

крывающими перспективы для развития транспортных технологий. Особенностью СТЮ является синергетический эффект от сочетания её свойств, приводящий к возникновению новых системных качеств, не сводимых к простой сумме свойств элементов. Так, например, сочетание натяжения струн, аэродинамики модуля и управления создаёт устойчивость движения (чего нет у отдельных элементов), а взаимодействие упругих свойств струн и инерции транспортного модуля даёт самогасящиеся колебания – автоматическое демпфирование.

Дальнейшее исследование свойств СТЮ требует разработки специального методологического аппарата, учитывающего как общие принципы анализа транспортных систем, так и специфические особенности струнных технологий. Это открывает новые перспективы для развития теории транспортных систем и практического внедрения инновационных решений в транспортной отрасли.

#### Список литературы

- 1 Друкер, П. К. Бизнес и инновации : учеб. пособие / П. К. Друкер. – М. : Вильямс, 2007. – 432 с.
- 2 Юницкий, А. Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе / А. Э. Юницкий. – Силакрогс : ПНБ принт, 2019. – 576 с.
- 3 Юницкий, А. Э. Транспортно-инфраструктурные комплексы Юницкого как комплексное решение транспортных проблем в области энергоэффективности, экологичности и безопасности / А. Э. Юницкий, С. В. Артюшевский // Транспорт России: проблемы и перспективы : материалы междунар. науч.-практ. конф., 9–10 нояб. 2022 г., г. С.-Петербург. – СПб. : ИПТ РАН, 2022. – С. 139.

УДК 625.85

## ВЛИЯНИЕ СПОСОБА МОДИФИКАЦИИ И КОНЦЕНТРАЦИИ ПОЛИМЕРА НА КОМПЛЕКС СВОЙСТВ АСФАЛЬТОБЕТОНА

*П. П. ЯЦЕВИЧ*

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Современные условия эксплуатации автомобильных дорог характеризуются непрерывным ростом интенсивности движения и качественным изменением состава транспортного потока в сторону увеличения доли тяжелых транспортных средств и повышения их осевых нагрузок. Данные факторы приводят к тому, что асфальтобетонные покрытия, устроенные с применением стандартных битумов, не обладают достаточной долговечностью и подвержены интенсивному накоплению остаточных деформаций (колесобразованию) и других разрушений уже в первые годы эксплуатации [1]. Практика показывает, что достижение требуемых при проектировании уровней надежности дорожных конструкций невозможно без применения материалов с улучшенными физико-механическими свойствами, в частности, асфальтобетонных смесей, модифицированных полимерами [2].

Ключевым инструментом повышения эксплуатационных характеристик асфальтобетона является введение в его состав полимерных модификаторов [3]. В мировой и отечественной практике сложились два основных технологических подхода к полимеризации смесей [4]. Первый, условно «мокрый» метод, заключается в предварительном приготовлении полимерно-битумного вяжущего (ПБВ) путем растворения и гомогенизации полимера в битуме на специализированных установках. Второй, «сухой» метод, подразумевает введение гранулированного или порошкообразного полимера непосредственно в смеситель асфальтобетонного завода одновременно с минеральными материалами. Каждый из этих методов имеет свои технологические и экономические преимущества и недостатки, однако их сравнительная эффективность с точки зрения итоговых свойств асфальтобетона изучена недостаточно [5].

Несмотря на широкое применение обоих методов, выбор между ними зачастую определяется не технической, а производственно-логистической целесообразностью. При этом открытым остается вопрос о сравнительной ресурсоэффективности. Взаимодействие полимера с битумом зависит от множества факторов, температуры и продолжительности смешения, природы самого полимера (термопласты, эластопласты), а также толщины пленки вяжущего на поверхности минеральных зерен. Это формирует научную проблему, требующую системного исследования.

Для проведения экспериментальных исследований были выбраны два типа асфальтобетонных смесей, регламентированных СТБ 1033-2016 и широко применяемых в верхних слоях дорожных покрытий: щебеночная мелкозернистая смесь типа С (ЩМС<sub>г</sub>) и щебеночная мелкозернистая смесь типа Б (ЩМБ<sub>г</sub>). В качестве минеральной основы для обеих смесей использовались материалы одного карьера (РУПП «Гранит»), щебень гранитный и песок из отсевов дробления. В качестве минерального порошка применялся порошок из доломита. Органическим вяжущим служил дорожный битум марки 70/100. В качестве модифицирующих добавок применялись полимеры двух основных типов, термопласт и эластопласт, а также их композиции в пропорциях 33/66 и 66/33. Концентрация полимеров в вяжущем варьировалась в диапазоне от 2 до 8 % с шагом 2 % относительно массы битума. Для каждого состава и каждой концентрации готовились контрольные образцы без содержания полимера.

Исследование проводилось по двум основным направлениям, имитирующим производственные технологии. При «мокрым» методе предварительно готовилось полимерно-битумное вяжущее (ПБВ) с заданными концентрациями полимера, которое затем использовалось для приготовления асфальтобетонной смеси. При «сухом» методе в лабораторный смеситель вместе с разогретыми минеральными материалами и стандартным битумом вводился гранулированный полимер. Количество полимера при «сухом» методе рассчитывалось таким образом, чтобы итоговое соотношение полимер – битум в объеме смеси было идентично соотношению в смесях, приготовленных «мокрым» методом. Данное условие обеспечило корректность сравнения эффективности двух технологий.

Оценка комплекса физико-механических свойств модифицированных асфальтобетонов производилась на стандартных образцах, изготовленных и испытанных в соответствии с требованиями СТБ 1115-2013. Контролировались три ключевых параметра: предел прочности при сжатии при 50 °С ( $R_{50}$ ), характеризующий сдвигоустойчивость материала и его способность сопротивляться колеобразованию при высоких летних температурах; максимальная структурная прочность ( $R_{стр}$ ), определяемая в области отрицательных температур и позволяющая оценить трещиностойкость материала и его склонность к хрупкому разрушению в зимний период; водонасыщение ( $W$ , %) стандартных образцов, косвенно характеризующее технологические свойства смеси (удобоукладываемость) при уплотнении и потенциальную стойкость уплотненного материала к водонасыщению и морозоразрушению в процессе эксплуатации.

Полученные в ходе экспериментальных исследований данные позволили провести комплексную оценку влияния способа введения и концентрации полимеров на ключевые свойства асфальтобетона. Анализ результатов показал, что, несмотря на общую положительную тенденцию от введения модификаторов, эффективность «мокрого» и «сухого» методов принципиально различается.

Оценка предела прочности при сжатии при 50 °С ( $R_{50}$ ) показала, что предварительная модификация битума («мокрый» метод) является значительно более эффективным способом повышения сдвигоустойчивости асфальтобетона. При всех исследованных концентрациях и для всех типов полимеров образцы, изготовленные с применением ПБВ, демонстрировали более высокие значения прочности по сравнению с образцами, модифицированными «сухим» методом. Эта разница была особенно выражена для асфальтобетонной смеси типа С (ЩМС<sub>г</sub>) с повышенным содержанием вяжущего. Так, при введении 8 % эластопласта «мокрым» методом прочность смеси типа С возросла на 136 % (с 1,13 до 2,67 МПа), в то время как «сухой» метод дал прирост лишь на 27 % (с 1,07 до 1,41 МПа). Данный факт подтверждает гипотезу о том, что более толстые пленки вяжущего обеспечивают лучшие условия для растворения, набухания и формирования структурной полимерной сетки в объеме битума.

Исследование максимальной структурной прочности ( $R_{стр}$ ) выявило важную негативную тенденцию. Увеличение концентрации термопласта, особенно свыше 4 %, приводит к статистически значимому снижению  $R_{стр}$ , что указывает на охрупчивание асфальтобетона при отрицательных температурах. В то же время эластопласты либо не оказывают существенного влияния, либо незначительно повышают структурную прочность, что является их несомненным преимуществом.

Эта же тенденция прослеживается и при анализе технологических свойств. Высокие концентрации термопластов (6–8 %) приводят к значительному росту жесткости асфальтобетонной смеси при температурах укладки и уплотнения. Как следствие, ухудшается ее удобоукладываемость, что в ла-

бораторных условиях проявилось в увеличении показателя водонасыщения уплотненных образцов. Повышенное остаточное водонасыщение является крайне негативным фактором, так как оно напрямую снижает долговечность покрытия за счет ускорения процессов коррозионного и морозного разрушения. Таким образом, погоня за максимальной высокотемпературной прочностью путем введения высоких дозировок термопласта может привести к снижению трещиностойкости и общей коррозионной стойкости покрытия.

#### Список литературы

- 1 Долговечные асфальтобетонные покрытия автомобильных дорог, мостов и улиц / В. А. Веренько, В. В. Занкович, А. В. Ладышев [и др.]. – Минск : Арт Дизайн, 2015. – 296 с.
- 2 ТКП 45-3.03-3-2004. Проектирование дорожных одежд улиц и дорог населенных пунктов. – Введ. 08.12.2004. – Минск : М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 2005. – 54 с.
- 3 **Веренько, В. А.** Надежность дорожных одежд / В. А. Веренько. – Минск : БГПА, 2002. – 120 с.
- 4 **Duarte, G. M.** Asphalt concrete mixtures modified with polymeric waste by the wet and dry processes: A literature review / G. M. Duarte, A. L. Faxina // Construction and Building Materials. – 2021. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125408>.
- 5 Comparison of asphalt mixtures containing polymeric compounds and polymer-modified bitumen based on the VECD theory / S. Spadoni, L. P. Ingrassia, D. Mocelin [et al.] // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 349. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822023820>.