

Анализ влияния вторичных полимеров на свойства полимер-модифицированного битума

Аязжан Сыздык^{1*}, Гайни Сейтенова¹, Екатерина Жакманова¹, Лязат Толымбекова¹

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; ayazhanka.syzdyk@gmail.com, gainiseitenova@gmail.com, ekaterina.zakmanova1998@gmail.com, tolymbekova_lb@enu.kz

*Корреспонденция: ayazhanka.syzdyk@gmail.com

Аннотация: В данной работе исследуется модификация битума вторичным полипропиленом с точки зрения химических взаимодействий, структурных изменений и улучшения эксплуатационных характеристик битумно-полимерной системы. Рассматриваются процессы растворения и диспергирования полимера в битумной матрице, а также влияние молекулярной структуры полипропилена на реологические, термические и механические свойства полученного композита.

Описаны ключевые стадии подготовки битумно-полимерных композиций, включая термостабилизацию, гомогенизацию, определение оптимального соотношения компонентов и методы их смешивания. Проведен анализ изменений физико-химических характеристик модифицированного битума: температуры размягчения и глубины проникновения иглы при 25°C.

Результаты исследования показали, что введение вторичного полипропилена способствует увеличению термостойкости, повышению вязкости и улучшению адгезионных свойств битума. Это позволяет расширить его применение в составе асфальтобетонных покрытий, улучшая их долговечность и устойчивость к климатическим факторам.

Дополнительно изучены различные концентрации полимерной добавки (от 2% до 6%) и их влияние на структурные изменения битумного вяжущего. Полученные данные свидетельствуют о том, что оптимальная концентрация полипропилена обеспечивает улучшенные эксплуатационные свойства, снижая пластическую деформацию и повышая механическую прочность.

Применение вторичного полипропилена позволяет не только повысить качество дорожных покрытий, но и решить проблему утилизации полимерных отходов, снижая нагрузку на окружающую среду. Это открывает перспективы для дальнейших исследований в области полимерной модификации битума и разработки более экологичных и долговечных асфальтобетонных материалов.

Дополнительно рассмотрены механизмы взаимодействия полипропилена с битумной матрицей, включая влияние молекулярной массы, степени кристалличности и термической стабильности полимера.

Цитирование: Сыздык, А., Сейтенова, Г., Жакманова, Е., Толымбекова, Л. (2025). Анализ влияния вторичных полимеров на свойства полимер-модифицированного битума. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География. Экология, 150(1), 66-81.

<https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-150-1-66-81>

Академический редактор:
Э.К. Копишев

Поступила: 04.02.2025
Исправлена: 28.02.2025
Принята: 10.03.2025
Опубликована: 31.03.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Проведен сравнительный анализ свойств битума, модифицированного различными видами вторичных полимеров, что позволило выявить наилучший вариант для применения в дорожном строительстве.

Ключевые слова: битум; вторичный полипропилен; полимерные добавки; полимерно-битумные вяжущие материалы; модификация.

1. Введение

Развитие дорожного строительства требует создания материалов с улучшенными физико-химическими характеристиками, обеспечивающими их долговечность и устойчивость к внешним воздействиям. Одним из перспективных направлений является модификация битумов вторичными полимерами, в частности, полипропиленом. Данный процесс сопровождается сложными химическими и коллоидными взаимодействиями, включая диспергирование, растворение полимерных макромолекул в битумной матрице и формирование структурированной гетерогенной системы. Введение полипропилена способствует повышению термостабильности, когезионной прочности и эластичности битума за счет образования пространственно-сетчатых структур и изменения фазового состояния вяжущего.

В рамках исследования проведен анализ химических и термодинамических аспектов взаимодействия вторичного полипропилена с битумом. Разработана технология получения битумно-полимерных композиций с оптимальным распределением фаз. Изучено влияние полимерной модификации на реологические и физико-химические свойства полимерно-битумных вяжущих. Проведена оценка структурных изменений и стабильности асфальтобетонных композиций, содержащих модифицированный битум, при воздействии температурных и механических факторов (Dalhat and Al-Adham, 2023; Ishag Obi et al., 2022; Joohari and Giustozzi, 2020; Karmakar and Roy, 2020; Lee et al., 2023; Yang et al., 2024).

Данное исследование направлено на поиск новых подходов к химической модификации битума с использованием вторичных полимеров, что позволит не только повысить эксплуатационные характеристики дорожных покрытий, но и сократить объем пластиковых отходов, вовлекая их в технологический цикл.

В результате данного исследования были получены данные о механизме взаимодействия вторичного полипропилена с битумной матрицей, выявлены закономерности изменения его физико-химических свойств, а также установлены оптимальные условия модификации, обеспечивающие повышение температуры размягчения, снижение пластической деформации и улучшение когезионно-адгезионных характеристик битумного вяжущего.

Интенсивное воздействие окружающей среды, включая перепады температур в летний и зимний период, а также деформации под нагрузкой, негативно сказывается на состоянии дорожных покрытий. Это приводит к их преждевременному износу и сокращению срока эксплуатации (Maharaj et al., 2018; Mazurek et al., 2022; Sarang et al., 2016).

Битум (также известный как асфальтовое вяжущее) представляет собой побочный продукт переработки нефти, образующийся в процессе перегонки сырой нефти. Благодаря своим ценным свойствам, таким, как долговечность, высокая адгезия и водонепроницаемость, он нашел широкое применение в дорожном строительстве. Он широко известен как технический материал, получаемый в результате фракционной перегонки сырой нефти. Его химический состав сложен и вариативен, однако обычно выделяют четыре основные фракции: ароматические углеводороды, асфальтены, смолы и насыщенные соединения (García-Morales et al., 2004; Hossain et al., 2019; Syrmanova et al., 2017; Tahmoorian et al., 2018).

Для модификации битума наиболее часто применяются полимеры, среди которых около 75% составляют эластомеры, 15% – пластомеры, а 10% – измельченная резина от автомобильных покрышек и других материалов (Khan et al., 2016).

Как первичные, так и переработанные полимеры активно используются для модификации битума. Исследования по применению переработанных пластиков в битумной промышленности значительно увеличились за последнее десятилетие, что связано с усилиями многих стран по решению проблемы отходов, таких, как утилизация, экологические и медицинские последствия пластиковых отходов (García-Morales et al., 2004). Утилизация пластиковых отходов становится одной из самых актуальных глобальных проблем из-за роста потребления пластика. Воздействие на окружающую среду включает уничтожение естественных сред обитания для диких животных, угрозу проглатывания, а также перенос микроорганизмов с помощью пластика в экосистему (Hossain et al., 2019). Проблемы со здоровьем затрагивают кровеносную, дыхательную и лимфатическую системы, что может привести к отложению токсичных веществ в почках, кишечнике и печени. Для минимизации экологических и медицинских последствий этих отходов и улучшения характеристик битума сегодня активно изучается использование переработанных пластиковых полимеров в дорожном строительстве (Tahmoogian et al., 2018).

Следует отметить, что исследования отходов пластика в битуме начались примерно 20 лет назад, хотя до недавнего времени они не привлекали особого внимания, поскольку правительства активно инвестируют в переработку и зеленые технологии (Wang et al., 2018).

Полимеры, применяемые для модификации битума, делятся на три категории в зависимости от их химической структуры и свойств: пластомеры, эластомеры и химически функционализованные термопласты (Brasileiro et al., 2019). Несмотря на то, что полимерные модификаторы увеличивают термическую устойчивость битума, каждый вид полимера влияет на его свойства по-своему (García-Travé et al., 2016). В данной работе мы рассматриваем поливинилхлорид (ПВХ), который составляет около 10,1% европейского производства пластика. Он обычно используется для изготовления профилей, кабельной изоляции, садовых шлангов и оконных рам. В некоторых исследованиях ПВХ тестировался как полимерная модификация битума, хотя они не смогли получить успешных результатов из-за высокой температуры плавления полимера (Behl et al., 2014).

Условия смешивания для модификации битума ПВХ включали температуру в пределах 140–190°C, время смешивания от 20 минут до 3 часов, размер частиц от 0,075 до 2 мм, концентрацию ПВХ от 1 до 20% от массы битума и скорость смешивания в диапазоне 1300–3750 об/мин (Dalhat and Al-Abdul Wahhab, 2017). Также известен полипропилен (ПП), на долю которого в настоящее время приходится 21% мирового производства пластика и 19,1% европейского производства пластика (“Plastics-the Facts 2016 An analysis of European plastics production, demand and waste data,” n.d.). Он обычно используется в автомобильных деталях, контейнерах, устойчивых к воздействию микроволновых печей, пищевой упаковке и трубах. ПП представляет собой термопластичный линейный углеводород с промежуточным уровнем кристалличности между HDPE и LDPE (Geyer et al., 2017).

Было обнаружено, что включение ПП в битум значительно изменяет свойства битума, модифицированного ПП. Модификация связующего ПП привела к повышению температуры размягчения при снижении значения пенетрации. Как упоминалось ранее, наиболее часто используемые концентрации ПП составляют 3–5%; наблюдалось снижение значения пенетрации между 18 и 30% для 3% ПП и между 38 и 50% для 5% ПП (Behnood and Modiri Gharehveran, 2019). Хотя в целом наблюдается отсутствие исследований, посвященных усталостным характеристикам асфальтовых смесей, модифицированных ПП, было доказано, что ПП является достаточно хорошим полимером – как в его первичной, так и в отходной форме - для модификации битума (Al-Abdul Wahhab et al., 2017).

Современное дорожное строительство требует повышения качества и долговечности асфальтобетонных покрытий, способных выдерживать климатические воздействия, высокие

нагрузки и интенсивную эксплуатацию. Битум, используемый в дорожном строительстве, обладает ограниченной термостойкостью и сопротивляемостью деформациям, что делает его модификацию актуальной задачей.

Использование вторичного полипропилена для модификации битума решает сразу несколько проблем: улучшение эксплуатационных характеристик асфальтобетона, снижение экологической нагрузки за счет переработки полимерных отходов и повышение экономической эффективности. Однако исследования влияния вторичных полимеров на свойства битума и асфальтобетонных покрытий все еще ограничены, а методы модификации требуют унификации и дальнейшего изучения. Эти аспекты делают исследование, направленное на разработку и внедрение битумно-полимерных вяжущих, актуальным как с научной, так и с практической точек зрения.

2. Материалы и методы

Для определения глубины проникания иглы при температуре 25°C (не менее 0,1 мм) проводились испытания в соответствии с СТ РК 1226–2003 с использованием автоматического цифрового пенетromетра Infracore модели 20–20670.

Для определения температуры размягчения по методу кольца и шара (°C, не ниже) был использован автоматизированный прибор Infracore, соответствующий стандарту СТ РК 1227–2003.

ИК-Фурье спектроскопия (FTIR) применялась для идентификации функциональных групп в составе исследуемых образцов. Спектры были получены с использованием спектрометра IRTracer-100 SHIMADZU в диапазоне 4000–400 см⁻¹ с разрешением 4 см⁻¹. Образцы полимеров (вторичный полипропилен, полипропиленовый мешок, пупырчатая пленка) анализировались в виде тонкой пленки с целью выявления характерных полос поглощения. Основное внимание уделялось идентификации колебаний C–H, C=O и других функциональных групп, указывающих на возможные структурные изменения в материале после модификации битума.

Для проведения исследований использовались следующие материалы:

1. Битум марки БНД 100/130, предоставленный ТОО «Павлодарский нефтехимический завод» (Казахстан), характеризуется высокой вязкостью и активно применяется в производстве дорожных покрытий. Данный битум обладает свойствами, обеспечивающими его эффективность в различных климатических условиях (таблица 1).

Таблица 1. Физико-химическая характеристика дорожного битума 100/130

Наименование показателя, единица измерения	Результаты
Пенетрация (25°C, 100 г, 5 сек, 0,1 мм)	111
Температура размягчения по КиШ (°C)	46
Растяжимость при 25°C, см	121
Температура хрупкости по Фраасу, °C	-26
Растворимость, °C	99,9
Содержание парафина, %	1
Изменение массы после нагрева, %	0,1
Изменение температуры размягчения, °C	5

2. Вторичный полипропилен, предоставленный ТОО «Компания Нефтехим LTD», представляет собой термопластичный материал на основе пропилена, переработанный из полимерных отходов (рисунок 1, таблица 2).

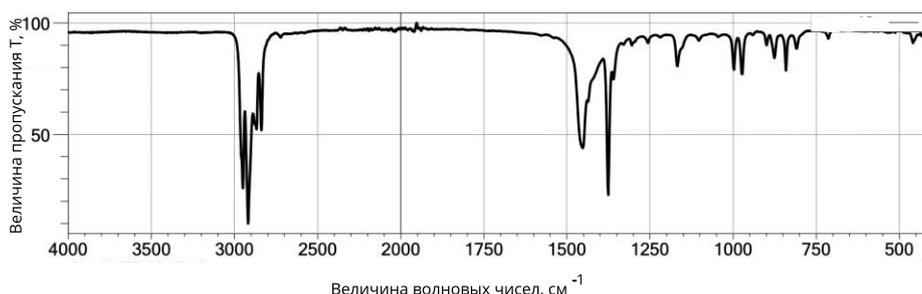


Рисунок 1. ИК-спектр поглощения вторичного полипропилена

Спектр показывает четкие полосы поглощения, характерные для различных типов полимеров, включая изотактический полипропилен (PP), сополимеры полиэтилена и пропилена (PE-PP) и другие сополимеры.

Таблица 2. Физико-химическая характеристика вторичного полипропилена

Наименование показателя, единица измерения	Результаты
Показатель текучести расплава, г/10 мин; груз 2,16 кг; фильера Ø 2,09 мм	5,50
Модуль упругости при растяжении, МПа	1480
Предел текучести при растяжении, МПа	31,30
Относительное удлинение при пределе текучести, %	9,8
Ударная вязкость по Изоду с надрезом, кДж/м ²	5,6
Модуль упругости при изгибе, МПа	1160
Массовая доля золы, %	2,65

Полосы поглощения в диапазоне 2950-2850 см⁻¹ соответствуют колебаниям С-Н связей, характерным для алкильных групп (-CH₂- и -CH₃), что свидетельствует о наличии углеводородной основы, типичной для полипропилена и полиэтилена. В области 1700–1600 см⁻¹ наблюдаются возможные полосы поглощения карбонильных групп (C=O), что может указывать на присутствие добавок или окисленных компонентов в смеси. Деформационные колебания метильных (-CH₃) и метиленовых (-CH₂-) групп проявляются в интервале 1450–1350 см⁻¹, являясь типичными сигналами для полиолефинов, включая полипропилен. Колебания связей С-О и С-С фиксируются в диапазоне 1170–1000 см⁻¹, что подтверждает наличие сополимеров или модифицированных полимерных структур. В области 900–800 см⁻¹ регистрируются характерные полосы, свидетельствующие о присутствии изотактического полипропилена в образце.

3. Полипропиленовый мешок (PP-мешок) – упаковочный материал, изготовленный из полипропилена. Обладает высокой механической прочностью и устойчивостью к влаге, широко используется для хранения и транспортировки сыпучих материалов (рисунок 2). В исследовании используется в качестве модифицирующей добавки к битуму.

Основными компонентами, выявленными в образце, являются полипропилен (изотактическая и атактическая формы) и полиэтиленовые компоненты, что подтверждается характерными полосами в области 800–1400 см⁻¹.

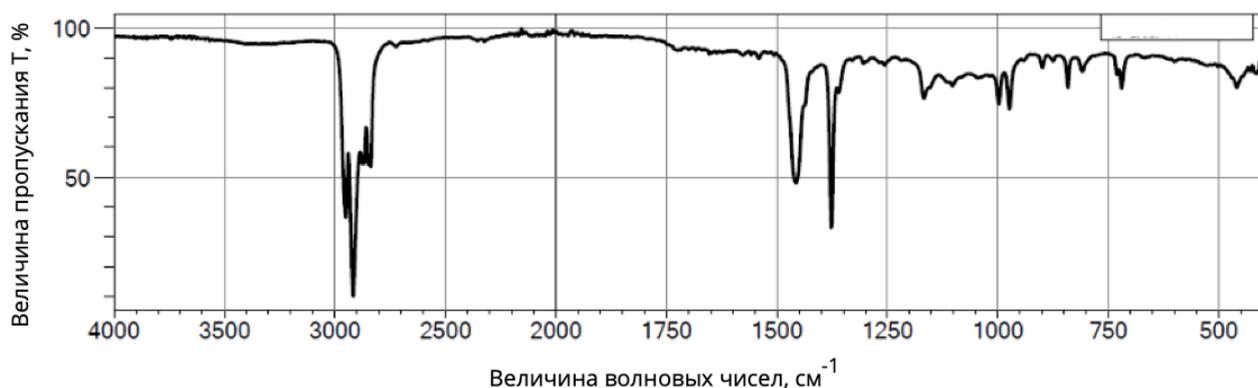


Рисунок 2. ИК-спектр поглощения полипропиленового мешка

4. Пупырчатая пленка (PE-пленка) – упаковочный материал из полиэтилена с воздушными пузырьками, обеспечивающий амортизационные свойства. Обладает высокой гибкостью, устойчивостью к влаге и химическим воздействиям. В исследовании применяется в качестве альтернативного модификатора битума.

На основе спектра идентифицированы основные компоненты образца (рисунок 3). Характерные полосы поглощения в диапазонах 2950–2850 см^{-1} , соответствующие симметричным и асимметричным колебаниям связей С-Н в алкильных группах, подтверждают наличие длинноцепочечных углеводородов. Обнаружены низко- и высокоплотный полиэтилен (LDPE, HDPE), что свидетельствует о смешанном составе материала, обеспечивающем механическую прочность и гибкость. Полосы поглощения в районе 1460–1370 см^{-1} подтверждают присутствие сополимеров этилена и пропилена (PE-PP), что может улучшать стойкость к нагрузкам и долговечность. Сильные полосы поглощения в диапазоне 1370–720 см^{-1} указывают на наличие микрокристаллических восков и парафинов, присутствие которых способствует улучшению гидрофобных свойств и термостойкости. Небольшие сигналы в районе 1700 см^{-1} могут свидетельствовать о наличии окисленных компонентов или стабилизаторов.

Спектральные данные подтверждают пригодность смеси для применения в полимерно-битумных композициях, обеспечивающих высокую устойчивость к климатическим и механическим нагрузкам.

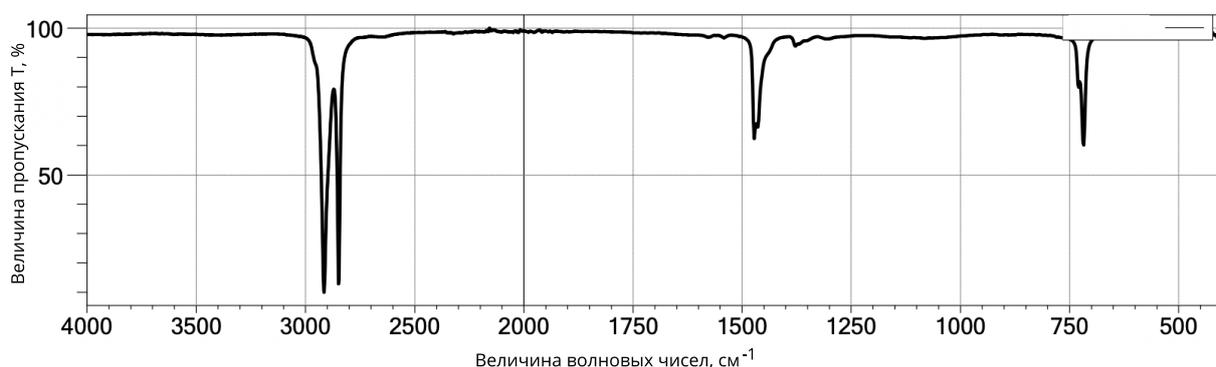


Рисунок 3. ИК-спектр поглощения пупырчатой пленки

3. Результаты

Технологический процесс производства полимерно-модифицированного битума (ПМБ) включает несколько последовательных стадий (рисунок 4). На первом этапе осуществляется подготовка битума, включающая его разогрев до рабочей температуры. Далее битум

нагревают до установленного температурного режима, обеспечивающего оптимальные условия для растворения и диспергирования полимерного модификатора. При достижении температуры 150°C вводят гранулированный полимерный модификатор. Процесс модификации осуществляется при интенсивном перемешивании в течение 120 минут, что необходимо для обеспечения равномерного распределения полимерной фазы в битумной матрице. После завершения процесса смешивания формируется полимерно-модифицированная битумная композиция, обладающая улучшенными эксплуатационными характеристиками.



Рисунок 4. Схема процесса получения полимерно-модифицированного битума с использованием полимерных отходов

Состав исследуемой полимер-модифицированной битумной (ПБВ) смеси включает битум марки БНД 100/130 и вторичный полипропилен в концентрациях от 2% до 6% (2%, 2.5%, 3%, 4%, 5%, 6%). В качестве альтернативных модификаторов использовались полипропиленовый мешок и пупырчатая пленка (таблица 3).

Таблица 3. Состав образцов ПБВ смеси

Битум БНД 100/130 (ПНХЗ)	98%	97,5%	97%	96%	95%	94%
Вторичный полипропилен	2%	2,5%	3%	4%	5%	6%

Битум БНД 100/130 (ПНХЗ)	97%	96%	95%
Полипропиленовый мешок (РР-мешок)	3%	4%	5%

Битум БНД 100/130 (ПНХЗ)	97%	96%	95%
Пупырчатая пленка (РЕ-пленка)	3%	4%	5%

Для оценки термической стабильности модифицированных битумных композиций была проведена проверка температуры размягчения по методу КиШ. Полученные результаты показали, что температура размягчения увеличивается с увеличением концентрации вторичного полипропилена в смеси. Так, при концентрации полипропилена 2% температура размягчения составила 59,7°C, в то время как при концентрации 6% - 71,8°C (рисунок 5).

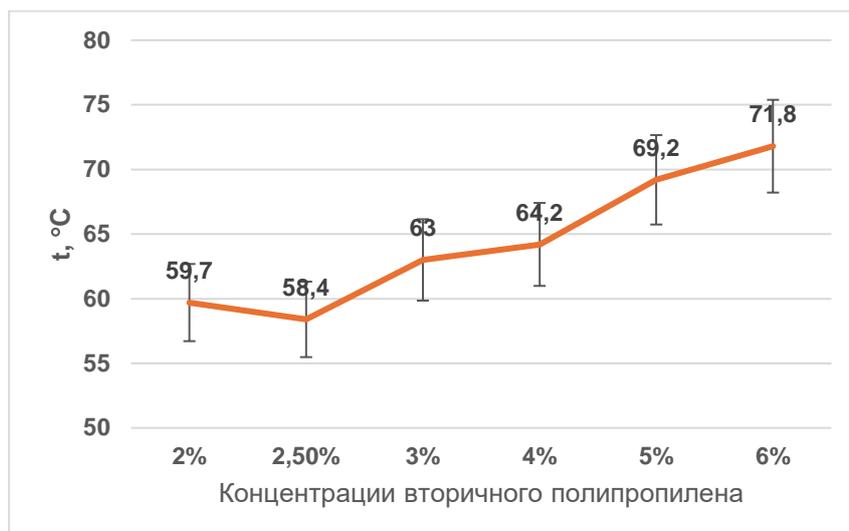


Рисунок 5. Зависимость температуры размягчения от концентрации вторичного полипропилена в битумной смеси

Это свидетельствует о том, что добавление полипропилена в битум значительно повышает его термическую устойчивость, что особенно важно для эксплуатации материалов в условиях высоких температур. Увеличение температуры размягчения на 12,1°C (с 59,7°C до 71,8°C) при добавлении полипропилена в концентрации 6% указывает на улучшение вязкости и жесткости материала, что может способствовать улучшению долговечности и эксплуатационных характеристик покрытия.

Показатели глубины проникновения иглы при 25°C для полимер-модифицированных битумных смесей показывают, что с увеличением концентрации вторичного полипропилена в смеси наблюдается тенденция к снижению глубины проникновения иглы. Это свидетельствует о повышении вязкости и уменьшении текучести материала, что является характерным для более жестких битумных смесей (рисунок 6).

Наибольшая глубина проникновения была зафиксирована при 2,5 % полипропилена, составившая 51,2 мм. Однако уже при концентрации 3% наблюдается значительное снижение глубины проникновения до 41,3 мм, что подтверждает улучшение эксплуатационных характеристик материала. С увеличением содержания полипропилена до 6%, глубина проникновения продолжает уменьшаться, достигнув значения 31,9 мм, что свидетельствует о дальнейшем повышении жесткости смеси и улучшении её устойчивости к механическим повреждениям.

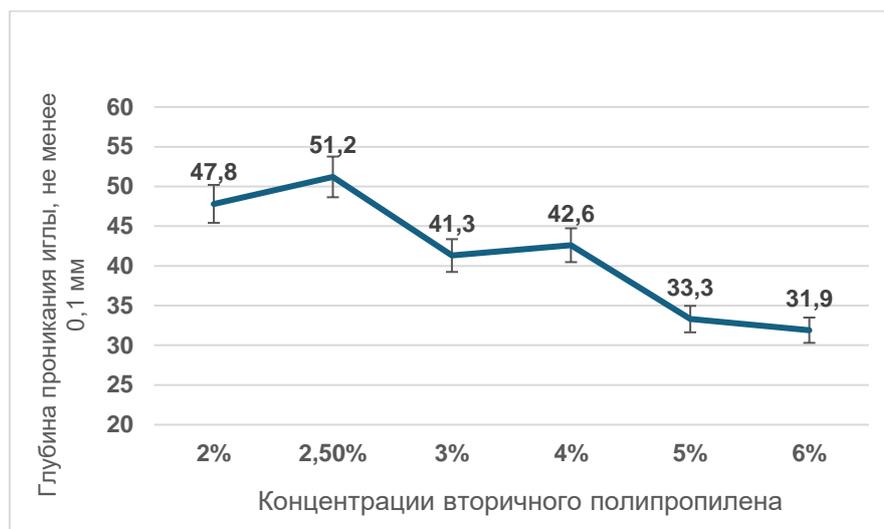


Рисунок 6. Зависимость глубины проникновения иглы при 25°C от концентрации вторичного полипропилена в битумной смеси

Таким образом, добавление вторичного полипропилена в битум значительно улучшает его характеристики, делая материал более стойким к деформациям, что особенно важно для использования в условиях повышенных нагрузок и высоких температур. Оптимальные результаты по снижению глубины проникновения были достигнуты при концентрации полипропилена в 4%, что может быть рекомендовано для улучшения долговечности битумных покрытий.

При исследовании смеси мешковины и битума по ключевым эксплуатационным показателям, таким, как глубина проникновения иглы при 25°C и температура размягчения по КиШ, были получены следующие результаты: температура размягчения для концентраций мешковины 3%, 4% и 5% составила 68,4°C, 69,4°C и 68,1°C соответственно, а глубина проникновения иглы при 25°C – 32,9 мм, 29,9 мм и 32,1 мм.

Эти результаты демонстрируют интересные особенности в поведении смеси с мешковиной. В частности, температура размягчения не проявляет значительных изменений в пределах исследованных концентраций. Все результаты остаются в близких диапазонах (около 68°C), что указывает на то, что добавление мешковины оказывает лишь незначительное влияние на термическую стабильность битума. Это может свидетельствовать о том, что мешковина не способна значительно улучшить термостойкость материала, как это ожидалось.

Что касается глубины проникновения иглы, то для всех концентраций мешковины наблюдается схожая картина (рисунок 7). В частности, при 4% концентрации глубина проникновения достигает 29,9 мм, что является наименьшим значением среди исследованных, но в целом данные остаются довольно высокими по сравнению с другими видами модификаторов. Это подтверждает, что смесь с мешковиной остается достаточно текучей и не приобретает той жесткости и вязкости, которые обычно ожидаются от полимерных добавок в битум.

Отсутствие резких изменений в результатах (например, пиков на графиках) может свидетельствовать о равномерном, но слабовыраженном влиянии мешковины на свойства смеси, что указывает на её ограниченную эффективность как модификатора. Это может быть связано с тем, что мешковина, будучи менее активным материалом, не взаимодействует с битумом так эффективно, как более специализированные полимеры. Визуальная стабилизация параметров также подтверждает, что модификация битума мешковиной не вызывает значительных улучшений в его эксплуатационных характеристиках.

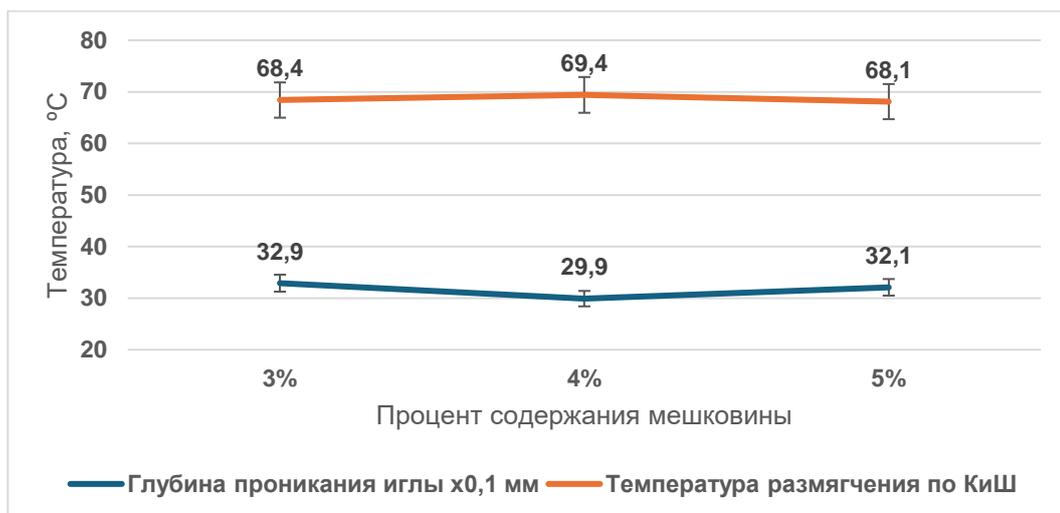


Рисунок 7. Зависимость температуры размягчения и глубины проникновения иглы от концентрации мешковины в битумной смеси

Таким образом, результаты показывают, что добавление мешковины в битум повышает его вязкость и термическую стабильность, но в меньшей степени по сравнению с более активными модификаторами, и не приводит к значительным улучшениям свойств смеси.

Результаты испытаний смеси битума с пупырчатой пленкой демонстрируют следующие значения: температура размягчения составляет 65,4°C, 69,4°C и 71°C при 3%, 4% и 5% содержании пленки соответственно, а глубина проникновения иглы при 25°C – 34,9 мм, 50,6 мм и 48,32 мм для тех же концентраций (рисунок 8).

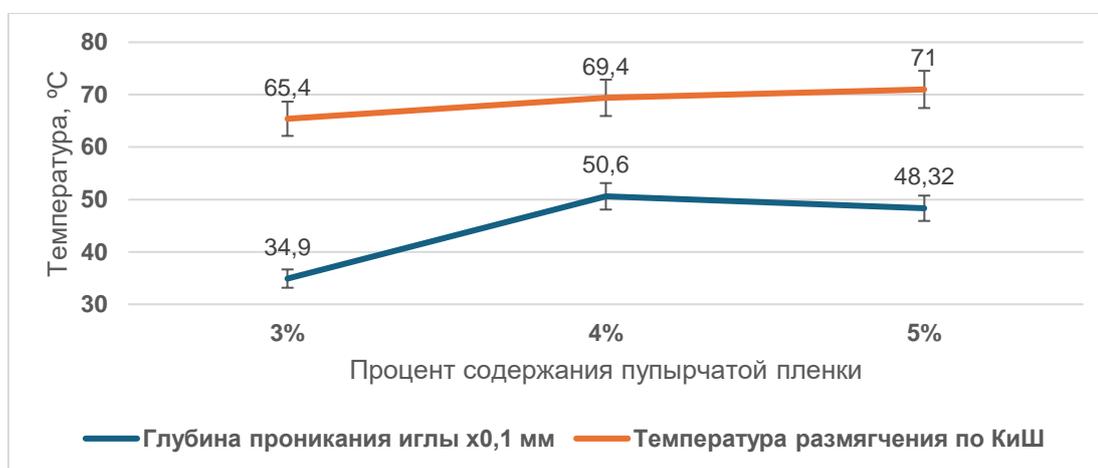


Рисунок 8. Влияние содержания пупырчатой пленки на температуру размягчения и глубину проникновения иглы

Сравнивая эти данные с результатами для смеси с мешковиной, можно отметить несколько важных различий. Во-первых, температура размягчения при использовании пупырчатой пленки показывает незначительное увеличение с ростом концентрации, однако в целом остается на уровне, сопоставимом с мешковиной. При 4% обе смеси демонстрируют одинаковое значение 69,4°C, но при 5% смесь с пупырчатой пленкой имеет более высокую температуру размягчения (71°C против 68,1°C у мешковины), что может свидетельствовать о лучшем структурировании битума при данной концентрации.

Однако глубина проникновения иглы показывает иную тенденцию. В случае с пупырчатой пленкой значения выше, особенно при 4% концентрации (50,6 мм), что указывает на большую пластичность смеси по сравнению с мешковиной. В свою очередь, битумная смесь с мешковиной демонстрировала меньшую глубину проникновения (29,9 мм при 4%), что говорит о большей жесткости и устойчивости материала.

Таким образом, несмотря на небольшое повышение температуры размягчения при 5% пупырчатой пленки, в целом модификация битума этим материалом приводит к более мягкой и менее устойчивой структуре по сравнению с мешковиной. Это может быть связано с тем, что пупырчатая пленка, будучи изготовленной из полиэтилена, обладает иной химической природой и взаимодействует с битумом слабее, чем полипропиленовая мешковина. В результате смесь с пупырчатой пленкой сохраняет более высокую пластичность, но при этом уступает по показателям жесткости и прочности, что может ограничивать её применение в условиях высоких нагрузок.

4. Обсуждение

Результаты показали, что вторичный полипропилен является наиболее эффективным модификатором среди исследованных материалов, так как он значительно повышает термостойкость и механическую прочность битумной смеси. Полипропиленовая мешковина обладает схожими, но менее выраженными характеристиками, тогда как пупырчатая полиэтиленовая пленка не дает значительного улучшения свойств битума.

Вторичный полипропилен оказывает наиболее выраженное влияние на свойства битума, повышая температуру размягчения до 71,8°C и снижая глубину проникновения иглы, что делает материал более жестким и устойчивым к нагрузкам.

Полипропиленовая мешковина также улучшает эксплуатационные характеристики битума, однако в меньшей степени по сравнению с чистым полипропиленом. Температура размягчения достигает 69,4°C, а глубина проникновения иглы уменьшается, но не столь значительно.

Пупырчатая полиэтиленовая пленка приводит к увеличению температуры размягчения, но её влияние на глубину проникновения иглы нестабильно. Это свидетельствует о слабом структурном взаимодействии полиэтилена с битумом и снижении вязкости материала.

Во вторичном полипропилене основным компонентом является комбинация PE и PP с минимальными добавками. Подходит для базовых композитных материалов благодаря высокой устойчивости к механическим нагрузкам.

Полипропиленовая мешковина содержит сополимеры PE и PP с функциональными добавками, что обеспечивает хорошую механическую прочность и устойчивость к износу. Подходит для полимерно-битумных вяжущих.

Пупырчатая полиэтиленовая пленка включает PE, парафины и микрокристаллические воски, обеспечивающие высокую гидрофобность и гибкость, но с ограниченной износостойкостью. Подходит для защитных покрытий и влагозащитных барьеров.

Для полимерно-битумных вяжущих оптимально использовать вторичный полипропилен, где наблюдаются устойчивые механические и термохимические свойства (Brasileiro et al., 2019; Celauro et al., 2020; Nizamuddin et al., 2021).

На основе полученных данных можно сделать вывод, что наиболее эффективным модификатором является вторичный полипропилен, который обеспечивает наилучшие показатели термостойкости и механической прочности.

5. Заключение

Результаты исследования подтверждают возможность использования вторичных полимерных отходов в качестве модификаторов битума, что обусловлено их химической природой и способностью к взаимодействию с битумной матрицей. Введение вторичного полипропилена приводит к формированию гомогенной битумно-полимерной структуры за

счет частичного растворения и набухания полимерных цепей в дисперсионной среде битума. Это сопровождается увеличением температуры размягчения и снижением глубины проникновения иглы, что указывает на повышение когезионных свойств модифицированного вяжущего.

Наибольшую эффективность продемонстрировал вторичный полипропилен, обладающий высокой степенью совместимости с битумом благодаря его молекулярной массе и химическому составу. Полипропиленовая мешковина показала аналогичные, но менее выраженные результаты, что может быть связано с различиями в молекулярной организации и степени кристалличности материала. В отличие от полипропиленовых отходов, пупырчатая полиэтиленовая пленка не обеспечила значительных улучшений эксплуатационных характеристик битума, что обусловлено слабым химическим взаимодействием между полярными компонентами битума и неполярными полиэтиленовыми макромолекулами.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются детальный анализ молекулярных и термодинамических аспектов взаимодействия полимеров с битумной матрицей, а также разработка комплексных составов, включающих поверхностно-активные вещества, пластификаторы и химические активаторы, способствующих улучшению диспергирования полимеров и повышению их совместимости с битумом.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Концептуализация, ресурсы, администрирование проекта; методология, получение финансирования, Г.С.; валидация, формальный анализ, исследование; написание – подготовка оригинального черновика, А.С.; редактирование, руководство, Л.Т.; визуализация, Е.Ж.

8. Информация об авторах

Сыздык Аяжан Галымкызы – магистрантка 2-го курса, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; ayazhanka.syzdyk@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-4435-0976>

Сейтенова Гайни Жумагалиевна – кандидат химических наук, ассоциированный профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; gainiseitenova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6202-3951>

Жакманова Екатерина Андреевна – докторант 3 курса, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; Ekaterina.zakmanova1998@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0545-5912>

Толымбекова Лязат Байгабыловна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Химия», факультет естественных наук, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, 010000; tolyzbekova_lb@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-3785-7943>

9. Финансирование: Данное исследование финансируется в рамках программно-целевого финансирования Комитетом по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № «BR24992883 Создание научно-технологического парка нефтехимии и полимерных материалов для предоставления услуг и внедрения прикладных результатов НИР в приоритетные сектора экономики страны»).

10. Благодарности: Авторы выражают благодарность ОЮЛ «Ассоциация производителей и потребителей нефтегазохимической продукции (Нефтегазохимическая Ассоциация)» за поддержку и содействие в проведении данного исследования.

11. Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

12. Список литературы

1. Al-Abdul Wahhab, H. I., Dalhat, M. A., & Habib, M. A. (2017). Storage stability and high-temperature performance of asphalt binder modified with recycled plastic. *Road Materials and Pavement Design*, 18(sup1), 1117–1134. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1207554>
2. Behl, A., Sharma, G., & Kumar, G. (2014). A sustainable approach: Utilization of waste PVC in asphaltting of roads. *Construction and Building Materials*, 54, 113–117. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.12.050>
3. Behnood, A., Modiri Gharehveran, M. (2019). Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders. *European Polymer Journal*, 112, 766–791. <https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2018.10.049>
4. Brasileiro, L., Moreno-Navarro, F., Tauste-Martínez, R., Matos, J., & Rubio-Gámez, M. del C. (2019). Reclaimed polymers as asphalt binder modifiers for more sustainable roads: A review. *Sustainability*, 11(3), 646. <https://doi.org/10.3390/SU11030646>
5. Celauro, C., Saroufim, E., Mistretta, M. C., & La Mantia, F. P. (2020). Influence of short-term aging on mechanical properties and morphology of polymer-modified bitumen with recycled plastics from waste materials. *Polymers*, 12(9), 1985. <https://doi.org/10.3390/POLYM12091985>
6. Dalhat, M. A., & Al-Abdul Wahhab, H. I. (2017). Performance of recycled plastic waste modified asphalt binder in Saudi Arabia. *International Journal of Pavement Engineering*, 18(4), 349–357. <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1088150>
7. Dalhat, M. A., & Al-Adham, K. (2023). Review on laboratory preparation processes of polymer-modified asphalt binder. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 10(2), 159–184. <https://doi.org/10.1016/J.JTTE.2023.01.002>
8. García-Morales, M., Partal, P., Navarro, F. J., Martínez-Boza, F., Gallegos, C., González, N., González, O., & Muñoz, M. E. (2004). Viscous properties and microstructure of recycled EVA-modified bitumen. *Fuel*, 83(1), 31–38. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00217-5](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00217-5)
9. García-Travé, G., Tauste, R., Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., & Rubio-Gámez, M. C. (2016). Use of reclaimed geomembranes for modification of mechanical performance of bituminous binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(7), 04016021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001507](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001507)
10. Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782/suppl_file/1700782_sm.pdf
11. Hossain, N., Zaini, J., Mahlia, T. M. I., & Azad, A. K. (2019). Elemental, morphological and thermal analysis of mixed microalgae species from drain water. *Renewable Energy*, 131, 617–624. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2018.07.082>
12. Ishag Obi, N., Najib Razali, M., & Hamid Nour, A. (2022). The potentials of emulsified modified bitumen (EMB) for coating and insulation: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 57, 1288–1295. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.11.598>
13. Joohari, I. B., & Giustozzi, F. (2020). Chemical and high-temperature rheological properties of recycled plastics-polymer modified hybrid bitumen. *Journal of Cleaner Production*, 276, 123064. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.123064>
14. Karmakar, S., & Roy, T. K. (2020). Influence of plastic waste on chemical and mechanical properties of modified bitumen used in the bituminous mix for flexible pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(1), 04020440. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003545](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003545)

15. Khan, I. M., Kabir, S., Alhussain, M. A., & Almansoor, F. F. (2016). Asphalt design using recycled plastic and crumb-rubber waste for sustainable pavement construction. *Procedia Engineering*, 145, 1557–1564. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.04.196>
16. Lee, S., Park, Y. K., & Lee, J. (2023). Upcycling of plastic and tire waste toward use as modifier for asphalt binder. *Energy & Environment*, 35(4), 510–524. <https://doi.org/10.1177/0958305X231173999>
17. Maharaj, R., Maharaj, C., & Hosein, A. (2018). Performance of waste polymer modified road paving materials. *Journal of Elastomers & Plastics*, 34(1), 19–33. <https://doi.org/10.1177/147776061803400102>
18. Mazurek, G., Šrámek, J., & Buczyński, P. (2022). Composition optimisation of selected waste polymer-modified bitumen. *Materials*, 15(24), 8714. <https://doi.org/10.3390/MA15248714>
19. Nizamuddin, S., Boom, Y. J., & Giustozzi, F. (2021). Sustainable polymers from recycled waste plastics and their virgin counterparts as bitumen modifiers: A comprehensive review. *Polymers*, 13(19), 3242. <https://doi.org/10.3390/POLYM13193242>
20. Plastics-the facts 2016: An analysis of European plastics production, demand and waste data. (n.d.).
21. Sarang, G., Lekha, B. M., Krishna, G., & Ravi Shankar, A. U. (2016). Comparison of stone matrix asphalt mixtures with polymer-modified bitumen and shredded waste plastics. *Road Materials and Pavement Design*, 17(4), 933–945. <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1124799>
22. Syrmanova, K. K., Botashev, E. T., Tleuov, D. B., Suleimenova, M. T., Eshankulov, A. A., & Kaldybekova, Z. B. (2017). Research of oil road bitumen modification with low density polyethylene. *Oriental Journal of Chemistry*, 33(1), 470–477. <https://doi.org/10.13005/OJC/330155>
23. Tahmoorian, F., Samali, B., & Yeaman, J. (2018). Evaluation of structural and thermal properties of rubber and HDPE for utilization as binder modifier. In *Modified Asphalt*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.75535>
24. Wang, J., Yuan, J., Xiao, F., Li, Z., Wang, J., & Xu, Z. (2018). Performance investigation and sustainability evaluation of multiple-polymer asphalt mixtures in airfield pavement. *Journal of Cleaner Production*, 189, 67–77. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.03.208>
25. Yang, Q., Lin, J., Wang, X., Wang, D., Xie, N., & Shi, X. (2024). A review of polymer-modified asphalt binder: Modification mechanisms and mechanical properties. *Cleaner Materials*, 12, 100255. <https://doi.org/10.1016/J.CLEMA.2024.100255>

Екіншілік полимерлердің полимер-модификацияланған битум қасиеттеріне әсерін талдау

Аяжан Сыздық, Гайни Сейтенова, Екатерина Жакманова, Лязат Толымбекова

Аңдатпа: Бұл жұмыста битумның екіншілік полипропиленмен модификациясы химиялық өзара әрекеттесу, құрылымдық өзгерістер және битум-полимер жүйесінің өнімділік сипаттамаларын жақсарту тұрғысынан қарастырылады. Битум матрицасында полимердің еру және дисперсия процестері, сонымен қатар полипропиленнің молекулалық құрылымының алынған композиттің реологиялық, жылу және механикалық қасиеттеріне әсері қарастырылады.

Битумды-полимерлі композицияларды дайындаудың негізгі кезеңдері, оның ішінде термиялық тұрақтандыру, гомогенизация, компоненттердің оңтайлы қатынасын анықтау және оларды араластыру әдістері сипатталған. Модификацияланған битумның физика-химиялық сипаттамаларының өзгеруіне талдау жүргізілді: жұмсарту температурасы және иненің ену тереңдігі 25°C.

Зерттеу нәтижелері қайталама полипропиленді енгізу ыстыққа төзімділікті арттыруға, тұтқырлықты арттыруға және битумның адгезиялық қасиеттерін жақсартуға көмектесетінін көрсетті. Бұл оны асфальтбетонды жабындарды кеңейтуге, олардың беріктігін және климаттық факторларға төзімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Сонымен қатар, полимерлі қоспаның әртүрлі концентрациясы (2%-дан 6%-ға дейін) және олардың битум байланыстырғыштың құрылымдық өзгерістеріне әсері зерттелді. Алынған деректер полипропиленнің оңтайлы концентрациясы пластикалық деформацияны азайту және механикалық беріктіктің жоғарылауы, жақсартылған өнімділік қасиеттерін қамтамасыз ететінін көрсетеді.

Екіншілік полипропиленді пайдалану жол төсемдерінің сапасын жақсартуға ғана емес, сонымен қатар полимер қалдықтарын қайта өңдеу мәселесін шешуге, қоршаған ортаға түсетін салмақты азайтуға мүмкіндік береді. Бұл битумды полимерлі түрлендіру саласында әрі қарай зерттеулер жүргізуге және анағұрлым экологиялық таза және берік асфальтбетон материалдарын әзірлеуге перспективалар ашады.

Сонымен қатар, полипропиленнің битум матрицасымен әрекеттесу механизмдері, соның ішінде молекулалық салмақтың, полимердің кристалдылық дәрежесінің және термиялық тұрақтылығының әсері қарастырылады. Әртүрлі типтегі қайталама полимерлермен модификацияланған битум қасиеттеріне салыстырмалы талдау жүргізілді, бұл жол құрылысында пайдаланудың ең жақсы нұсқасын анықтауға мүмкіндік берді.

Түйін сөздер: битум; екіншілік полипропилен; полимерлік қоспалар; полимер-битумды байланыстырғыш материалдар; модификация.

Analysis of the influence of secondary polymers on the properties of polymer-modified bitumen

Ayazhan Syzdyk, Gaini Seitenova, Ekaterina Zhakmanova, Lyazat Tolymbekova

Abstract: This paper examines the modification of bitumen with secondary polypropylene in terms of chemical interactions, structural changes, and improved performance of the bitumen-polymer system. The processes of polymer dissolution and dispersion in the bitumen matrix are considered, as well as the effect of the molecular structure of polypropylene on the rheological, thermal, and mechanical properties of the resulting composite.

The key stages of preparing bitumen-polymer compositions are described, including thermal stabilization, homogenization, determining the optimal ratio of components, and methods for mixing them. An analysis of changes in the physico-chemical characteristics of the modified bitumen is carried out: softening temperature and needle penetration depth at 25°C.

The results of the study showed that the introduction of secondary polypropylene helps to increase heat resistance, increase viscosity, and improve the adhesive properties of the bitumen. This allows for its expanded use in asphalt concrete pavements, improving their durability and resistance to climatic factors. Additionally, various concentrations of the polymer additive (from 2% to 6%) and their effect on structural changes in the bitumen binder were studied. The data obtained indicate that the optimal concentration of polypropylene provides improved performance properties, reducing plastic deformation and increasing mechanical strength.

The use of secondary polypropylene allows not only to improve the quality of road surfaces, but also to solve the problem of recycling polymer waste, reducing the burden on the environment. This opens up prospects for further research in the field of polymer modification of bitumen and the development of more environmentally friendly and durable asphaltic concrete materials.

In relation to this, the mechanisms of interaction between polypropylene and the bitumen matrix are considered, including the effect of molecular weight, degree of crystallinity and thermal stability of

the polymer. A comparative analysis of the properties of bitumen modified with various types of secondary polymers was carried out, which made it possible to identify the best option for use in road construction.

Keywords: bitumen; secondary polypropylene; polymer additives; polymer-bitumen binders; modification.