

УДК 625.7

DOI 10.52928/2070-1683-2025-42-3-20-27

ДЕФОРМАЦИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНОЙ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОЙ СМЕСИ НА КОМПОЗИЦИОННОМ БИОВЯЖУЩЕМ**А.А. АФАНАСЕНКО****ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1544-745X>****П.П. ЯЦЕВИЧ****(Белорусский национальный технический университет, филиал БНТУ
«Научно-исследовательский политехнический институт», Минск)**

В рамках решения актуальной задачи дорожного материаловедения по поиску альтернатив нефтяным вяжущим исследована деформационная устойчивость щебеночно-мастичной органоминеральной смеси на основе композиционного биовяжущего. Проблема применения многих известных биовяжущих заключается в их низкой теплостойкости, приводящей к снижению сопротивления пластическим деформациям. Для сравнительной оценки были изготовлены два состава с идентичной зерновой структурой, на нефтяном битуме и на разработанном композиционном биовяжущем. Испытания на сопротивление колееобразованию проводились по методике Т 0719-2011 (JTG E20-2011). Установлено, что применение композиционного биовяжущего позволяет снизить глубину колеи на 77,3% по сравнению с контрольным составом. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности разработанного вяжущего в повышении сопротивления пластическим деформациям и открывают перспективы для его применения в конструкциях дорожных одежд, работающих в условиях повышенных температур и интенсивных нагрузок.

Ключевые слова: композиционное биовяжущее, щебеночно-мастичный асфальтобетон (SMA), деформационная устойчивость, колееобразование, теплостойкость, динамическая стабильность (DS).

Введение. Интенсивное развитие дорожной сети является необходимым условием функционирования современной экономики. Однако традиционная технология производства асфальтобетона, основанная на применении нефтяных битумов, сопряжена с рядом проблем. К ним относятся зависимость от невозобновляемых углеводородных ресурсов, волатильность цен на энергоносители и значительная экологическая нагрузка, обусловленная как выбросами в процессе производства при высоких температурах, так и углеродным следом самого вяжущего.

В связи с этим одним из наиболее актуальных направлений в дорожном материаловедении является разработка и исследование биовяжущих – связующих материалов, получаемых из возобновляемого сырья растительного или животного происхождения [1]. Актуальность данного направления подтверждается анализом международных наукометрических баз данных: так, процентиль статей, посвященных применению биовяжущих, в базе Scopus превышает 99, что свидетельствует о высокой степени заинтересованности научного сообщества в решении этой задачи.

Подавляющее большинство исследователей направили свои усилия на биовяжущее из бионефтей, полученных в результате пиролиза различной биомассы [2–5; 8; 9]. Зачастую такие компоненты вводятся в состав традиционного битума в качестве частичной замены. Например, в работах [3, с. 520–521; 4, с. 6–7] рассматривается влияние биовяжущего из свиного навоза, которое, действуя как пластификатор, позволяет улучшить низкотемпературные свойства смеси. Подобный пластифицирующий эффект характерен и для растительных масел [5, с. 14; 6, с. 11–13; 7, с. 219–221], однако он имеет и обратную сторону, прогнозируемо приводит к снижению когезионной прочности вяжущего и, как следствие, ухудшению физико-механических свойств асфальтобетона при высоких положительных температурах. Это, в свою очередь, повышает риск интенсивного колееобразования [8, 159–163; 9, с. 585–589].

Для компенсации этого негативного эффекта многие исследователи прибегают к вторичной модификации. В работе [10] предпринята попытка предотвратить ухудшение высокотемпературных свойств путем дополнительного введения в систему органического монтмориллонита. В других исследованиях [11, с. 4; 12, с. 708–711] с этой же целью используют значительные количества синтетических полимеров. Такой подход, хотя и является предсказуемо эффективным с точки зрения улучшения реологии, значительно усложняет технологию и, что более важно, вводит в «зеленый» по своей концепции материал неэкологичные синтетические компоненты. Кроме того, остро встает вопрос термодинамической стабильности подобных сложных композитов. Актуальность проблемы совместимости компонентов подтверждается исландскими исследованиями [13, с. 135–138], где наблюдалось фазовое расслоение системы «битум-рапсовое масло», что приводило к миграции масла на поверхность минерального заполнителя и снижению адгезии.

Отдельным направлением является создание резиносодержащих битумов, модифицированных био-маслами [14]. Однако эффективность таких систем напрямую зависит от степени взаимодействия между компонентами. Без предварительной девулканизации резиновая крошка формирует в вяжущем лишь дисперсную фазу набухшей резины, не вступая в химическое взаимодействие с минеральными заполнителями. В то же время, как показывают исследования [15, с. 5–6], применение специальных агентов, например, гваяловой смолы, может инициировать процесс девулканизации и способствовать миграции компонентов резины в битум, обеспечивая создание более однородной и эффективной структуры.

Перспективным представляется использование лигнина [16; 17], который, являясь природным полимером, потенциально способен повысить сдвигустойчивость вяжущего. Тем не менее, его высокая температура размяг-

чения и ограниченная совместимость с битумом, как правило, не позволяют достичь более 30% степени замещения без риска ухудшения низкотемпературной трещиностойкости, и лишь применение вторичной модификации позволяет достичь более высоких степеней замещения [17, с. 7–12]. Вопрос стабильности таких систем при хранении и транспортировании также остается открытым.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что большинство исследований в области биовязущих сфокусировано на частичной замене нефтяного битума или на компенсаторной модификации биокомпонентов для улучшения их свойств. Ключевой проблемой остается падение сдвигустойчивости при высоких температурах, что вынуждает исследователей вводить в состав синтетические полимеры или другие дорогостоящие добавки, усложняя технологию и снижая экологические преимущества «зеленых» вяжущих. В противовес этому, системный подход, основанный на полной замене битума и изначальном проектировании композиционного биовязущего из нескольких растительных компонентов, где их свойства взаимно дополняют друг друга для достижения сбалансированных характеристик, остается менее изученным.

Цель и задачи исследования. Актуальность проблемы создания экологически безопасных и долговечных дорожных покрытий, выявленные в результате анализа литературы недостатки существующих биовязущих, а также недостаточная изученность системного подхода к их проектированию определили направление настоящего исследования.

Объектом исследования является щебеночно-мастичная органоминеральная смесь, приготовленная на основе разработанного композиционного биовязущего. Предметом исследования выступает ее деформационная устойчивость (сопротивление колееобразованию) при высоких температурах в сопоставлении с контрольным составом, приготовленным на стандартном полимерно-модифицированном битуме. Целью настоящей работы является установление влияния полной замены полимерно-модифицированного битума разработанным композиционным биовязущим на сдвигустойчивость щебеночно-мастичной органоминеральной смеси.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: произведена лабораторная оценка физико-механических свойств исходных материалов, минеральных заполнителей, контрольного полимерно-модифицированного вяжущего и экспериментального композиционного биовязущего; разработан и обоснован состав щебеночно-мастичной органоминеральной смеси, соответствующий асфальтобетону типа SMA-10; проведены сравнительные лабораторные испытания на колееобразование для смесей на контрольном и экспериментальном вяжущих; осуществлен анализ полученных данных; произведена оценка эффективности применения композиционного биовязущего и сформулированы научные и практические выводы.

Экспериментальная часть работы была выполнена на научно-технической базе компании «Гаююань» (Gaoyuan), город Синьсян, провинция Хэнань, КНР. Данное исследование стало возможным в рамках программы по обмену научно-техническим опытом, что позволило провести все исследования на современном испытательном оборудовании в строгом соответствии с передовой нормативной базой КНР в области дорожного строительства (JTG E20-2011¹, JTG F40-2004², JTG E42-2005³).

Материалы. Для приготовления органоминеральных смесей использовались минеральные материалы, отвечающие требованиям стандарта JTG F40⁴ для щебеночно-мастичного асфальтобетона, применяемого в качестве материала верхнего слоя дорожного покрытия с высокой интенсивностью движения. В качестве крупного и мелкого заполнителя применялся кубовидный щебень и отсев дробления из базальтовых горных пород. В качестве наполнителя использовался активированный известняковый порошок. Зерновой состав минеральных материалов представлен в таблице 1, физико-механические свойства приведены в таблице 2.

Таблица 1. – Зерновые составы минеральных материалов

Размер сит, мм	Щебень 5–10 мм, % прохода	Щебень 3–5 мм, % прохода	Отсев 0–3 мм, % прохода	Минеральный порошок, % прохода
13,2	100	100	100	100
9,5	87	100	100	100
4,75	10,8	31,9	97,2	100
2,36	1,6	0,1	65,8	100
1,18	1,2	0,1	47,7	100
0,6	1,1	0,1	31,5	100
0,3	1,1	0,1	20,6	100
0,15	1,1	0,1	14,9	98,0
0,075	1,0	0,1	12,5	92,0

¹ JTG E20-2011. Стандартные методы испытаний битума и битумных смесей для дорожного строительства = Standard Test Methods of Bitumen and Bituminous Mixtures for Highway Engineering = 公路工程沥青及沥青混合料试验规程. – Введ. 01.12.2011. – Пекин : Народные коммуникации, 2011. – 369 с. – Текст: кит., англ.

² JTG F40-2004. Технические условия на строительство асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог = Technical Specifications for Construction of Highway Asphalt Pavements = 公路沥青路面施工技术规范. – Введ. 01.10.2004. – Пекин : Народные коммуникации, 2004. – 168 с. – Текст: кит., англ.

³ JTG E42-2005. Методы испытаний заполнителей для дорожного строительства = Test Methods of Aggregate for Highway Engineering = 公路工程集料试验规程. – Введ. 01.06.2005. – Пекин : Народные коммуникации, 2005. – 285 с. – Текст: кит., англ.

⁴ См. сноску 2.

Таблица 2. – Физико-механические свойства минеральных материалов

Показатель	Испытано по JTГ E42 ⁵ , пункт	Требования по JTГ F40 ⁶	Фактическое значение
Щебень 5–10 мм			
Значение дробимости, %	T 0316	≤ 12	10,5
Истираемость (Лос-Анджелес), %	T 0317	≤ 20	18,2
Содержание зерен лещадной и игловатой формы, %	T 0312	≤ 15	9,5
Содержание частиц < 0,075 мм (отмывкой), %	T 0310	≤ 1,0	1,0
Щебень 3–5 мм			
Значение дробимости, %	T 0316	≤ 12	11,2
Содержание зерен лещадной и игловатой формы, %	T 0312	≤ 15	10,8
Содержание частиц < 0,075 мм (отмывкой), %	T 0310	≤ 1,0	0,1
Отсев дробления 0–3 мм			
Содержание глины в комках, %	T 0311	≤ 0,2	Отсутствует
Минеральный порошок (активированный)			
Пористость в сухом уплотненном состоянии, %	T 0326	≤ 35	31
Гидрофильный коэффициент	T 0327	< 1	0,8
Влажность, %	T 0103	≤ 1,0	0,4

Как следует из представленных данных, все использованные минеральные компоненты полностью соответствуют требованиям JTГ F40⁷ с существенным запасом по ключевым показателям. Незначительные и ожидаемые вариации в свойствах фракций 5–10 мм и 3–5 мм подтверждают стабильность технологического процесса их получения. Детальная оценка характеристик каждого компонента обеспечила высокую точность при проектировании суммарного зернового состава смеси, что позволило создать прочный минеральный каркас щебеночно-мастичной органоминеральной смеси.

В качестве контрольного вяжущего применялся полимерно-модифицированный битум китайского производства. Согласно национальной классификации КНР, изложенной в стандарте JTГ F40⁸, данное вяжущее соответствует классу I-D, который предназначен для строительства покрытий дорог с особо тяжелым движением в регионах с жарким климатом. Реологические и эксплуатационные свойства вяжущего, определенные согласно комплексу методик JTГ E20⁹, позволяют также классифицировать его по системе Superpave как PG 76-22, что подтверждает его высокую устойчивость к накоплению остаточных деформаций при высоких температурах. Основные физико-механические показатели вяжущего представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Свойства полимерно-модифицированного битумного вяжущего

Показатель	Испытано по JTГ E20 ¹⁰ , пункт	Требования по JTГ F40 ¹¹	Фактическое значение
Глубина проникания иглы при 25 °С, 0,1 мм	T 0604	40–60	55
Температура размягчения, °С	T 0606	≥ 75	78
Растяжимость при 5 °С, см	T 0605	≥ 30	42
Эластичность при 25 °С, %	T 0624	≥ 85	91
Динамическая вязкость при 135 °С, Па·с	T 0625	≤ 3,0	2,1
Показатели после старения в RTFOT			
Остаточная пенетрация, %	T 0610	≥ 70	76
Повышение температуры размягчения, °С	T 0610	≤ 5	3,5

Исходя из положения обеспечения свойств материала верхних слоев дорожного покрытия требуемой сдвигоустойчивостью (принят критерий минимизации образования пластических деформаций), был сформирован экспериментальный состав композиционного биовяжущего, состоящий из набора компонентов природного происхождения (масел, смол, природных полимерных составляющих). Для первичной оценки морфологии и пленкообразующей способности разработанного композиционного биовяжущего был подготовлен образец в виде тонкой пленки, нанесенной на стандартное предметное стекло (рисунок 1).

⁵ См. сноску 3.⁶ См. сноску 2.⁷ См. сноску 2.⁸ См. сноску 2.⁹ См. сноску 1.¹⁰ См. сноску 1.¹¹ См. сноску 2.



Рисунок 1. – Внешний вид пленки композиционного биовязущего на стеклянной подложке

Пленка вяжущего имеет характерный светло-коричневый оттенок, неравномерный по площади образца, что свидетельствует о гетерогенной, многокомпонентной природе композиции. Материал является полупрозрачным, что позволяет оценить его внутреннюю структуру и создавать из него органоминеральные смеси различной цветовой гаммы. Наиболее выраженной особенностью является наличие многочисленных сферических газовых включений (пузырьков) различного диаметра. Их присутствие может указывать на выделение летучих фракций или побочных газообразных продуктов в процессе термостатирования и полимеризации вяжущего. В нижней части образца наблюдаются локальные области помутнения белесого цвета, что может быть интерпретировано как частичная кристаллизация отдельных компонентов или фазовая сегрегация системы при охлаждении. Несмотря на структурную гетерогенность, вяжущее формирует сплошную пленку без разрывов и трещин. Края пленки имеют неровный характер, что типично для материалов, наносимых в вязко-текучем состоянии. Наблюдается хорошая адгезия к стеклянной подложке по всей площади контакта, отслоений не зафиксировано. В целом, визуальный анализ подтверждает сложный композиционный состав вяжущего и его способность к формированию сплошного адгезионно-прочного слоя.

Для объективной оценки эффективности использования предлагаемого композиционного биовязущего были запроектированы и приготовлены два состава щебеночно-мастичной органоминеральной смеси, соответствующие составу асфальтобетона типа SMA-10. Выбор данного типа обусловлен его широким применением для устройства верхних слоев на дорогах с высокой интенсивностью движения и тяжелыми нагрузками. Структура SMA с ее жестким каменным каркасом и высоким содержанием вяжущего позволяет наиболее полно оценить влияние свойств именно вяжущего на сдвигоустойчивость композита. Проектирование составов проводилось в соответствии с методологией объемного проектирования, регламентированной стандартом JTG F40¹². Ключевые проектные параметры смесей представлены на рисунке 2.

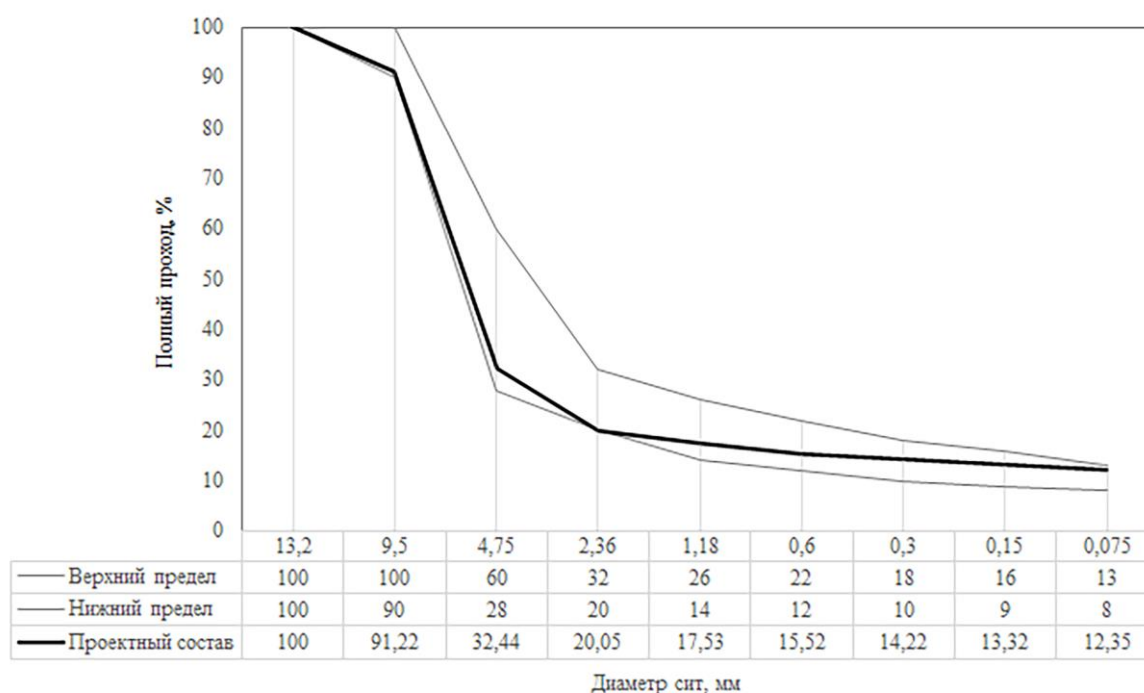


Рисунок 2. – Гранулометрический состав щебеночно-мастичной органоминеральной смеси

¹² См. сноску 2.

Таким образом, на основе исследования зернового состава минеральных материалов (см. таблицу 1) было запроектировано соотношение компонентов: щебень 5–10 мм – 70%, щебень 3–5 мм – 7%, отсев 0–3 мм – 12%, минеральный порошок – 11%. Данное соотношение позволило получить суммарный зерновой состав, полностью соответствующий нормативному коридору стандарта JTG F40¹³ для смесей типа SMA-10 (см. рисунок 2). В качестве стабилизирующей добавки для предотвращения стекания вяжущего щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси применялось целлюлозное волокно (GranoCell) в количестве 0,42% от массы минеральных материалов. Оптимальное содержание вяжущего для обоих типов (контрольного и экспериментального) было определено по результатам объемного проектирования и составило 6,4% от массы минеральной части. Единственным варьируемым фактором в эксперименте являлся тип вяжущего: первый контрольный состав на полимерно-битумном вяжущем (I-D), второй – на экспериментальном композиционном биовяжущем. Такой подход обеспечил максимальную корректность последующего сравнительного анализа полученных данных.

Методика исследования. Оценка устойчивости органоминеральных смесей к колееобразованию проводилась в соответствии с методикой, изложенной в Т 0719, которая является частью отраслевого стандарта JTG E20¹⁴. Данный метод предназначен для определения способности асфальтобетона противостоять накоплению пластических деформаций при повышенных температурах, что является ключевым показателем для проектирования и контроля качества смесей, предназначенных для эксплуатации в условиях жаркого климата и/или воздействия тяжелых транспортных нагрузок.

Объектом исследования являлись лабораторно сформованные образцы в виде плит с габаритными размерами 300×300×50 мм. Формование плит включало уплотнение на секторном вальцовом уплотнителе до достижения объемной плотности, эквивалентной коэффициенту уплотнения 0,98. Перед началом испытания образцы подвергались термостатированию в климатической камере испытательной установки. Термостатирование проводилось до достижения полной и равномерной температуры внутри образца, которая составила $60,0 \pm 0,5$ °С. При этом температура воздушной среды в камере поддерживалась на уровне $60,0 \pm 1,0$ °С. Продолжительность предварительного термостатирования составляла 5 часов.

Испытания проводились на автоматизированной установке для определения колееустойчивости. Нагружение образца осуществлялось посредством прокатывания по его поверхности колеса, оснащенного цельнолитой резиновой шиной. Контактное давление колеса на поверхность образца поддерживалось на уровне $0,7 \pm 0,05$ МПа, что соответствовало общей прикладываемой нагрузке около 780 Н. Частота проходов нагружающего колеса составляла 42 ± 1 цикл (21 цикл «туда-обратно») в минуту. Термический режим в камере на протяжении всего процесса нагружения обеспечивался на уровне $60,0 \pm 0,5$ °С. Общая продолжительность нагружения составляла 60 минут.

Результаты исследования. В ходе эксперимента производилась непрерывная автоматическая регистрация вертикальной деформации (глубины колеи) с использованием датчиков линейных перемещений (LVDT) с точностью до 0,01 мм. Основным искомым параметром являлась динамическая стабильность (DS), выраженная в циклах/мм. Расчет данного параметра производился по деформациям, зафиксированным в интервале между 45-й (t_1) и 60-й (t_2) минутами испытания, что соответствует участку установившейся ползучести. Динамическая стабильность вычислялась по формуле:

$$DS = (t_2 - t_1) \cdot N / (d_2 - d_1), \quad (1)$$

где t_1 и t_2 – время испытания, равное 45 мин и 60 мин соответственно;
 d_1 и d_2 – глубина колеи в моменты времени t_1 и t_2 соответственно, мм;
 N – частота проходов колеса, равная 42 цикл/мин;

Для обеспечения статистической значимости полученных данных серия для каждого исследуемого состава включала не менее трех репликативных измерений. В качестве итогового принималось среднеарифметическое значение показателей, удовлетворяющих критериям сходимости стандарта. Результаты лабораторных исследований щебеночно-мастичных органоминеральных смесей сведены в общую таблицу 4.

Таблица 4. – Первичные и расчетные данные испытаний на колееобразование при 60 °С

Состав	№ образца	Глубина колеи на 45-й мин (d_1), мм	Глубина колеи на 60-й мин (d_2), мм
Контрольный на полимерно-модифицированном вяжущем	1	1,81	2,04
	2	1,75	1,99
	3	1,88	2,11
	Среднее значение	1,81	2,05
Экспериментальный на композиционном биовяжущем	1	0,98	1,14
	2	1,02	1,19
	3	0,95	1,12
	Среднее значение	0,98	1,15

¹³ См. сноску 2.

¹⁴ См. сноску 1.

Исходя из полученных результатов лабораторных исследований, по формуле (1) по средним значениям рассчитывалась динамическая стабильность (DS) для щебеночно-мастичных органоминеральных смесей на битуме (контрольный) и на композиционном биовязущем (экспериментальный). Коэффициенты вариации результатов для обеих серий испытаний (8,8% и 6,3%) не превышают допустимого нормативного предела в 20%, что свидетельствует о высокой сходимости и надежности полученных данных. Результаты расчета представлены на рисунке 3.

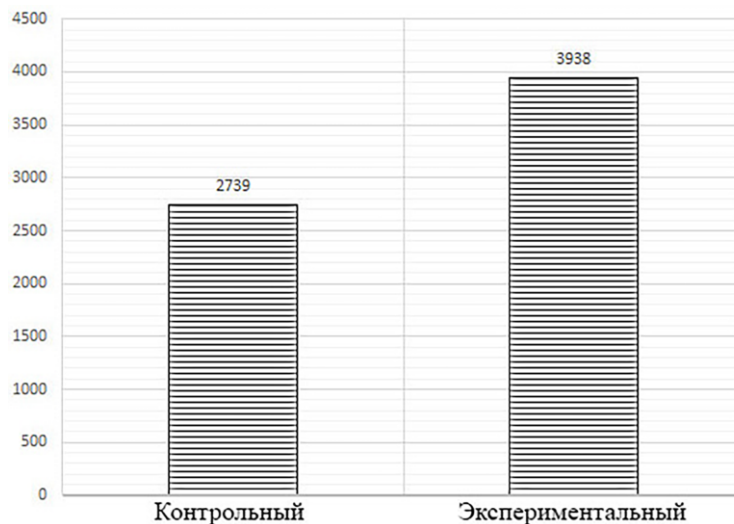


Рисунок 3. – Сравнение динамической стабильности (DS)

Согласно стандарту JTG F40¹⁵, для асфальтобетонных смесей, применяемых в верхних слоях покрытий на скоростных автомагистралях и дорогах I класса, минимальное требование к динамической стабильности (DS) при 60 °C составляет ≥ 3000 цикл/мм. Контрольный состав на основе полимерно-модифицированного вяжущего показал результат DS = 2739 цикл/мм (по средним значениям), что не удовлетворяет требованиям для высшей категории дорог. Экспериментальный состав на основе композиционного биовязущего показал результат DS = 3938 цикл/мм, что полностью соответствует и превосходит нормативные требования.

Сравнительный анализ показывает кардинальное улучшение свойств смеси при замене полимерно-модифицированного вяжущего на композиционное биовязущее. Динамическая стабильность экспериментального состава на 43,8% выше, чем у контрольного. Конечная глубина колеи у экспериментальной смеси 1,19 мм (по максимальному значению), что в 1,77 раза меньше, чем у контрольной смеси (2,11 мм). Это однозначно свидетельствует о том, что разработанное биовязущее обладает значительно более высокой когезионной прочностью и жесткостью при повышенной температуре, эффективно сопротивляясь накоплению остаточных деформаций.

Полученные результаты подтверждают гипотезу о формировании в объеме композиционного биовязущего более прочной структурной сетки по сравнению с традиционным полимерно-модифицированным вяжущим. Несмотря на то, что контрольное вяжущее относится к высокому классу I-D (PG 76-22 по Superpave), его оказалось недостаточно для обеспечения требуемой сдвигоустойчивости щебеночно-мастичной органоминеральной смеси с разработанным зерновым составом. Введение композиционного биовязущего на основе природных масел, смол и натуральных полимерных компонентов позволило решить эту проблему. Вероятно, это связано с двумя ключевыми факторами: с формированием более жесткой матрицы, компоненты образуют пространственную структуру с более высоким модулем упругости при 60 °C; с усилением адгезионного взаимодействия, способствующего созданию более прочных физико-химических связей на границе «вяжущее-камень», что препятствует сдвигу зерен в мастичной части под действием нагрузки.

Обсуждение. Полученные экспериментальные данные демонстрируют, что полная замена полимерно-модифицированного битума на разработанное композиционное биовязущее приводит к значительному повышению сопротивления щебеночно-мастичной органоминеральной смеси накоплению остаточных деформаций. Данный результат имеет принципиальное значение в контексте существующих исследований в области биовязущих. Одной из ключевых проблем, с которой сталкивается большинство исследователей, является снижение высокотемпературных эксплуатационных свойств (в частности, сдвигоустойчивости) при введении в состав асфальтобетона компонентов растительного происхождения. Как правило, для компенсации этого негативного эффекта требуются сложные и дорогостоящие модификаторы. Настоящее исследование демонстрирует, что системный подход к проектированию, основанный на полной замене битума и подборе нескольких биокомпонентов с взаимодополняющими свойствами, позволяет не просто достичь, но и превзойти уровень высококачественных полимерно-модифицированных аналогов.

¹⁵ См. сноску 2.

Высокие показатели динамической стабильности смеси на композиционном-биовязующем могут быть объяснены складывающимся комплексным эффектом его компонентов. В отличие от простой дисперсии полимера в битуме, в материале происходит формирование сложной трехмерной структурной сетки за счет взаимодействия растительных масел и полимерных составляющих в матрице из природных смол. Эта структура, по-видимому, обладает более высоким модулем упругости и когезионной прочностью при температуре 60 °С, что и обеспечивает повышенное сопротивление сдвиговым деформациям.

Необходимо отметить, что данное исследование было сфокусировано на оценке сдвигоустойчивости. Для полной и всесторонней оценки эксплуатационных характеристик разработанного материала требуется проведение дальнейших исследований, включающих оценку низкотемпературных свойств (трещиностойкость, к примеру, по методу BBR), усталостной долговечности и водостойкости. Тем не менее полученные результаты однозначно подтверждают высокий потенциал разработанного композиционного биовязующего для создания долговечных дорожных покрытий.

Заключение. Экспериментально доказано, что полная замена стандартного полимерно-модифицированного битума (класса I-D) на разработанное композиционное биовязующее в составе щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси SMA-10 приводит к значительному повышению ее сопротивления колееобразованию. Динамическая стабильность (DS) при 60 °С увеличилась на 43,8% (с 2739 до 3938 цикл/мм), что позволило перевести асфальтобетон из категории, не соответствующей требованиям для скоростных автомагистралей, в категорию, полностью им удовлетворяющую. Основная цель работы была успешно достигнута.

Полученный результат имеет принципиальное научное и практическое значение. Он демонстрирует, что системный подход к проектированию композиции из нескольких взаимодополняющих биокомпонентов позволяет не просто компенсировать известные недостатки отдельных видов растительного сырья, но и создавать вязущие, превосходящие по ключевым эксплуатационным показателям (в данном случае – сдвигоустойчивости) высококачественные нефтяные аналоги. Таким образом, данная работа подтверждает высокий потенциал применения композиционных биовязующих для создания долговечных и экологически безопасных дорожных покрытий, способных выдерживать нагрузки на наиболее ответственных участках дорожной сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tabaković, A. Is this the end of the road for bio-inspired road construction materials? // RILEM Technical Letters. – 2022. – Vol. 7. – P. 79–87. DOI: 10.21809/rilemtechlett.2022.156.
2. Converting biomass into bio-asphalt – a review / Z.Y. Mahssin, N.A. Hassan, H. Yaacob et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: Proc. of the 4th National Conf. on Wind & Earthquake Engineering (October 16–17, 2020, Putrajaya, Malaysia). – 2021. – Vol. 682. DOI: 10.1088/1755-1315/682/1/012066.
3. Partial replacement of asphalt binder with bio-binder: characterisation and modification / E.H. Fini, I.L. Al-Qadi, Z. You et al. // International Journal of Pavement Engineering. – 2011. – Vol. 12, № 6. – P. 515–522. DOI: 10.1080/10298436.2011.596937.
4. Characterization of asphalt binders modified with bio-binder from swine manure / J. Gasia, T. López-Montero, L. Vidal et al. // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, № 20. DOI: 10.3390/app132011412.
5. Biomass-derived bio-oil for asphalt binder applications: production feasibility and performance enhancement / A.A. El-Sherbeni, A.M. Awed, A.R. Gabr et al. // Construction Materials. – 2025. – Vol. 5, № 1. DOI: 10.3390/constrmater5010011.
6. High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking and cotton seed oils / M. Chen, F. Xiao, B. Putman et al. // Construction and Building Materials. – 2014. – Vol. 59. – P. 10–16. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.032.
7. Performance of waste cooking oil in asphalt binder modification / W.N.A.W. Azahar, M. Bujang, R.P. Jaya et al. // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 700. – P. 216–226. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.700.216.
8. A comprehensive review of bio-oil, bio-binder and bio-asphalt materials: their source, composition, preparation and performance / Z. Zhang, Y. Fang, J. Yang et al. // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). – 2022. – Vol. 9, № 2. – P. 151–166. DOI: 10.1016/j.jtte.2022.01.003.
9. Productions and applications of bio-asphalts – a review / N. Su, F. Xiao, J. Wang et al. // Construction and Building Materials. – 2018. – Vol. 183. – P. 578–591. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.118.
10. Effect of Organic-Montmorillonite on rheological performance of Bio-Asphalt composites with various oxidative aging / C. Wang, T. Xie, X. Ji et al. // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 342, Part A. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127945.
11. Green roads ahead: a critical examination of bio-bitumen for sustainable infrastructure / Y. Zhang, P. Ding, L. Zhang et al. // Frontiers in Materials. – 2024. – Vol. 11. DOI: 10.3389/fmats.2024.1382014.
12. Comparison of the rheological and the thermal behaviour of a neat asphalt binder and a wood-based binder for pavement surface layer / L.V. Espinosa, F. Gadler, R.V. Mota et al. // Road Materials and Pavement Design. – 2021. – Vol. 22, № 1. – P. S702–S717. DOI: 10.1080/14680629.2021.1911834.
13. An extensive laboratory investigation on the use of bio-oil modified asphalt in road construction / A. Guarin, A. Khan, A.A. Butt et al. // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 106. – P. 133–139. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.009.
14. Preparation and performance evaluation of swine manure bio-oil modified rubber asphalt binder / H. Wang, Y. Jing, J. Zhang et al. // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 294. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123584.
15. Hemida A., Abdelrahman M. Component analysis of bio-asphalt binder using crumb rubber modifier and guayule resin as an innovative asphalt replacer // Resources, Conservation and Recycling. – 2021. – Vol. 169. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105486.
16. The use of lignin for sustainable asphalt pavements: a literature review / E. Gaudenzi, F. Cardone, X. Lu et al. // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 362. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129773.
17. Performance assessment of asphalt mixtures produced with a bio-binder containing 30% of lignin / E. Gaudenzi, F. Cardone, X. Lu et al. // Materials and Structures. – 2022. – Vol. 55. DOI: 10.1617/s11527-022-02057-w.

REFERENCES

1. Tabaković, A. (2022). Is this the end of the road for bio-inspired road construction materials? *RILEM Technical Letters*, 7, 79–87. DOI: 10.21809/rilemtechlett.2022.156.
2. Mahssin, Z.Y., Hassan, N.A., Yaacob, H., Puteh, M.H., Ismail, C.R., Jaya, R.P., Zainol, M.M., & Mahmud, M.Z.H. (2021). Converting biomass into bio-asphalt – a review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 682. DOI: 10.1088/1755-1315/682/1/012066.
3. Fini, E.H., Al-Qadi, I.L., You, Z., Zada, B., & Mills-Beale, J. (2011). Partial replacement of asphalt binder with bio-binder: characterization and modification. *International Journal of Pavement Engineering*, 12(6), 515–522. DOI: 10.1080/10298436.2011.596937.
4. Gasia, J., López-Montero, T., Vidal, L., Miró, R., Bengoa, C., & Martínez, A.H. (2023). Characterization of asphalt binders modified with bio-binder from swine manure. *Applied Sciences*, 13(20). DOI: 10.3390/app132011412.
5. El-Sherbeni, A.A., Awed, A.M., Gabr, A.R., & El-Badawy, S.M. (2025). Biomass-derived bio-oil for asphalt binder applications: Production feasibility and performance enhancement. *Construction Materials*, 5(1). DOI: 10.3390/constrmater5010011.
6. Chen, M., Xiao, F., Putman, B., Leng, B., & Wu, S. (2014). High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking and cotton seed oils. *Construction and Building Materials*, 59, 10–16. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.032.
7. Azahar, W.N.A.W., Bujang, M., Jaya, R.P., Hainin, M.R., Ngadi, N., & Abdullah, M.M.A. (2016). Performance of waste cooking oil in asphalt binder modification. *Key Engineering Materials*, 700, 216–226. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.700.216.
8. Zhang, Z., Fang, Y., Yang, J., & Li, X. (2022). A comprehensive review of bio-oil, bio-binder and bio-asphalt materials: Their source, composition, preparation and performance. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(2), 151–166. DOI: 10.1016/j.jtte.2022.01.003.
9. Su, N., Xiao, F., Wang, J., Cong, L., & Amirkhanian, S. (2018). Productions and applications of bio-asphalts – a review. *Construction and Building Materials*, 183, 578–591. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.118.
10. Wang, C., Xie, T., Ji, X., & Zhou, B. (2022). Effect of Organic-Montmorillonite on rheological performance of Bio-Asphalt composites with various oxidative aging. *Construction and Building Materials*, 342(Part A). DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127945.
11. Zhang, Y., Ding, P., Zhang, L., Luo, X., Cheng, X., & Zhang, H. (2024). Green roads ahead: a critical examination of bio-bitumen for sustainable infrastructure. *Frontiers in Materials*, 11. DOI: 10.3389/fmats.2024.1382014.
12. Espinosa, L.V., Gadler, F., Mota, R.V., Vasconcelos, K., & Bernucci, L.L. B. (2021). Comparison of the rheological and the thermal behaviour of a neat asphalt binder and a wood-based binder for pavement surface layer. *Road Materials and Pavement Design*, 22(1), S702–S717. DOI: 10.1080/14680629.2021.1911834.
13. Guarin, A., Khan, A., Butt, A. A., Birgisson, B., & Kringos, N. (2016). An extensive laboratory investigation on the use of bio-oil modified asphalt in road construction. *Construction and Building Materials*, 106, 133–139. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.009.
14. Wang, H., Jing, Y., Zhang, J., Cao, Y., & Lyu, L. (2021). Preparation and performance evaluation of swine manure bio-oil modified rubber asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 294. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123584.
15. Hemida, A., & Abdelrahman, M. (2021). Component analysis of bio-asphalt binder using crumb rubber modifier and guayule resin as an innovative asphalt replacer. *Resources, Conservation and Recycling*, 169. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105486.
16. Gaudenzi, E., Cardone, F., Lu, X., & Canestrari, F. (2023). The use of lignin for sustainable asphalt pavements: a literature review. *Construction and Building Materials*, 362. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129773.
17. Gaudenzi, E., Cardone, F., Lu, X., & Canestrari, F. (2022). Performance assessment of asphalt mixtures produced with a bio-binder containing 30% of lignin. *Materials and Structures*, 55. DOI: 10.1617/s11527-022-02057-w.

Поступила 24.06.2025

DEFORMATION RESISTANCE OF STONE MASTIC ASPHALT MIXTURE WITH A COMPOSITE BIO-BINDER

A. AFANASENKA, P. YATSEVICH

(Belarusian National Technical University, Branch of BNTU

"Scientific and Research Polytechnic Institute", Minsk)

This study investigates the deformation resistance of a Stone Mastic Asphalt (SMA) mixture based on a composite bio-binder, addressing the critical challenge in pavement materials science of finding alternatives to petroleum-based binders. A key problem with many existing bio-binders is their poor high-temperature performance, which leads to reduced resistance to plastic deformation. For a comparative evaluation, two mixtures with identical aggregate gradation were produced: a control mixture with conventional bitumen and a test mixture with the developed composite bio-binder. The rutting resistance was evaluated using the wheel tracking test according to the T 0719-2011 (JTG E20-2011) standard. It was established that the use of the composite bio-binder resulted in a 77,3% reduction in rut depth compared to the control mixture. The results indicate the high efficiency of the developed binder in improving resistance to plastic deformation and open up prospects for its application in pavement structures operating under high-temperature conditions and heavy traffic loads.

Keywords: composite bio-binder, Stone Mastic Asphalt (SMA), deformation resistance, rutting, high-temperature performance, dynamic stability (DS).