

Уплотнение балласта плеча балластной призмы ведет к повышению сопротивления рельсошпальной решетки поперечному сдвигу при проведении выправки пути в продольном профиле, что особенно актуально для зоны отрицательного прогиба рельсошпальной решетки [1].

Список литературы

- 1 **Бромберг, Е. М.** Устойчивость бесстыкового пути / Е. М. Бромберг. – М. : Транспорт, 1966. – С. 67.
- 2 **Виногоров, Н. П.** Устойчивость бесстыкового пути / Н. П. Виногоров // Путь и путевое хозяйство. – 2005. – № 8. – С. 7–13.
- 3 Организация высокоскоростного движения на участке Москва – Санкт-Петербург : отчет о НИР 6.3.00. – М. : МИИТ, 2005.
- 4 **Selig, E. T.** Track Geotechnology and Substructure Management / E. T. Selig, J. M. Waters. – London : Thomas Telford Services Ltd., 1994.
- 5 Сопротивление шпал поперечному сдвигу // Железные дороги мира. – 2014. – № 1.

УДК 625.85

ЭФФЕКТИВНЫЕ СТАБИЛИЗИРУЮЩИЕ ДОБАВКИ НА ОСНОВЕ МЕСТНОГО ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ВЯЖУЩЕГО

А. А. АФАНАСЕНКО

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Долговечность дорожных покрытий является одним из приоритетных направлений в развитии транспортной инфраструктуры. Особое место в современной практике занимают щебеночно-мастичные асфальтобетонные смеси (ЩМА), характеризующиеся высоким содержанием щебня и битумного вяжущего. Данная структура обеспечивает высокую износостойкость и сопротивление пластическим деформациям, однако приводит к технологическим сложностям, главной из которых является стекание вяжущего при высоких температурах производства и укладки.

Мировой опыт применения стабилизирующих волокон в асфальтобетоне можно разделить на несколько категорий [1–3]. *Натуральные органические волокна*, к которым относятся волокна растительного происхождения из джута, хлопка, льна, сизаля, койры и т. д. [4, 5] (рисунок 1). Наибольшее распространение и применение получили целлюлозные волокна, получаемые из древесины, они являются наиболее часто применяемым компонентом в составе щебеночно-мастичного асфальтобетона (SMA) [6]. Благодаря ветвистой структуре они обладают высокой абсорбционной способностью. В основном поставляются в виде гранул (например, Granocell), что удобно для заводского дозирования. Их преимущества – высокая эффективность и экологичность. Однако есть существенные недостатки, такие как повышенное влагопоглощение и риск термического разрушения при температурах приготовления смеси, особенно в условиях бесконтрольного нагрева материала.



Кокос

Сизаль

Лен

Кенаф

Рисунок 1 – Натуральные органические волокна

Минеральные волокна бывают природными (асбест) и искусственными (стекловолокно, шлаковые волокна) [7, 8] (рисунок 2). Применение асбеста было прекращено практически во всех странах мира из-за экологических рисков и рисков, связанных со здоровьем дорожных рабочих [9]. Стек-

лянные волокна обладают выдающимися механическими свойствами (высокий модуль упругости, низкое удлинение), но отличаются хрупкостью [10].



Рисунок 2 – Минеральные волокна

Синтетические полимерные волокна (полиэстер, полипропилен, арамид, рисунок 3) являются наиболее распространенными после целлюлозы. Они улучшают усталостную долговечность и сопротивление деформациям [11–13]. Арамидные волокна, например, сжимаясь при высоких температурах, повышают устойчивость покрытия в жарком климате [14].

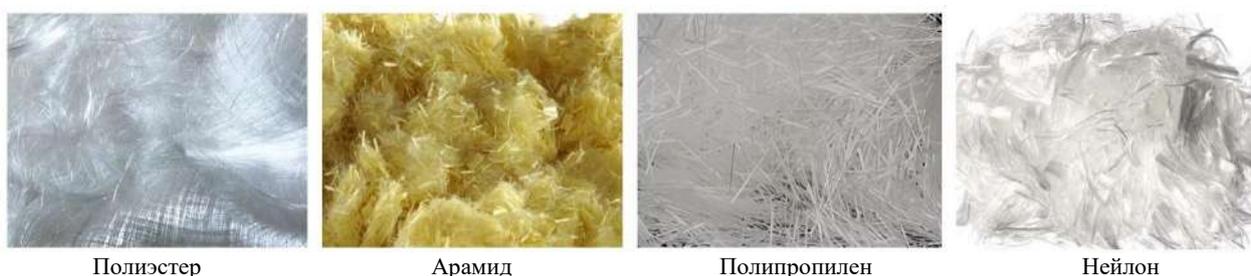


Рисунок 3 – Синтетические полимерные волокна

В рамках концепции устойчивого развития активно изучается применение волокон из отходов. Наибольший интерес представляют кордовые волокна, извлеченные из переработанных автомобильных шин. Исследования подтверждают, что их использование улучшает прочностные характеристики и влагостойкость смесей, и они могут служить заменой стандартным целлюлозным волокнам в SMA [15].

На рынке Республики Беларусь, как и во многих других странах, доминируют импортные гранулированные добавки (VIATOR, ARBOCEL и др.), стоимость которых может достигать 2 евро за килограмм, что значительно увеличивает итоговую стоимость асфальтобетона. В связи с этим задача разработки и внедрения эффективных и экономически целесообразных стабилизирующих добавок на основе местного сырья, в том числе с использованием промышленных отходов, является крайне актуальной.

Учитывая высокую стоимость импортных аналогов и необходимость утилизации отходов, нами была предложена и запатентована новая композиционная стабилизирующая добавка [16]. В ее состав вошли: целлюлозное волокно, в качестве источника использовалась измельченная макулатура (эковата), соответствующая ГОСТ 10700; синтетическое полимерное волокно (применены невозвратные отходы производств искусственного меха и нетканых полотен, данные волокна создают в смеси пространственный армирующий каркас); термостабилизатор (в частности, Диафпен ФП), предотвращающий термоокислительное старение битума и слипание гранул добавки при хранении; битум, выполняющий роль связующего для грануляции компонентов.

Технология изготовления добавки включает смешение сухих компонентов, введение в массу разогретого битума с термостабилизатором и последующее перемешивание до однородной консистенции, пригодной для грануляции.

Для определения оптимального соотношения компонентов был проведен лабораторный эксперимент, включавший 16 различных составов добавки. Варьировались доли каждого из четырех компонентов, а также итоговое содержание добавки в асфальтобетонной смеси (от 0,1 до 0,8 %).

Для анализа полученных данных и выявления нелинейных зависимостей был применен метод множественной регрессии. Были построены три математические модели, описывающие зависи-

мость ключевых свойств смеси от рецептуры добавки: модель стекания вяжущего; модель предела прочности при растяжении при 0 °С; модель предела прочности при сжатии при 50 °С.

Высокие значения коэффициента детерминации (R^2) подтвердили адекватность и высокую прогнозную способность моделей. Данные модели легли в основу процесса оптимизации, целью которого было найти состав, удовлетворяющий комплексу требований: стекание вяжущего не более 0,15 %, предел прочности при растяжении в диапазоне 1,5–3,5 МПа и максимальное значение предела прочности при сжатии.

Анализ уравнений и экспериментальных данных позволил выявить оптимальные диапазоны. Например, составы с содержанием макулатуры около 40 % и выше, термостабилизатора от 6 до 9 % и синтетического волокна около 40 % чаще всего обеспечивали низкое стекание и высокую прочность. Использование моделей позволило проверить гипотезы без проведения натуральных испытаний. Так, для состава, находящегося в центре оптимальных диапазонов (42 % полимерного волокна, 41 % макулатуры, 9 % термостабилизатора, 8 % битума), расчетное значение стекания при дозировке 0,8 % составило 0,08 %, что полностью совпало с экспериментом.

На основе проведенного комплексного анализа, включающего лабораторные исследования и математическое моделирование, был определен оптимальный состав стабилизирующей добавки, защищенный патентом [16]. Рекомендуемое количество вводимой добавки в асфальтобетонную смесь в зависимости от количества органического вяжущего составляет 0,3–0,8 % от массы минеральной части.

Таким образом, доказана возможность создания эффективной стабилизирующей добавки для асфальтобетонных смесей на основе местного сырья и промышленных отходов. Применение регрессионного анализа показало себя как мощный инструмент для решения многофакторных оптимизационных задач в материаловедении, позволяющий значительно сократить время разработок. Созданная добавка является конкурентоспособным аналогом импортных продуктов, способствуя снижению стоимости дорожного строительства и решая экологическую задачу утилизации отходов.

Список литературы

- 1 Fiber additives in asphalt mixtures // National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. – URL : <https://nap.nationalacademies.org/read/22191/chapter/1> (date of access: 01.10.2025).
- 2 **Афанасенко, А. А.** Аналитический обзор методов стабилизации асфальтобетонных смесей с повышенным содержанием вяжущего / А. А. Афанасенко, П. П. Яцевич, А. В. Корончик // Весник гражданских инженеров. – 2024. – № 2 (103). – С. 59–70.
- 3 Долговечные асфальтобетонные покрытия автомобильных дорог, мостов и улиц. / В. А. Веренько, В. В. Занкович, А. А. Афанасенко [и др.]; под ред. В. А. Веренько. – Минск : Арт Дизайн, 2015. – 296 с.
- 4 **Varma, R.** An experimental study of bituminous mixes using a natural fibre / R. Varma, R. K. Pandey // Global Journal of Engineering Science and Researches. – 2023. – Vol. 4, is. 5. – P. 63–72.
- 5 **Khan, G. K.** A review study of stone matrix asphalt using a natural fibre / G. K. Khan, J. Narwal // International Journal of Latest Research In Engineering and Computing. – 2017. – Vol. 5, is. 3. – P. 95–97.
- 6 **Кирюхин, Г. Н.** Строительство дорожных и аэродромных покрытий из щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей / Г. Н. Кирюхин, Е. А. Смирнов. – М. : Элит, 2009. – 176 с.
- 7 **Morova, N.** Investigation of usability of basalt fibers in hot mix asphalt concrete / N. Morova // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 47. – P. 175–180.
- 8 **Guan, B.** Investigation of usability of brucite fiber in asphalt mixture / B. Guan, R. Xiong, R. He [et al.] // Pavement Research and Technology. – 2014. – Vol. 7, is. 3. – P. 193–202.
- 9 **Busching, H. W.** A state-of-the-art survey of reinforced asphalt paving / H. W. Busching, E. H. Elliott, N. G. Reyneveld // Proceedings of the Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists. – 1970. – Vol. 39. – P. 766–798.
- 10 **Mahrez, A.** Prospect of using glass fiber reinforced bituminous mixes / A. Mahrez, M. Karim, H. Katman // Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. – 2003. – Vol. 5. – P. 794–807.
- 11 **Wu, S.** Investigation of rheological and fatigue properties of asphalt mixtures containing polyester fibers / S. Wu, Q. Ye, N. Li // Construction and Building Materials. – 2008. – Vol. 22, is. 10. – P. 2111–2115.
- 12 Synthetic fibers in asphalt paving mixtures // Texas Transportation Institute. – URL : <https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/319-1F.pdf>. (date of access: 03.02.2024).
- 13 **Freeman, R. B.** Polyester fibers in asphalt paving mixtures / R. B. Freeman, J. L. Burati, S. N. Amirkhanian, W. C. Bridges // Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists. – 1981. – Vol. 89. – P. 387–409.
- 14 Evaluation of fiber-reinforced asphalt mixtures using advanced materials characterization tests / K. E. Kaloush, K. P. Biligiri, W. A. Zeiada [et al.] // Journal of Testing and Evaluation. – 2010. – Vol. 38, is. 4. – P. 400–411.
- 15 **Putman, B. J.** Utilisation of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures / B. J. Putman, S. N. Amirkhanian // Resources Conservation and Recycling. – 2004. – Vol. 42. – P. 265–274.
- 16 Патент BY 12332, МПК (2006) C04B24/00 Стабилизирующая добавка для асфальтобетонной смеси : № а 20071250 ; заявлено 16.10.2007 ; опубл. 30.08.2009 / В. А. Веренько, В. В. Занкович, А. А. Афанасенко ; заявитель БНТУ. – 5 с.