 30, 48, 49, 66, 89, 90, 91, 94, 108].

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Обґрунтування підвищення стійкості бітумів до технологічного старіння з метою підвищення довговічності асфальтобетонного покриття

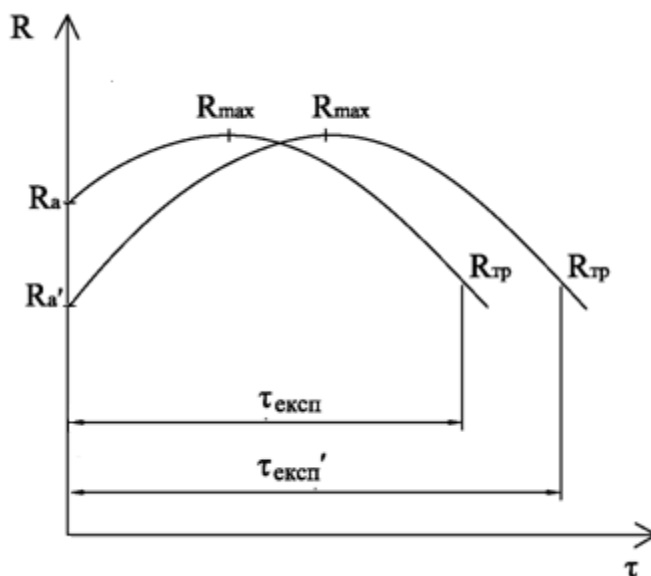
Вирішення проблем довговічності асфальтобетонних покриттів пов'язане з властивостями бітуму, який об'єднує усі компоненти асфальтобетону в єдиний моноліт, і який є найбільш чутливим до дії зовнішніх факторів і насамперед температури.

Від температури залежить фізичний стан бітуму (від текучого до крихкого) та його фізико-технічні властивості. Разом з цим високі технологічні температури приготування асфальтобетонної суміші призводять до неконтрольованого старіння бітуму, що знаходиться в плівковому стані при перемішуванні з мінеральним матеріалом. При старінні змінюється груповий склад та структура бітуму. Він може втратити адгезійну здатність та деформативність при знижених температурах.

Відповідно до цього асфальтобетонна суміш, що укладається в покриття, містить бітум, що вже значно змінив свої первинні фізико-технічні властивості. Зістарений бітум, в якому відбулися незворотні зміни структури, має погіршені фізико-технічні властивості і тим самим не може забезпечити нормований згідно ВБН Г.1-218-050 [111] строк служби дорожнього покриття.

Зміна фізико-технічних властивостей бітуму внаслідок старіння суттєво впливає на міцність асфальтобетону в часі. Так, міцність асфальтобетону в період експлуатації має залежність з чітко вираженим максимумом (рисунк 4.1). На практиці нерідко температурно-часові параметри підготування бітумів, виробництва і укладання гарячих асфальтобетонних сумішей є такими, що до моменту початку експлуатації в покритті асфальтобетон вже має, наприклад, міцність R_a , близьку до

максимального значення $R_{\max}$, замість можливої R_a' . Це призводить до того, що асфальтобетону в покритті залишається працювати в режимі міцності $R_{\text{тр}}$, практично тільки на низхідній гілці. При цьому фактичний строк експлуатації асфальтобетонного покриття $\tau_{\text{експ}}$ значно менше нормованого $\tau_{\text{експ}}'$ згідно ВБН Г.1-218-050 [111].



R_a - значення міцності на початку роботи асфальтобетону; R_a' - значення міцності, можливої у разі збереження якості в'язучого в період його підготовки, на початку роботи асфальтобетону; $R_{\max}$ - максимальне значення міцності; $R_{\text{тр}}$ - міцність асфальтобетону на початку інтенсивного тріщиноутворення та руйнування; $\tau_{\text{експ}}$ - термін експлуатації покриття при початковій міцності асфальтобетону R_a ; $\tau_{\text{експ}}'$ - термін експлуатації покриття при початковій міцності асфальтобетону R_a' .

Рисунок 4.1 – Зміна міцності асфальтобетону в часі

За результатами лабораторних досліджень встановлено, що підвищити стійкість бітумів до дії високих технологічних температур та подовжити строки експлуатації асфальтобетонних покриттів можна за рахунок:

- вибору типу та марки бітумів нафтових дорожніх в'язких для виробництва асфальтобетонних сумішей з урахуванням їх стійкості до дії технологічних температур;

- поліпшення структури окиснених в'язких бітумів вітчизняного виробництва шляхом їх змішування з продуктами нафтопереробки;

- використання різного роду добавок, що уповільнюють процеси окиснення (старіння) бітумів;
- використання енергозберігаючих добавок для зниження технологічних температур виробництва та укладання асфальтобетонних сумішей;
- виконання організаційних заходів щодо запобігання старінню бітумів.

4.2 Вибір бітумів для виробництва асфальтобетонних сумішей з урахуванням їх стійкості до дії технологічних температур

Використання бітумів для приготування асфальтобетонних сумішей без врахування впливу технологічних температур, що знижують їх фізико-технічні властивості, призводить до передчасного руйнування асфальтобетону, адже бітум, що міститься в покритті за своїми властивостями вже не відповідає вимогам, які пред'являються до нього на етапі проектування. Найбільш чутливою характеристикою зістареності є консистенція або в'язкість бітуму, що умовно визначається таким стандартним показником, як пенетрація за температури 25 °C (слід зазначити, що зміна властивостей після прогрівання свідчить про схильність бітумів до старіння, а не фіксує їх зістарений стан в експлуатаційних умовах).

Діючими нормативними документами встановлюються вимоги до вибору бітумів для приготування асфальтобетонних сумішей в залежності від кліматичних умов роботи асфальтобетонних покриттів та області застосування асфальтобетонних сумішей згідно Додатка В ДСТУ Б В.2.7-119 (наведено в таблиці 4.1) [10].

Оптимальним відповідно до таблиці 1 можна вважати бітум марки БНД 60/90, який може використовуватися на будь-якій категорії дороги незалежно від районування за кліматичними умовами роботи асфальтобетонного покриття згідно ДБН В.2.3-4 [74]. Про найбільш широке використання бітуму марки БНД 60/90 також свідчать результати моніторингу бітумів, що використовували в Україні впродовж останніх років.

Таблиця 4.1 – Застосування бітумів для приготування асфальтобетонних сумішей, що використовуються для влаштування верхнього шару покриття

Шифр району	Категорія дороги			
	I	II	III	IV
А-1	БНД 60/90	БНД 60/90	БНД 60/90	БНД 60/90
	БНД 90/130	БНД 90/130	БНД 90/130	БНД 90/130
А-2	БНД 60/90	БНД 60/90	БНД 60/90	БНД 60/90
	БНД 90/130	БНД 90/130	БНД 90/130	БНД 90/130
А-3	БНД 60/90	БНД 60/90	БНД 60/90	БНД 60/90
	БНД 90/130	БНД 90/130	БНД 90/130	БНД 90/130
А-4	БНД 60/90	БНД 60/90	БНД 60/90	БНД 60/90
	БНД 90/130	БНД 90/130	БНД 90/130	БНД 90/130
А-5	БНД 40/60	БНД 40/60	БНД 40/60	БНД 40/60
	БНД 60/90	БНД 60/90	БНД 60/90	БНД 60/90
А-6	БНД 40/60	БНД 40/60	БНД 40/60	БНД 40/60
	БНД 60/90	БНД 60/90	БНД 60/90	БНД 60/90
А-7	БНД 40/60	БНД 40/60	БНД 40/60	БНД 40/60
	БНД 60/90	БНД 60/90	БНД 60/90	БНД 60/90

Разом з тим результати моніторингу показали, що дорожніми підприємствами переважно використовуються бітуми з середньою глибиною проникності голки від $65 \cdot 0,1$ мм до $75 \cdot 0,1$ мм. Це може призвести до того, що після дії технологічних температур в складі асфальтобетону знаходитиметься бітум з пенетрацією, що відповідає марці БНД 40/60, що є припустимим лише при його використанні в районах А-5, А-6 та А-7.

Як показали результати досліджень, спрогнозувати зниження фізико-технічних властивостей бітуму після впливу технологічних температур дозволяє метод RTFOT згідно ДСТУ Б EN 12607-1. За цим методом плівка бітуму піддається впливу температури та повітря при постійному оновленні її поверхні, що імітує перемішування бітуму з мінеральним матеріалом під час виробництва асфальтобетонної суміші. В зв'язку з цим метод RTFOT рекомендується до застосування при оцінці схильності бітумів до старіння під дією технологічних температур, а

показник зміни фізико-технічних властивостей бітуму після прогрівання за методом RTFOT доцільно внести в чинний стандарт ДСТУ 4044.

Враховуючи старіння окиснених бітумів, що використовуються в Україні, при виробництві асфальтобетонних сумішей пропонується використовувати бітуми з пенетрацією за температури 25 °C від $80 \cdot 0,1$ мм до $100 \cdot 0,1$ мм, що повинно сприяти подовженню строків служби асфальтобетонних шарів.

4.3 Поліпшення структури окиснених бітумів вітчизняного виробництва шляхом їх змішування з продуктами нафтопереробки

Як показали результати досліджень, поліпшити структуру та оптимізувати груповий хімічний склад бітумів можна шляхом компаундування бітумів з продуктами нафтопереробки до їх введення в мінеральну суміш.

При компаундуванні окиснені бітуми змішують з дистиляційними бітумами або ж сировиною для їх виробництва (гудроном), нафтовими екстрактами, мазутом та іншими продуктами нафтопереробки. Вміст дистиляційного бітуму та/або продуктів нафтопереробки складає від 10 % до 50 %. Компаундування виконують згідно рекомендацій [112].

4.4 Використання модифікуючих добавок для підвищення довговічності асфальтобетонного покриття

За результатами досліджень встановлено, що ефективним способом підвищення стійкості бітумів до дії технологічних температур є використання модифікуючих добавок: інгібіторів старіння, полімерних добавок та добавок на основі поверхнево-активних речовин.

Введення до складу бітумів від 0,5 % до 2,0 % інгібіторів старіння сприяє пригніченню окиснювальних процесів, які призводять до старіння бітуму, і, тим самим, підвищенню стійкості бітумів до впливу технологічних температур.

Модифікації бітумів інгібіторами старіння має передувати лабораторна перевірка їх ефективності. Модифікацію необхідно виконувати згідно з чинними нормативними документами.

При введенні у бітум добавок на основі поверхнево-активних речовин змінюються процеси структуроутворення та термоокиснювального старіння в'язучого. В цьому випадку уповільнення старіння бітумів відбувається за рахунок адсорбції поверхнево-активних речовин на асфальтенах.

Модифікацію бітумів добавками на основі поверхнево-активних речовин необхідно виконувати згідно з ДСТУ-Н Б В.2.7-254 [113].

Полімерні добавки в значній мірі здатні адсорбувати масляну складову мальтенової фракції (частини) бітуму, що сприяє підвищенню стійкості бітумів до старіння за рахунок зменшення випаровування легких фракцій бітуму при виробництві асфальтобетонних сумішей. Застосування полімерних добавок є особливо актуальним при влаштуванні асфальтобетонних покриттів на автомобільних дорогах I – II категорії, адже поряд із зменшенням старіння бітуму вони підвищують їх теплостійкість та зберігають тріщиностійкість на рівні вихідного бітуму.

Модифікацію бітумів полімерними добавками необхідно виконувати згідно з ДСТУ-Н Б В.2.7-298 [114].

Вибір модифікуючих добавок необхідно виконувати таким чином, щоб вони самі в свою чергу не втрачали своїх властивостей під дією технологічних температур.

Для добавок на основі поверхнево-активних речовин таким критерієм може бути показник зчеплюваності бітуму з мінеральним матеріалом. Стабільність слід визначати за зміною зчеплюваності бітуму, випробуваного за методом RTFOT, з мінеральним матеріалом з вихідним модифікованим бітумом. При цьому зчеплюваність зістареного бітуму з мінеральним матеріалом повинна бути на рівні зчеплюваності бітуму з мінеральним матеріалом до його прогрівання.

Для бітумів, модифікованих полімерами, таким критерієм може бути показник еластичності за температури 25 °C.

4.5 Зниження технологічних температур виробництва та укладання асфальтобетонних сумішей

Зниження температури визначення стійкості бітумів до технологічного старіння призводить до підвищення залишкової пенетрації, зниження індексів старіння та зменшення зміни температури розм'якшеності, що свідчить про підвищення стійкості бітумів до старіння із зниженням температури. Знизити технологічні температури виробництва та укладання асфальтобетонних сумішей і тим самим зменшити термоокиснювальне старіння бітумів в результаті впливу технологічних температур можна за рахунок використання енергозберігаючих добавок на основі поверхнево-активних речовин. Можливість використання енергозберігаючих добавок на основі синтетичних восків було виключено, оскільки застосування цих добавок призводить до зниження технологічної в'язкості бітуму, що, як було показано, негативно впливає на стійкість бітумів до старіння.

Суміщення бітумів з енергозберігаючими добавками на основі поверхнево-активних речовин потрібно виконувати згідно з ДСТУ-Н Б В.2.7-254 [113], а вміст енергозберігаючих добавок на основі поверхнево-активних речовин має становити від 0,3 % до 0,7 % від маси бітуму. Виробництво асфальтобетонних сумішей за знижених технологічних температур з використанням енергозберігаючих добавок виконують у відповідності з ДСТУ-Н Б В.2.7-315.

4.6 Організаційні заходи щодо запобігання старінню бітумів під дією технологічних температур

Проведені дослідження засвідчили, що для зниження негативного впливу процесів старіння бітумних в'язучих необхідно скоротити час зберігання асфальтобетонної суміші в бункерах-накопичувачах асфальтозмішувальної установки, а також час очікування автомобілів-самоскидів при розвантаженні асфальтобетонної суміші.

Під час виробництва асфальтобетонних сумішей бітум, розігрітий до робочої температури згідно таблиці 12 ДСТУ Б В.2.7-119 [10], в певних пропорціях дозується дозатором в суміш висушених та розігрітих мінеральних матеріалів. Час перемішування суміші залежить від типу суміші та становить від 30 с до 60 с. Температура мінеральних матеріалів на виході із сушильного барабану повинна бути в межах встановлених нормативних ДСТУ Б В.2.7-119 [10], для того, щоб бітум можна було швидко та рівномірно розподілити по поверхні мінерального матеріалу. Чим вище температура перемішування, тим більшому старінню піддається бітум, що міститься в мінеральній суміші. Існують верхні та нижні межі температури випуску асфальтобетонних сумішей, що залежать від марки бітумного в'язучого. Якщо виконуються вище наведені умови, необхідно прагнути до нижньої встановленої температурної границі та керуватися нижченаведеними рекомендаціями.

Під час укладання гарячих асфальтобетонних сумішей за низької температури навколишнього середовища або при необхідності їх тривалого транспортування, температуру відвантаження асфальтобетонної суміші, щоб компенсувати дію цих факторів, підвищувати небажано. Рекомендується застосування енергозберігаючих добавок, що дозволяють знизити регламентовані температурні інтервали ущільнення асфальтобетонних сумішей.

Для запобігання потрапляння повітря в бункер-накопичувач асфальтозмішувальної установки необхідно вжити заходи, щоб завантажувальна і нижня заслінки були щільно підігнані та повітронепроникні, а також забезпечити ізоляцію корпусу. Якщо нижня заслінка повітронепроникна, то в бункер через завантажувальну заслінку затягується повітря, окиснюючи бітум в суміші. Бункер повинен бути максимально заповнений, наскільки це можливо, для того, щоб в його

верхній частині не залишалося місця для повітря. Кисень повітря, що залишився у верхній частині не повністю заповненого бункера, реагує з бітумом верхнього шару асфальтобетонної суміші.

Однак навіть при забезпеченні необхідних розрахункових властивостей бітумів, отримання якісних асфальтобетонних сумішей та асфальтобетонів можливо тільки при дотриманні необхідних температурних режимів виробництва, укладання та ущільнення асфальтобетонних сумішей.

4.7 Порядок визначення технологічних температур виробництва та ущільнення асфальтобетонних сумішей

Для більшості важливих технологічних процесів відомими є оптимальна в'язкість або межі в'язкості, на основі яких можна визначити оптимальні технологічні температури.

Для визначення температури перемішування бітуму з мінеральним матеріалом необхідно використовувати результати визначення в'язкості бітуму до старіння, так як даний технологічний процес має місце перед контактом тонкої плівки в'язучого з поверхнею гарячого мінерального матеріалу (до впливу технологічних температур).

Для визначення температури початку і закінчення ущільнення асфальтобетонної суміші необхідно використовувати значення в'язкості бітуму після старіння.

Температури початку і закінчення ущільнення рекомендується визначати за в'язкістю бітуму після старіння у зв'язку з тим, що при виробництві асфальтобетонної суміші, її витримуванні в бункері-накопичувачі та транспортуванні до місця укладання бітум знаходиться на гарячому мінеральному матеріалі у вигляді тонкої плівки і при цьому відбувається його старіння (знижується penetрація, зростає температура розм'якшеності та в'язкість). Отже, на початку укладання та ущільнення

асфальтобетонної суміші бітум вже пройшов процес технологічного старіння.

В'язкість бітуму необхідно визначати за температури 135 °С та 165 °С. На основі отриманих даних в логарифмічних координатах будувати графік залежності в'язкості бітуму від температури (рисунок 4.2).

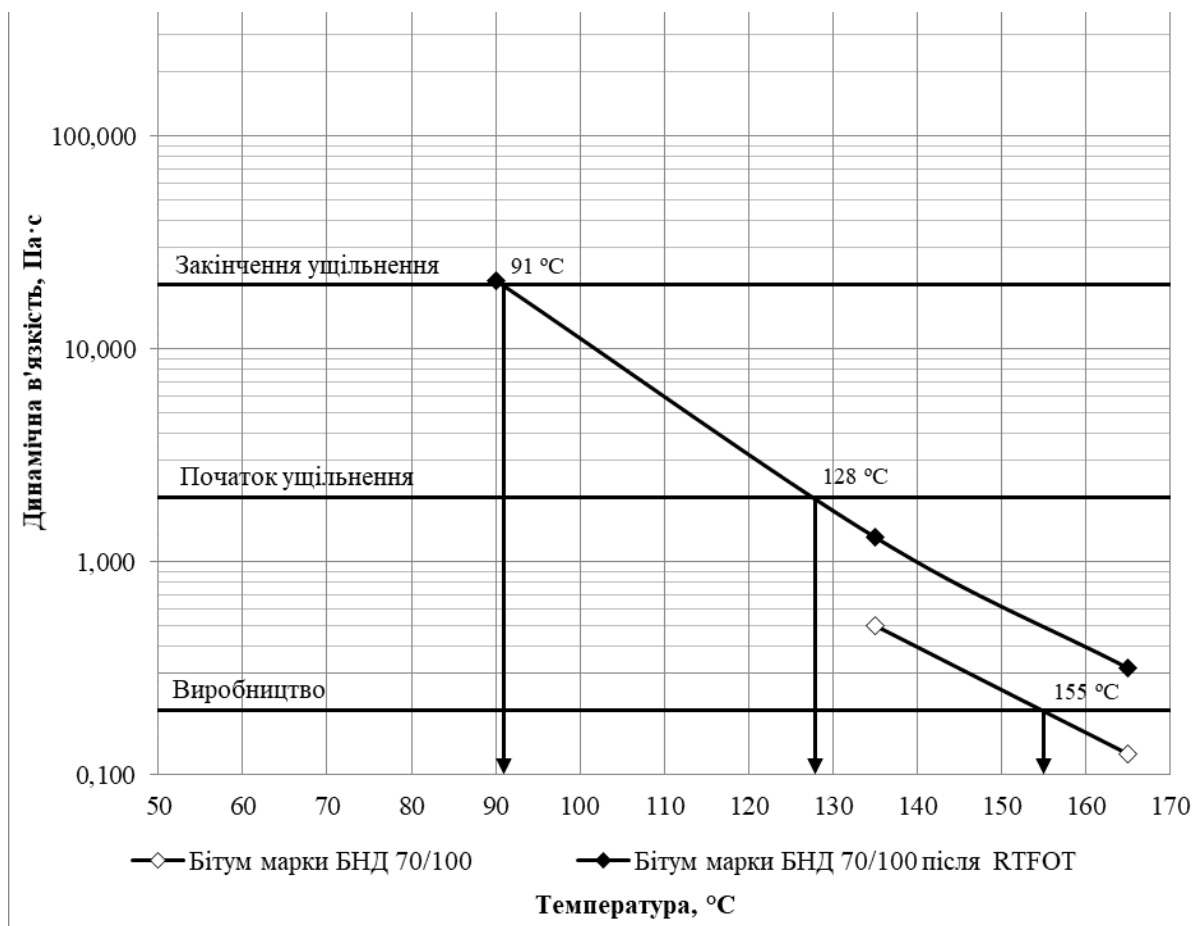


Рисунок 4.2 – Схема визначення технологічних температур виробництва, початку та закінчення ущільнення асфальтобетонних сумішей

За температуру нагрівання бітуму при перемішуванні з мінеральним матеріалом треба приймати температуру за якої динамічна в'язкість вихідного бітуму становить 0,2 Па · с. За температуру початку та закінчення ущільнення асфальтобетонної суміші – температуру за якої в'язкість бітуму випробуваного після старіння за методом RTFOT становить 2,0 Па · с та 20 Па · с, відповідно.

Висновки до розділу 4

1. Вибір бітуму для виробництва асфальтобетонних сумішей необхідно виконувати з урахування його стійкості до технологічного старіння та кліматичних умов роботи асфальтобетонного покриття. За можливості, значення пенетрації бітуму повинно наближуватися до верхнього значення діапазону пенетрації певної марки.

2. Спрогнозувати зміну властивостей бітуму після впливу технологічних температур дозволяє метод RTFOT згідно ДСТУ Б EN 12607-1. При цьому, виконання технологічного старіння необхідно виконувати за еквів'язкої температури для забезпечення однакових умов випробування та врахування технологічних температур виробництва асфальтобетонних сумішей.

3. Підвищити стійкість бітумів до дії технологічних температур можна шляхом використання добавок на основі поверхнево-активних речовин та полімерних добавок, або ж шляхом зниження технологічних температур виробництва та ущільнення асфальтобетонних сумішей з використанням спеціальних енергозберігаючих добавок.

4. Час зберігання та транспортування асфальтобетонних сумішей повинен бути якомога меншим, що дозволить зменшити тривалість впливу температури і, відповідно, зменшити старіння бітуму. При цьому, необхідно обмежувати контакт асфальтобетонної суміші з киснем повітря.

Результати досліджень третього розділу викладено у наступних публікаціях: [84, 146 - 149].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-практична задача, що полягає в розробленні шляхів підвищення довговічності асфальтобетонного покриття за рахунок зменшення технологічного старіння бітумів. Отримані нові наукові результати, які дозволяють контролювати та регулювати технологічне старіння бітуму, що в свою чергу призводить до економії матеріально-технічних ресурсів.

1. На основі аналізу впливу технологічних факторів старіння на якість бітумних в'язучих та властивості асфальтобетонного покриття обґрунтовано доцільність підвищення його довговічності шляхом гальмування технологічного старіння бітумів. Показано, що головними факторами технологічного старіння є висока температура і контакт з повітряним середовищем. В цих умовах відбувається швидка зміна групового хімічного складу та властивостей бітумів, вони стають більш твердими та крихкими, що в свою чергу є причиною передчасного руйнування асфальтобетонних покриттів. Відповідно до цього об'єктивне прогнозування та регулювання здатності бітумів до старіння є важливою складовою підвищення терміну служби асфальтобетонного покриття. На підставі експертного аналізу встановлено можливі напрямки зменшення технологічного старіння бітумів шляхом використання добавок на основі поверхнево-активних речовин катіонного типу та полімерних добавок типу стирол-бутадієн-стирол.

2. Встановлено, що стандартні властивості бітумів змінюються тим більше чим менша його консистенція. Перехід бітуму від марки БНД 90/130 до БНД 40/60 супроводжується зменшенням зміни маси в 1,9 рази для окиснених бітумів та в 1,4 рази – для залишкових, а також збільшенням залишкової пенетрації відповідно на 12 % та 5 %. У випадку оцінювання старіння за індексом старіння, що характеризує його інтенсивність, встановлено зворотню закономірність. Перехід бітуму від марки БНД 90/130 до БНД 40/60 супроводжується зростанням індексу старіння в 1,07 та 1,38 рази. Найбільш чутливою до старіння є в'язкість, яка

збільшується за всіх температур в рази. При цьому, більші зміни властивостей мають місце при прогріванні за методом оновлювальної плівки згідно методу RTFOT порівняно з методом тонкої плівки за методом ГОСТ 18180.

За результатами аналізу впливу технологічних температури на стійкість бітумів до старіння встановлено, що прогрівання бітуму за еквів'язкої температури призводить до менших змін їх властивостей ніж у випадку прогрівання за стандартизованої для всіх марок бітумів температури 163 °С. В цілому під час прогрівання залишкового бітуму за еквів'язкої температури, замість прогрівання за фіксованої температури, його залишкова penetрація є більшою на (22 – 27) %, а індекс старіння – меншим в (1,49 – 1,56) рази, а у випадку окиснених бітумів така різниця становить (13 – 17) % та (1,44 – 1,72) рази.

3. Вплив модифікуючої полімерної добавки типу СБС на стійкість бітуму до технологічного старіння полягає у зменшенні втрати про зменшення втрати маси бітуму після прогрівання в (1,3 – 14) разів, збільшення залишкової penetрації в (1,1 – 1,5) рази; ефективність добавки на основі ПАР виявилася дещо меншою.

4. Аналіз результатів визначення впливу старіння на комплексний модуль пружності асфальтобетонів показав, що найвище значення модуля пружності за температури 10 °С та частоти 1,59 Гц притаманне асфальтобетону на бітумі марки БНД 60/90. Воно є в 1,13 рази вищим ніж модуль пружності асфальтобетону на бітумі, модифікованому 0,5 % ПАР, та бітумі, модифікованому 3,0 % полімеру. З підвищенням температури зміна модуля пружності асфальтобетону на бітумі марки БНД 60/90 є більшою ніж асфальтобетону на інших в'язучих. В результаті цього за температури 65 °С модуль пружності асфальтобетону на бітумі марки БНД 60/90 є в 1,04 рази більшим за модуль пружності асфальтобетону на бітумі з 0,5 % ПАР, а модуль пружності асфальтобетону на бітумі, модифікованому 3,0 % полімеру, – в 2,2 рази більшим за модуль пружності асфальтобетону на бітумі марки БНД 60/90.

Поряд з цим втомна довговічність асфальтобетону на бітумі з ПАР є 1,16 рази більшою за втомну довговічність асфальтобетону на бітумі БНД 60/90, а у випадку асфальтобетону на БМП це відношення становить 1,71 рази, що свідчить про підвищення довговічності асфальтобетонного покриття.

5. За результатами досліджень з метою підвищення довговічності асфальтобетонного покриття шляхом зменшення технологічного старіння бітумів запропоновано встановлювати технологічні режими виробництва асфальтобетонних сумішей з використанням температурної залежності в'язкості вихідного бітуму, а ущільнення – температурної залежності в'язкості зістареного бітуму. Крім того треба дотримуватися розроблених заходів із запобігання старіння асфальтобетонних сумішей під час їх зберігання та транспортування, а також використовувати з даною метою адгезійні поверхнево-активні речовини та полімерні добавки типу СБС.

6. Результати досліджень впроваджено при розробленні державних та галузевих нормативних документів, зокрема державних стандартів щодо технічних вимог та методів випробування бітумів (Зміна № 1 ДСТУ Б В.2.7-135, ДСТУ Б EN 12607-1 та ДСТУ Б В.2.7-313), галузевих рекомендацій (Р В.2.7-03450778-868) та галузевого стандарту (Зміна № 1 СОУ 45.2-00018112-067). Вони використані підрядними організаціями під час будівництва та ремонтів автомобільних доріг, що підтверджено відповідними довідками із таких організацій: Державне агентство автомобільних доріг України, Служба автомобільних доріг у Дніпропетровській області, ТОВ «ДС ПРОМ ГРУП», ТОВ «СП Автострада», ТОВ «Інтер Кемікал Продактс».

Також результати досліджень було впроваджено у навчальний процес, а саме при викладанні дисциплін «Будівельне матеріалознавство» і «Фізико-хімічна механіка дорожньо-будівельних матеріалів» та в дипломному проектуванні для студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія, освітньої програми «Автомобільні дороги та аеродроми».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Nivitha M.R., Roy N., Murali Krishnan J. (2019). Influence of refinery processing methods on ageing of bitumen. *Sādhanā*. 44. 128.
2. Tayh Sady, Jabr A.R. (2011). The Effect of Filler Type on the Hot Mix Asphalt Behavior College of Engineering. *Engineering & Technology Journal*. Vol. 29., No. 9. P. 1701-1720.
3. Sulyman Mohamed, Sienkiewicz Maciej, Haponiuk Józef. (2014). Asphalt Pavement Material Improvement: A Review. *International Journal of Environmental Science and Development*. 5. P. 444–454.
4. Wang J., Yuan J., Kim K.W., Xiao F. (2018). Chemical, thermal and rheological characteristics of composite polymerized asphalts. *Fuel*. 227. P. 289–299.
5. Yuan J., Wang J., Xiao F., Amirkhanian S., Wang J., Xu Z. (2017). Impacts of multiple-polymer components on high temperature performance characteristics of airfield modified binders. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 134. P. 694–702.
6. Yu J., Yu X., Gao Z., Guo F., Wang D., Yu H. Fatigue Resistance Characterization of Warm Asphalt Rubber by Multiple Approaches. *Applied Sciences*. 2018. 8. 1495 p.
7. Liu K., Zhang X., Guo D., Wang F., Xie H. The interlaminar shear failure characteristics of asphalt pavement coupled heating cables. *Materials and Structures*. 2018. 51. 67 p.
8. Elseifi M. A., Al-Qadi I. L., Yang S. H., Carpenter S. H. (2008). Validity of asphalt binder film thickness concept in hot-mix asphalt. *Journal of the Transportation Research Board*. Vol. 2057. P. 37–45.
9. Liwan Shi, Duanyi Wang, Junfeng Wang, Zhonghai Jiang, Hehao Liang, Xiao Qin. A New Method for Designing Dense Skeleton Asphalt Mixture Based on Meso Parameter. *Advances in Civil Engineering*. Vol. 2020, Article ID 3841291, 13 p.

10. ДСТУ Б В.2.7-119:2011 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови. Київ, 2012. 59 с.
11. Золотарёв В.А. (2002). О взаимосвязи реологических свойств битумов и асфальтобетонов. *Наука и техника в дорожной отрасли*. № 4 С. 3–6.
12. Золотарёв В.А. (2007) О системе показателей качества битумов и битумов, модифицированных полимерами. *Автомобильные дороги*. № 2. С. 46–52.
13. Yang Z., Zhang X., Zhang Z., Zou B., Zhu Z., Lu G. ... Yu H. (2018) Effect of aging on chemical and rheological properties of bitumen. *Polymers*. Vol. 10, 1345 p.
14. Золотарев В.А., Копинец И.В. (2016). Сравнительное исследование окисленных и остаточных битумов в статическом и динамическом режимах старения. *Дороги и мосты*. Москва, 2016. Вып. 35. С. 215–232.
15. Ivan Kopynets, Oksana Sokolova, Iryna Gudyma, Alina Yunak (2018). Laboratory studies to reduce the technological aging of bitumen. *Dorogi i mosti [Roads and bridges]*. Kyiv. 18. P. 107–118.
16. Zeng W., Wu S., Wen J., Chen Z. (2015). The temperature effects in aging index of asphalt during UV aging process. *Construction and Building Materials*. Vol. 93. P. 1125–1131.
17. Banerjee A., de Fortier Smit A., Prozzi J.A. (2012). The effect of long-term aging on the rheology of warm mix asphalt binders. *Fuel*. Vol. 97. P. 603–611.
18. Колбановская А.С., Михайлов В.В. Дорожные битумы. Москва: Транспорт, 1973. 264 с.
19. Абрагам Г. Асфальты и другие битумы. Москва: Горно-геолого-нефтяное издательство. 1934. 135 с.
20. Илиополов С.К., Никулин Ю.Я. (2003). *Дороги России XXI века*. № 8. С. 63–68.

21. Илиополов С.К., Никулин Ю.Я., Саенко С.С. Старение битума *Строительство – 2006 : материалы международной научно-практической конференции* (2006). Ростов-на-Дону. С. 49–51.
22. Лысихина А.И., Сицкая Р.И., Авласова Н.М., Ястребова Л.Н. О стабильности битумов и взаимодействии их с минеральными материалами. Москва: Дориздат, 1952. 176 С.
23. Печеный Б.Г., Ахметова Л.А. Исследование механизма старения битумов в эксплуатационных условиях. *Вопросы производства и качества нефтяных битумов*. Уфа, 1976. С. 96–100.
24. Руденская И.М., Горелышева Л.А., Измайлов А.Н. Особенности структуры дорожных битумов разного происхождения по данным электронной микроскопии. *Нефтехимия и нефтепереработка*. Москва, 1979. № 3. С. 18–20.
25. Углова Е.В. Повышение устойчивости к старению битума в асфальтобетонных покрытиях в условиях юга России: дис. канд. техн. наук: Ростовская-на-Дону Государственная Академия Строительства. Ростов-на-Дону, 1993. 170 с.
26. King G., Anderson M., Hanson D., Blankenship P. Using Black space diagrams to predict age induced cracking. *Proceedings of 7th RILEM Int Conf on Cracking in Pavements* (20-22 June 2012). Netherlands. P. 453–463.
27. Francken L. Long term ageing of pure and modified bitumen: Influence on the rheological properties and relation with the mechanical performance of asphalt mixtures. *Proc. 8th International Conference on Asphalt Pavements* (10-14 August 1997). Seattle, USA.
28. Leech D., Nunn M.E. Deterioration mechanisms in flexible roads. *Proceedings of 2nd European Symposium on Performance and Durability of Bituminous Materials* (April 1997). Leeds. P. 271–292.
29. Lu X., Redelius P., Soenen H., Thau M. (2011). Material characteristics of long lasting asphalt pavements. *Road Materials and Pavement Design*. 12 (3). P. 567–585.

30. Копинець І. В., Соколова О. Б., Соколов О. В., Юнак А. Л. Вплив добавок на основі синтетичних восків на експлуатаційні та технологічні властивості бітумів // *Дороги і мости*. – 2019. – Вип. 19-20. – С. 107-116.
31. EN 12607-1:2014 Bitumen and bituminous binders. Determination of resistance to hardening under the influence of heat and air. Part 1. RTFOT method. 2014. 15 p. (Інформація та документація).
32. EN 14769:2012 Bitumen and bituminous binders. Accelerated long-term ageing conditioning by a Pressure Ageing Vessel (PAV). 2012. 12 p. (Інформація та документація).
33. Peterson J.C. (2009). A Review of the Fundamentals of Asphalt Oxidation: Chemical, Physicochemical, Physical Property, and Durability Relationships explores the current physicochemical understanding of the chemistry, kinetics, and mechanisms of asphalt oxidation and its influence on asphalt durability. *Transportation Research Circular*. No. E-C140. 78 p.
34. Redelius P., Soenen H. (2015). Relation between bitumen chemistry and performance. *Fuel*. Vol. 140. P. 34–43.
35. Isacsson U., Zeng H. (1997). Relationships between bitumen chemistry and low temperature behaviour of asphalt. *Construction and Building Materials*. Vol. 11 (2). P. 83–91.
36. Wang J., Wang T., Hou X., Xiao F. (2019). Modelling of rheological and chemical properties of asphalt binder considering SARA fraction. *Fuel*. Vol. 238. P. 320–330.
37. Apostolidis P., Liu X., Kasbergen C., Scarpas A.T. (2017). Synthesis of asphalt binder aging and the state of the art of antiaging technologies. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. Vol. 2633 (1). P. 147–153.
38. Karlsson R., Isacsson U., Ekblad J. (2007). Rheological characterisation of bitumen diffusion. *Journal of Materials Science volume*. Vol. 42. P. 101–108.

39. Michal Holý, Eva Remisova (2019). Characterization of Bitumen Binders on the Basis of Their Thermo-Viscous Properties. *Slovak Journal of Civil Engineering*. 27 (1). P. 25–31.
40. Bernier A., Yut I., Parker F., Dargie D. Long-Term Performance of a Warm-Mix Asphalt Overlay on an Airport Major Taxiway: Case Study. *93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board* (12-16 January 2014). Washington. TRB Paper No. 14-0967.
41. Edler A.C., Hattingh M.M., Servas V.P., Marais C.P. Use of aging tests to determine the efficacy of hydrated lime additions to asphalt in retarding its oxidative hardening (with discussion). *Association of Asphalt Paving Technologists Proc.* Pretoria, 1985. Report no RR 444. P. 118-139.
42. Inocente Domingos, Matheus & Faxina, Adalberto. (2015). Accelerated short-term ageing effects on the rheological properties of modified bitumens with similar high PG grades. *Road Materials and Pavement Design*. 16. P. 1–12.
43. Sá Araujo M.F.A., Leite L.F.M., Pasa V.M.D., Lins V.F.C. (2013). Rheological And Thermal Behavior Of Weathering-Aged Polymer Modified Bitumen. *Brazilian Journal of Petroleum and Gas*. Vol 7. No. 4. P 155–167.
44. A manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary. Transportation Research Board. NCHRP Report 673. National Academy of Sciences. Washington, 2011. 285 p.
45. Androjić I. Ageing of hot mix asphalt (2016). *Građevinar*. Vol. 68. P. 477–483.
46. Gueit C., Robert M. Durability of a bitumen in a hot mix asphalt: Consequences of over-heating at the mixing plant. *In Proceedings of the 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress* (13–15 June 2012). Istanbul. Paper No. A5EE-337. 9 p.
47. Lolly R., Zeiada W., Souliman M., Kaloush K. Effects of Short-Term Aging on Asphalt Binders and Hot Mix Asphalt at Elevated Temperatures and Extended Aging Time. *International Conference on Advances in Sustainable*

Construction Materials & Civil Engineering Systems (2017). Vol. 120. 07010. 17 p.

48. Кіщинський С. В., Копинець І. В. Вплив вмісту термоеластопластів на властивості та старіння бітумів різного виробництва. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. Випуск 79. 2017. С. 33 – 40.

49. V. Vyrozhemskyi, I. Kopynets, S. Kischynskyi, N. Bidnenko. Epoxy asphalt concrete is a perspective material for the construction of roads. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 236 (2017) 012022.

50. Печеный Б.Г. Битумы и битумные композиции. Москва: Химия, 1990. 256 с.

51. Печеный Б.Г., Железко Е.П. (1975). Об изменении состава и свойств битумов в процессе их старения при различных температурах. *Нефтепереработка и нефтехимия*. № 8. С. 10–13.

52. Кіщинський С. В., Копинець І. В., Соколов О. В. Використання енергозберігаючих добавок для зниження технологічних температур приготування асфальтобетонних сумішей. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Вип. 99. 2017. С. 49 – 57.

53. Железко Е.П., Печеный Б.Г., Фрязинов В.В. (1972). Влияние способа получения дорожных битумов на их устойчивость к тепловому старению. *Нефтепереработка и нефтехимия*. Москва. № 12. С. 13–16.

54. The Shell Bitumen Handbook. Fifth Edition. Shell Bitumen. 2003. 460 с.

55. Hintz C., Velasquez R., Li Z., Bahia H. (2011). Effect of Oxidative Aging on Binder Fatigue Performance. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. Vol. 80. P. 527–548.

56. Lee S. J., Amirkhanian S. N., Shatanawi K., Kim K. W. (2008). Short-term aging characterization of asphalt binders using gel permeation chromatography and selected Superpave binder tests. *Construction and Building Materials*. 22. P. 2220–2227.

57. Traxler R. N. Durability of Asphalt Cements (with Discussion). *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings* (1963). Vol. 32. P. 44–63.
58. Basu A., Marasteanu M. O., Hesp S. A. M. (2003). Time-temperature superposition and physical hardening effects in low-temperature asphalt binder grading. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1829. P. 1–7.
59. ASTM D 2872-19 Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). 2019. 12 p. (Інформація та документація).
60. EN 12607-2:2014 Bitumen and bituminous binders - Determination of the resistance to hardening under influence of heat and air - Part 2: TFOT Method. 2014. 11 p. (Інформація та документація).
61. Zupanick M. (1994). Comparison of the Thin Film Oven Test and the Rolling Thin Film Oven Test (with Discussion and Closure). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. Vol. 63. P. 346–372.
62. ASTM D1754 / D1754M - 20 Standard Test Method for Effects of Heat and Air on Asphaltic Materials (Thin-Film Oven Test). 2020. 7 p. (Інформація та документація).
63. ASTM D 6521-19a Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV). 2019. 7 p. (Інформація та документація).
64. Airey G. (2003). State of the art report on ageing test methods for bituminous pavement materials. *International Journal of Pavement Engineering*. Vol. 4. P. 165–176.
65. Lewis R., Welborn J. (1941). The Properties of the Residues of 50-60 and 85-100 Penetration Asphalts from Oven Tests and Exposure. *Public Roads*. Vol. 11 & 12, NO 86 & 14.
66. Вирожемський В. К., Кіщинський С. В., Копинець І. В., Соколова О. Б., Гудима І. В., Юнак А. Л. Вплив технологічних температур

на зчеплюваність бітумів, модифікованих адгезійними добавками, з мінеральним матеріалом. *Автошляховик України*. № 2. 2018. С. 49 – 57.

67. Hveem F., Zube E., Skog J. Proposed new tests and specifications for paving grade asphalts. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings* (1963). Vol. 32. P. 271–327.

68. Griffin R., Miles T., Penther C. Microfilm durability test for asphalt. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings* (1955). Vol. 24. 31 p.

69. Parmeggiani G. Nitrogen Rolling Thin Film Oven Test. *Proceedings of the Papers Submitted for Review at 2nd Euraspalt and Eurobitume Congress: Session 2. Book 2* (20-22 September 2000). Barcelona.

70. Halstead W. J., Zenewitz J. A. (1961). Changes in asphalt viscosities during thin-film oven and microfilm durability tests. *Public Roads*. Vol. 31. P. 211–218.

71. ГОСТ 18180-72 Бітуми нафтові. Метод визначення зміни маси після прогріву (СТ СЭВ 4543-84). 1972. 4 с. (Інформація та документація).

72. Семенов Н.Н. О некоторых проблемах химической кинетики. Москва: Изд-во АН СССР, 1958. 25 с.

73. Волкова В.Л. Повышение водоустойчивости асфальтобетона, приготовленного горячим способом. *Автомобильные дороги*. 1959. № 5. 25 с.

74. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. Київ, 2016. 104 с. (Інформація та документація).

75. Радовский Б.С. (2008). Технология нового теплого асфальтобетона в США. *Строительная техника и технологии*. С. 1–28.

76. International RILEM Workshop on Life Prediction and Aging. Paris. 2003. 391 p.

77. Кіщинський С. В., Копинець І. В. Сучасні матеріали та технології при новому будівництві, реконструкції та ремонтах автомобільних доріг загального користування. Київ. 2016.

78. ДСТУ 4044-2001 Бітуми нафтові дорожні в'язкі. Технічні умови. Київ, 2001. 16 р. (Інформація та документація).
79. EN 12591:2009 Bitumen and bituminous binders. Specifications for paving grade bitumens. 2009. 29 р. (Інформація та документація).
80. EN 1426:2015 Bitumen and bituminous binders - Determination of needle penetration. 2015. 14 р. (Інформація та документація).
81. EN 1427:2015 Bitumen and bituminous binders. Determination of the softening point. Ring and Ball method. 2015. 18 р. (Інформація та документація).
82. ДСТУ 8825:2019 Бітум та бітумні в'язучі. Метод визначення розтяжності. Київ, 2020. 9 с. (Інформація та документація).
83. EN 13302:2018 Bitumen and bituminous binders. Determination of dynamic viscosity of bituminous binder using a rotating spindle apparatus. 2018. 15 р. (Інформація та документація).
84. ДСТУ Б В.2.7-135:2014 Бітуми дорожні, модифіковані полімерами. Технічні умови. Київ, 2015. 19 с. (Інформація та документація).
85. Migliory F., Daligault A., Moli Nengo J-Ch. Etude du comportement a base temperature des bitumes routiers (1996). *Application du Bending Beam Reometer*. Iss. 202. 1996. P. 11–24.
86. MS-25 Asphalt Binder Testing Manual: The technician's manual for Specification Testing of Asphalt Binder. Asphalt institute, 2012. 169 р.
87. Migliory F., Pastor M., Rammond G., Such C. Etude statistique sommaire de quelques cas de fissurations thermique. *5 th Eurobitume Congress* (13-15 June 2012). Stockholm. Vol. 16. P. 724-728.
88. Michał Babiak, Jacek Kosno, Maria Ratajczak and Krzysztof Zieliński. Innovative Additive for Bitumen Based on Processed Fats. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 245, Iss. 2. P. 1–10.

89. Копинець І. В. Підвищення стійкості окислених бітумів до старіння шляхом їх компаундування з дистиляційними бітумами. *Автошляховик України*. № 5. 2015.
90. Копинець І. В. Стійкість окислених бітумів до термоокислювального старіння. *Дороги і мости*. 2014. № 14. С. 14 – 20.
91. I. Kopynets. Research of changes in properties of bitumen during thermo-oxidative ageing. *Young researchers seminar 2015*. Rome. 2015.
92. The rolling thin film oven test. *Shell Bitumen Review*. 1973. No. 42.
93. Whiteoak C.D. *Shell Bitumen Handbook*. Surrey, 1990.
94. Кіщинський С. В., Кириченко Л. Ф., Юнак А. Л., Копинець І. В., Гудима І. В. Моніторинг якості бітумів, що застосовуються в дорожньому будівництві України. *Дороги і мости*. 2014. № 14. С. 76 – 84.
95. Kemp G.R., Prodoehl N.H. A comparison of field and laboratory environments on asphalt durability. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings* (1981). Vol. 50. P. 492-537.
96. DIN 52016:1980-12 Prüfung bituminöser Bindemittel; Thermische Beanspruchung im rotierenden Kolben (Інформація та документація).
97. Welborn J.Y. (1979). Relationship of asphalt cement properties to pavement durability. *National Cooperative Highway Research Program*. 59. Washington.
98. Zube E., Skog, J. Final report on the Zaca-Wigmore asphalt test road. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings* (February 1969). Vol. 38. P. 1–38.
99. Simpson W.C., Griffin R.L., Miles T.K. (1959). Correlation of the micro-film durability test with the field hardening observed on the Zaca-Wigmore experimental road project. *Am Soc Testing & Matls Spec Tech Publ*. Vol. 277. 52 p.
100. Копинець І. В. Дослідження стійкості бітумів до термоокислювального старіння. *Науково-практична конференція з проектування та будівництва автомобільних доріг*. Київ. 2015.

101. Skog J. Setting and durability studies on paving grade asphalts. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings* (1967). Vol 36. P. 387–420.
102. AASHTO M 320-10 Performance-Graded Asphalt Binder. 2010. 8 p. (Інформація та документація).
103. Колосов М.А., Розенталь Д.А. Термическая и термоокислительная стабильность битумов из ромашкинской нефти. *Структурообразование, методы испытаний и улучшение технологии получения битумов: Труды Союздорнии*. Москва, 1971. Вып. 49. С. 88–93.
104. Портнягин В.Д. Особенности подготовки битумов и приготовления асфальтобетонных смесей : уч. пособ. Москва: ИПК Минавтодора РСФСР, 1988. С. 7–74.
105. Гохман Л.М. Комплексные органические вяжущие материалы на основе блоксополимеров типа СБС : уч. пособ. Москва: ЗАО «ЭКОН-ИНФОРМ», 2004. 585 с.
106. Гохман Л.М. (2008). Теоретические основы строения органических вяжущих. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. Вып. 40. С. 7–12.
107. Van Dijk W., Moreaud H., Quedeveille A., Uge P. The Fatigue Of Bitumen and Bituminous Mixes. *Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements* (11-15 September 1972). London. Vol. 1. P. 254–366.
108. Золотарев В. А., Галкин А. В., Пыриг Я. И., Копинец И. В. Дистилляционные, окисленные битумы, битумы, модифицированные полимерами, и асфальтобетоны на их основе. *Автомобильные дороги и мосты*, № 2 (18), 2016.
109. Béghin A., Nicolaï A., Jakubowski M. Ré énération du bitume issu du recyclage - Partie 2: Evaluation du vieillissement du bitume. *Revue générale des routes et de l'aménagement (RGRA)* (Mai, 2015). Vol. 927. P. 54–60.

110. Бутова В. В. Исследование старения горячего и теплого асфальтобетона: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Харьков, 1971. 18 с.

111. ВБН Г.1-218-050-2001 Міжремонтні строки експлуатації дорожніх одягів та покриттів на автомобільних дорогах загального користування. Київ, 2001. 12 с. (Інформація та документація).

112. Р В.2.7-03450778-869:2016 Рекомендації з поліпшення якості бітумів шляхом їх компаундування з дистиляційними бітумами та продуктами нафтопереробки. Київ, 2016. 21 с. (Інформація та документація).

113. ДСТУ-Н Б В.2.7-254:2012 Приготування та застосування дорожніх бітумів, модифікованих адгезійними добавками на основі катіонних поверхнево-активних речовин. Київ, 2012. 16 с. (Інформація та документація).

114. ДСТУ-Н Б В.2.7-298:2013 Настанова щодо приготування та застосування бітумів дорожніх, модифікованих полімерами. Київ, 2014. 27 с. (Інформація та документація).

115. Petersen J.C. A thin film accelerated ageing test for evaluating asphalt oxidative ageing. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings* (1989). Vol. 58. P. 220–237.

116. McHattie R.L. Estimating the durability of chem-crete modified paving asphalt. *Alaska Department of Transportation and Public Facilities*. Fairbanks, 1983. 43 p.

117. Santucci L.E., Goodrich J.E., Sunberg J.E. The effect of crude source and additives on the long term oven aging of paving asphalts. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings* (1981). Vol. 50. P. 560–571.

118. Davis T.C., Petersen J.C. An inverse GLC study of asphalts used in the Zaca-Wigmore experimental test road. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings* (1967). Vol. 36. P. 1–10.

119. Bahia H.U., Hislop W.P., Zhai H., Rangel A. Classification of asphalt binders into simple and complex binders. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings* (1998). Vol. 67. P. 1–41.

120. Verhasselt A., Vanelstraete A. Long-term ageing – comparison between PAV and RCAT ageing tests. *Proceedings 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Session 1: Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures* (2000). Barcelona. P. 897–905.

121. Hayton B., Elliott R.C., Airey G.D., Raynor C.S. Long term ageing of bituminous binders. *Proceedings Eurobitume Workshop 99* (1999). Luxembourg. Paper No. 126.

122. Bocci M., Cerni G. The ultraviolet radiation in short- and long-term aging of bitumen. *Proceedings 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Session 1: Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures* (2000). Barcelona. P. 49–58.

123. Vallerga B.A., Monismith C.L., Granthem K. A study of some factors influencing the weathering of paving asphalts. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings* (1957). Vol. 26. P. 126-150.

124. Bell C.A., Wieder A.J. and Fellin M.J. Laboratory ageing of asphalt aggregate mixtures: field validation. SHRP-A-390, Strategic Highway Research Program. Washington: National Research Council, 1994. 210 p.

125. Bishara S.W., Robertson R.E., Mahoney D. Rapid oxidative ageing of binder using microwave energy. An improved method.” *Proceedings 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Session 2: Development in Bituminous Products and Techniques* (2000). Barcelona. P. 27-36.

126. Кіщинський С. В., Копинець І. В. Проблеми якості бітумів та напрямки поліпшення їх властивостей. *Сучасні матеріали й технології для розвитку та утримання автомобільних доріг, Міжнародна виставка-форум «HEAVY DUTY/ВАЗКА ТЕХНІКА 2018»*. м. Київ. 2018.

127. Brown S.F., Scholz T.V. Development of laboratory protocols for the ageing of asphalt mixtures. *Proceedings 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress*,

Session 1: Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures (2000). Barcelona. P. 83-90.

128. Christensen D.W., Anderson D.A. Interpretation of dynamic mechanical test data for paving grade asphalt cements. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings* (1992). Vol. 61. P. 67–116.

129. Goode J.F., Lufsey L.A. Voids, permeability, film thickness vs. asphalt hardening. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings* (1965). Vol. 35. P. 430–463.

130. Harrigan E.T, Leahy R.B., Youtcheff J.S. (1994). The Superpave mix design system: Manual of specifications, test methods and practices. SHRP-A-379, Strategic Highway Research Program. Washington: National Research Council, 1994. 255 p.

131. Lang F.C., Thomas T.W. (1939). Laboratory studies of asphalt cements. *Bulletin of the University of Minnesota*. Vol. XLII. No 55. 104 p.

132. Pauls J.T., Welborn J.Y. Studies of the hardening properties of asphaltic materials. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings* (1952). Vol. 21. P. 48–75.

133. Plancher H., Green, E.L., Peterson, J.C. Reduction of oxidative hardening of asphalts by treatment with hydrated lime – a mechanistic study. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings* (1976). Vol. 45. P. 1–24.

134. Кіщинський С. В., Копинець І. В. Вплив вмісту термоеластопластів на властивості та старіння бітумів різного виробництва. *Міжнародна наукова конференція «Бітумні в'язучі та асфальтобетони: досягнення та проблеми»*. Харків. 2017.

135. Hugo F., Kennedy T.W. Surface cracking of asphalt mixtures in Southern Africa. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings* (1985). Vol. 54. P. 454–501.

136. Von Quintas H., Scherocman J., Kennedy T.W., Hughes C.S. (1988). Asphalt aggregate mixture analysis system. *Final Report to NCHRP*. Iss. 338. 191 p.
137. Bell C.A., Sosnovske D. Ageing: binder validation. SHRP-A-384. Strategic Highway Research Program. Washington. National Research Council, 1994. 85 p. 1994. 121 p.
138. Scholz T.V. Durability of bituminous paving mixtures. Extended abstract of PhD dissertation. School of Civil Engineering, University of Nottingham. 1995.
139. Bell C.A. Summary report on ageing of asphalt-aggregate systems. SHRPA/IR-89-004, Strategic Highway Research Program. Washington. National Research Council. 1989
140. Kumar A., Goetz W.H. (1977). Asphalt hardening as affected by film thickness, voids and permeability in asphaltic mixtures. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*. Vol. 46. P. 571–605.
141. Kim O-K., Bell C.A., Wilson J. and Boyle G. Effect of moisture and aging on asphalt pavement life, Part 2 – effect of aging. Final Report to Oregon Department of Transportation and Federal Highway Administration. FHWA-OR-RD-86-01-2. Washington, 1986. 73 p.
142. Khalid H.A., Walsh C.M. Relating mix and binder fundamental properties of aged porous asphalt materials. *Proceedings 2nd Eurasphalt & 27 Eurobitume Congress, Session 1: Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures* (2000). Barcelona. P. 398–405.
143. Korsgaard H.Ch., Blumensen J., Sundahl J., Gonzales C. (1996). Accelerated ageing of asphalt in pressure ageing vessel. *Proceedings 1st Eurasphalt & Eurobitume Congress* (7–10 May 1996). Strasbourg. Paper E&E.4.048. 11 p.
144. Копинець І. В. Комплексна модифікація бітумів різними типами добавок. *Сучасні матеріали і технології будівництва, реконструкції та*

ремонтів автомобільних доріг, Міжнародна науково-практична конференція. м. Вінниця. 2018.

145. Копинець І. В. Зменшення термоокислювального старіння бітумів під час виробництва асфальтобетонних сумішей шляхом використання енергозберігаючих добавок на основі поверхнево-активних речовин. *Модифікація бітумів та асфальтобетонів – ефективний напрямок підвищення довговічності автомобільних доріг. Науково-практичний семінар.* Київ. 2018.

146. ДСТУ Б EN 12607-1:2015 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення опору до твердіння під впливом теплоти та повітря. Частина 1. Метод RTFOT (EN 12607-1:2014, IDT). Київ, 2015, 23 с.

147. ДСТУ Б В.2.7-313:2016 Бітуми дорожні, модифіковані комплексами добавок. Технічні умови. Київ, 2016, 14 с.

148. СОУ 45.2-00018112-067:2011 Будівельні матеріали. Бітуми дорожні в'язкі, модифіковані добавками адгезійними. Технічні умови. Зміна № 1. Київ, 2017, 17 с.

149. Р В.2.7-03450778-868:2016 Рекомендації з підвищення стійкості бітумів до дії технологічних температур. Київ, 2016, 16 с.

150. ГБН В.2.3-37641918-559:2019 Автомобільні дороги. Дорожній одяг нежорсткий. Проектування. – Чинні від 2019.06.01. – Київ: Міністерство інфраструктури України, 2019. 60 с.

151. ДСТУ EN 12697-24:2018 (EN 12697-24:2012, IDT) Бітумомінеральні суміші. Методи випробування гарячих асфальтобетонних сумішей. Частина 24. Опір втомі. – Чинний від 2019.01.01. – Київ: Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», 2018. – 43 с.

152. Довідник № 1 розрахункових характеристик ґрунтів, матеріалів покриття і основи дорожнього одягу та навантажень від транспортних засобів. Київ: Державне агенство автомобільних доріг України, 2017. – 43 с.

153. Салль А. О. Механические свойства асфальтобетона при изгибе кратковременными нагрузками / А. О. Салль // Труды СоюздорНИИ. – М.: 1969. – № 34.

154. Pell P. S. The Effect of Testing and Mix Variables on the Fatigue Performance of Bituminous Materials / P. S. Pell, K. E. Cooper // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 44, 1975. – p.1–37.

155. Руденский А. В. Исследование усталости асфальтобетона / А. В. Руденский, Т. Н. Калашникова // Труды ГипродорНИИ. – М., 1973. – № 7. – С. 3 – 13.

156. Бахрах Г. С. Об оценке выносливости дорожных асфальтобетонных покрытий / Г. С. Бахрах // Труды ГипродорНИИ. – М.: 1980. – С. 57–65.

157. Руденский А. В. Определение расчетных значений модуля упругости асфальтобетона по результатам экспериментального определения фактических значений модуля упругости / А. В. Руденский // Дороги и мосты. – М.: РосдорНИИ, 2010. – № 23. – С. 222-227.

158. Калгин Ю. И. Усталостная долговечность холодного асфальтобетона на основе модифицированных жидких битумов / Ю. И. Калгин, В. Т. Ерофеев // Строительство, архитектура, дизайн. – М., 2008 – № 2 (4). – С. 98–103.

159. Печеный Б. Г. Долговечность битумных и битумоминеральных покрытий / Б. Г. Печеный. – М.: Стройиздат, 1981. – 124 с.

160. Evaluation of fatigue resistance for modified asphalt concrete mixtures based on dissipated energy concept / Farag Khodary Moalla Hamed. – Darmstadt: Department of Civil Engineering and Geodesy Technische Universität, 2010. – 156 p.

161. Evaluation of Fiber-Reinforced Asphalt Mixtures Using Advanced Material Characterization Tests / Kamil E. Kaloush, Waleed A. Zeiada, Krishna P. Biligiri, Maria C. Rodezno, Jordan Reed // Graduate Research

Associates Arizona State University Department of Civil and Environmental Engineering. – Tempe, 2005. – 18 p.

162. Радовский Б. С. Проблемы механики дорожно-строительных материалов и дорожных одежд / Б. С. Радовский. – К., 2003. – 240 с.

163. Калашникова Т. Н. Исследование усталостных свойств дорожных асфальтовых бетонов: дис. канд. тех. наук: 05.23.05 / Т. Н. Калашникова. – М., 1975. – 211 с.

164. M. W. Witzak Development of a master curve (E*) database for lime modified asphaltic mixtures / M. W. Witzak, Javed Bari // Arizona State University Research Project, Fulton School of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering. – 2004. July. – 29 p.

165. M. W. Witzak Development of a master curve (E*) database for lime modified asphaltic mixtures / M. W. Witzak, Javed Bari // Arizona State University Research Project, Fulton School of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering. – 2004. July. – 29 p.

166. Золотарев В. А. Эквивалентная температура как альтернатива температуре размягчения битума / Золотарев В.А., Пыриг Я.И., Галкин А.В. // Наука и техника в дорожной отрасли. М.: МАДИ. – 2007. - №2. – С. 36-39.

167. Золотарев В. А. Дорожные битумные вяжущие и асфальтобетоны [Текст]: учебник в 2 ч. Часть 2. Дорожные асфальтобетоны / В. А. Золотарев. – Харьков : ХНАДУ, 2016. – 204 с.

168. Гунн Р.Б. Нефтяные битумы / Р.Б. Гунн. – М.: Химия, 1978. – 432 с.

169. Глотова Н.А. Изменение реологических свойств и химического состава битумов при старении / Н.А. Глотова, В.С. Горшков, Б.И. Кац // Научнотехнический журнал «Химия и технология топлив и масел». – 1980. – № 4. – С. 47-49.

170. Галдина В.Д. Кинетика термоокислительного старения битумов различной природы / В.Д. Галдина // Вестник ТГАСУ. – 2011. – № 3. – С. 133-139.

171. Романов С.И. Современный выбор температурного регламента производства высококачественного окисленного нефтяного дорожного битума на нефтеперерабатывающих заводах / С.И. Романов, А.И. Лескин, Б.Г. Печеный // Вестник ВолгГАСУ. – 2008. – Вып. 11(30). – С. 87-90.

172. Технологическое старение дорожного нефтяного битума как двухфакторный процесс / В.И. Братчун, М.К. Пактер, А.А. Стукалов и др. // Ресурсоекономні 6 матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Зб. наук. праць. – Рівне, 2012. – Вип. 23. – С. 31-41.

173. Чан Нят Тан Регулирование термоокислительной стабильности дорожных битумов и битумных материалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07 / Чан Нят Тан. – Москва, 2010. – 121 с.

174. Petersen J. Chemical composition of asphalt as related to asphalt durability: state of the art / J. Petersen // Transportation Research Board, Washington, DC, 999 – 1984. – pp. 13-30.

175. Petersen J. A review of the fundamentals of asphalt oxidation: chemical, physicochemical, physical property, and durability relationships / J. Petersen // Transportation Research E-Circular (Vol. 1). Transportation Research Board. – 2009.

176. Золотарев В. А. Долговечность дорожных асфальтобетонов / В. А. Золотарев. – Харьков: Вища школа, 1977 – 116 с.

177. Гончаренко В. В. Усталостное разрушение асфальтобетонных покрытий под действием циклических нагрузжений / В. В. Гончаренко, О. С. Хлебникова // Дороги і мости. - 2006. - Вип. 5. - С. 148-153.

178. Маляр В.В. Закономерности механических свойств нефтяных битумов при стекловании: Дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – Харьков, 1993.

179. Телтаев Б.Б. Анализ расчетных значений модуля упругости асфальтобетонов / Б.Б. Телтаев // Дорожная техника. – 2010. – С. 130-137.

180. Маляр В.В. Прогнозирование модуля упругости асфальтобетона с использованием реологической модели Виткача / В.В. Маляр // Автомобільні дороги і дорожнє. – Київ, НТУ, 2013. – Випуск №84. – С. 72-79.

ДОДАТОК А
РОЗРОБЛЕНІ ДОКУМЕНТИ

**ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ
(УКРАВТОДОР)
Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут
імені М.П.Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»)**

РЕКОМЕНДОВАНО

Науковою радою
Державного агентства автомобільних доріг
України (Укравтодор)
Протокол від «28» чудня 2016 року
№ 2

РЕКОМЕНДОВАНО

Науково-технічною радою
ДП «ДерждорНДІ»
Протокол від «31» травня 2016 року
№ 4

Рекомендації

з підвищення стійкості бітумів до дії технологічних температур

Р В.2.7-03450778-868:2016

ПОГОДЖЕНО

Директор Департаменту
розвитку мережі доріг
Укравтодору

С.Ю. Цепелев
« » 2016 р.

ПОГОДЖЕНО

Начальник відділу
стандартизації та метрології
ДП «ДерждорНДІ»

М.М. Стулій
« » 2016 р.

РОЗРОБЛЕНО

Перший заступник директора з наукової
роботи ДП «ДерждорНДІ», к.т.н.

В.К. Вирожемський
« » 2016 р.

Науковий керівник,
начальник центру асфальтобетонів та
органічних в'язучих

С.В. Кішинський
« » 2016 р.

Відповідальний виконавець,
завідувач відділу дорожньо-будівельних
матеріалів

І.В. Копинець
« » 2016 р.

Київ
2016

**ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ
(УКРАВТОДОР)**

Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут
імені М.П.Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»)

РЕКОМЕНДОВАНО

Науковою радою
Державного агентства автомобільних доріг
України (Укравтодор)
Протокол від «28» грудня 2016 року
№ 2

РЕКОМЕНДОВАНО

Науково-технічною радою
ДП «ДерждорНДІ»
Протокол від «31» травня 2016 року
№ 4

Рекомендації

з поліпшення якості бітумів шляхом їх компаундування з
дистиляційними бітумами та продуктами нафтопереробки

Р В.2.7-03450778-869:2016

ПОГОДЖЕНО

Директор Департаменту
розвитку мережі доріг
Укравтодору

 С.Ю. Цепелєв
« » 2016 р.

ПОГОДЖЕНО

Начальник відділу
стандартизації та метрології
ДП «ДерждорНДІ»

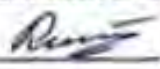
 М.М. Стулій
« » 2016 р.

РОЗРОБЛЕНО

Перший заступник директора з науково
роботи ДП «ДерждорНДІ», к.т.н.

 В.К. Вирожемський
« » 2016 р.

Науковий керівник,
начальник центру асфальтобетонів та
органічних в'язучих

 С.В. Кішинський
« » 2016 р.

Відповідальний виконавець,
завідувач відділу дорожньо-будівельних
матеріалів

 І.В. Копинець
« » 2016 р.

Київ
2016



НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

**БІТУМ ТА БІТУМНІ В'ЯЖУЧІ.
ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ ДО ТВЕРДІННЯ
ПІД ВПЛИВОМ ТЕПЛОТИ ТА ПОВІТРЯ**

**Частина 1. Метод RTFOT
(EN 12607-1:2014, IDT)**

ДСТУ Б EN 12607-1:2015

Відповідає офіційному тексту

Київ
Мінрегіон України
2016



НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

БІТУМИ ДОРОЖНІ, МОДИФІКОВАНІ ПОЛІМЕРАМИ

Технічні умови

ДСТУ Б В.2.7-135:2014

Відповідає офіційному тексту

Київ

Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального
господарства України

2014



НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

**БІТУМИ ДОРОЖНІ, МОДИФІКОВАНІ
КОМПЛЕКСАМИ ДОБАВОК
Технічні умови**

ДСТУ Б В.2.7-313:2016

Видання офіційне

Київ
Мінрегіон України
2017

ДОДАТОК Б
ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРОБОК

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційного дослідження

Копинця Івана Вікторовича

Даною довідкою підтверджується, що результати дисертаційної роботи Копинця І. В. було впроваджено в Державному агентстві автомобільних доріг України (Укравтодор) під час виконання науково-дослідних робіт згідно з договорами № 104-14 від 29 серпня 2014 року «Провести дослідження та розробити пакет нормативних документів з підвищення стійкості бітумів та асфальтобетонів до дії технологічних температур» (№ державної реєстрації 0114U006231) та № 107-14 від 29 серпня 2014 року «Провести дослідження та розробити національний стандарт на штучне старіння бітумів з ідентичним ступенем відповідності до EN 12607-1» (№ державної реєстрації 0114U006234). В результаті виконання робіт були розроблені:

- Р В.2.7-03450778-868:2016 Рекомендації з підвищення стійкості бітумів до дії технологічних температур;

- ДСТУ Б EN 12607-1:2015 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення опору до твердіння під впливом теплоти та повітря. Частина I. Метод RTFOT (EN 12607-1:2014, IDT).

Начальник відділу інноваційного розвитку Департаменту технічного забезпечення та інноваційного розвитку



Олександр ТИМОЩУК



Державне агентство автомобільних доріг України
(УКРАВТОДОР)

Служба автомобільних доріг у Дніпропетровській області

вул.Воскресенська, 24, м.Дніпро, 49600, Україна
тел.факс (056)744-82-94, e-mail: admin@sad.gov.ua
код ЄДРПОУ 25843931

08.02.2021 № 1-18/334
на № _____ від _____

ДОВІДКА

про впровадження наукових розробок дисертаційної роботи

Копинця Івана Вікторовича

Наукові розробки та практичні рекомендації дисертаційних досліджень Копинця І. В. щодо використання для виробництва асфальтобетонних сумішей комплексно модифікованих бітумів з підвищеною стійкістю до старіння отримали практичне використання під час будівництва та ремонту автомобільних доріг у Дніпропетровській області.

Заступник начальника з проєктів

О. А. Беліков



Товариство з обмеженою відповідальністю
« ДС ПРОМ ГРУП »

07403, Україна Київська обл., м. Бровари вул. О.Онїсенка 2/1
 ІВАН UA983204780000026006924440708
 р/р 26006924440708 у ПАТ АБ «УКРГАЗБАНК» МФО 320478
 ЄДРПОУ 39810010, ППН 398100110292
 Email: ds-promgrup@ukr.net
 Тел: 067-620-22-02

Довідка

про впровадження наукових розробок дисертаційної роботи
 Копинця Івана Вікторовича

Наукові розробки та практичні рекомендації дисертаційних досліджень Копинця І. В. щодо підвищення стійкості бітумів до технологічного старіння успішно використовуються в діяльності ТОВ «ДС ПРОМ ГРУП» під час встановлення технологічних параметрів виробництва гарячих асфальтобетонних сумішей.

Директор



Д. В. Мусієнко



УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ

61002, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, тел. (057) 700-38-66, факс (057) 700-38-65, E-mail: admin@khadi.kharkov.ua

10.02.21 № 234/38
На № _____

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Результати дисертаційної роботи Копинця Івана Вікторовича за темою «Підвищення довговічності асфальтобетонного покриття шляхом зменшення технологічного старіння бітумів» впроваджено у навчальний процес, а саме при викладанні дисциплін «Будівельне матеріалознавство» та «Фізико-хімічна механіка дорожньо-будівельних матеріалів», а також в дипломному проектуванні для студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія, освітньої програми «Автомобільні дороги та аеродроми».

Проректор з науково-педагогічної роботи,
д.т.н., професор

 А.Г. Батракова

Декан дорожньо-будівельного факультету,
професор

 С.О. Бугаєвський

ДОДАТОК В
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА
ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Список опублікованих праць за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. V. Vyrozhemskyi, I. Kopynets, S. Kischynskyi, N. Bidnenko. Epoxy asphalt concrete is a perspective material for the construction of roads. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. [ISSN:1757-8981, E-ISSN:1757-899X] 236 (2017) 012022. (Scopus) DOI: 10.1088/1757-899X/236/1/012022.

Статті у фахових виданнях:

2. Ivan Kopynets, Oksana Sokolova, Iryna Gudyma, Alina Yunak. Laboratory studies to reduce the technological aging of bitumen. *Дороги і мости*. Київ, 2018. Вип. 18. С. 107-118.

3. Кіщинський С. В., Копинець І. В., Соколов О. В. Використання енергозберігаючих добавок для зниження технологічних температур приготування асфальтобетонних сумішей. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Вип. 99. 2017. С. 49 – 57.

4. Кіщинський С. В., Копинець І. В. Вплив вмісту термоеластопластів на властивості та старіння бітумів різного виробництва. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. Випуск 79. 2017. С. 33 – 40.

5. Копинець І. В., Соколова О. Б., Соколов О. В., Юнак А. Л. Вплив добавок на основі синтетичних восків на експлуатаційні та технологічні властивості бітумів // *Дороги і мости*. – 2019. – Вип. 19-20. – С. 107-116.

6. Вирожемський В. К., Кіщинський С. В., Копинець І. В., Соколова О. Б., Гудима І. В., Юнак А. Л. Вплив технологічних температур на зчеплюваність бітумів, модифікованих адгезійними добавками, з мінеральним матеріалом. *Автошляховик України*. № 2. 2018. С. 49 – 57.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

7. Копинець І. В. Стійкість окислених бітумів до термоокислювального старіння. *Дороги і мости*. 2014. № 14. С. 14 – 20.
8. Кіщинський С. В., Кириченко Л. Ф., Юнак А. Л., Копинець І. В., Гудима І. В. Моніторинг якості бітумів, що застосовуються в дорожньому будівництві України. *Дороги і мости*. 2014. № 14. С. 76 – 84.
9. Копинець І. В. Підвищення стійкості окислених бітумів до старіння шляхом їх компаундування з дистиляційними бітумами. *Автошляховик України*. № 5. 2015.
10. I. Kopynets. Research of changes in properties of bitumen during thermo-oxidative ageing. *Young researchers seminar 2015*. Rome. 2015.
11. Копинець І. В. Дослідження стійкості бітумів до термоокислювального старіння. *Науково-практична конференція з проектування та будівництва автомобільних доріг*. Київ. 2015.
12. Кіщинський С. В., Копинець І. В. Сучасні матеріали та технології при новому будівництві, реконструкції та ремонтах автомобільних доріг загального користування. Київ. 2016.
13. Кіщинський С. В., Копинець І. В. Вплив вмісту термоеластопластів на властивості та старіння бітумів різного виробництва. *Міжнародна наукова конференція «Бітумні в'язучі та асфальтобетони: досягнення та проблеми»*. Харків. 2017.
14. Кіщинський С. В., Копинець І. В. Проблеми якості бітумів та напрямки поліпшення їх властивостей. *Сучасні матеріали й технології для розвитку та утримання автомобільних доріг, Міжнародна виставка-форум «HEAVY DUTY/ВАЖКА ТЕХНІКА 2018»*. м. Київ. 2018.
15. Копинець І. В. Комплексна модифікація бітумів різними типами добавок. *Сучасні матеріали і технології будівництва, реконструкції та ремонтів автомобільних доріг, Міжнародна науково-практична конференція*. м. Вінниця. 2018.
16. Копинець І. В. Зменшення термоокислювального старіння бітумів під час виробництва асфальтобетонних сумішей шляхом використання енергозберігаючих добавок на основі поверхнево-активних

речовин. *Модифікація бітумів та асфальтобетонів – ефективний напрямок підвищення довговічності автомобільних доріг. Науково-практичний семінар.* Київ. 2018.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

17. Золотарев В.А., Галкин А.В., Пыриг Я.И., Копинец И.В. Дистилляционные, окисленные битумы, битумы, модифицированные полимерами, и асфальтобетоны на их основе. *Автомобильные дороги и мосты*, № 2 (18), 2016.

18. Золотарев В.А., Копинец И.В. Сравнительное исследование окисленных и остаточных битумов в статическом и динамическом режимах старения. *Дороги и мосты*. 2017. № 35/1. С. 215 – 232.