

Разработка технологической схемы производства асфальтобетонной смеси с использованием отходов полиэтилена, загрязненного нефтепродуктами

К.Г. Пугин¹✉

¹Пермский государственный аграрно-технологический университет
им. академика Д.Н. Прянишникова, г. Пермь, Россия

Аннотация. Использование в больших количествах тары из полиэтилена низкого давления, применяемой для транспортировки и хранения нефтепродуктов (моторных масел), формирует собой повышенные риски негативного воздействия на окружающую среду при утилизации или захоронении. Поиск новых способов утилизации такой тары, позволяющих вовлечь ее в производство новых целевых продуктов, исключая при этом тщательную очистку отходов от загрязнений и остатков моторных масел, является актуальной задачей современной науки. Для изучения возможности использования полиэтилена в составе асфальтобетонной смеси была выбрана измельченная тара, используемая для хранения и транспортировки моторного масла. С целью исследования изменения свойств асфальтобетона с добавлением полиэтилена низкого давления, был сформирован контрольный образец асфальтобетонной смеси, без его наличия, а также образец, содержащий 17,5 % полиэтилена низкого давления (загрязнен моторным маслом на 8 %) по массе битума. По результатам исследования была произведена оценка основных физико-механических показателей образцов асфальтобетона с полиэтиленом низкого давления и моторным маслом. Согласно данной оценке, ряд показателей имеет более высокие значения в сравнении с требованиями ГОСТ 9128-2013. Кроме того, был разработан технологический регламент получения асфальтобетонной смеси с добавлением полиэтилена, также разработана технологическая схема получения асфальтобетонной смеси. Вовлечение отходов полиэтилена, содержащих в себе остатки моторного масла, в цикл получения асфальтобетонных смесей, позволит снизить потребление сырья для производства асфальтобетона и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду.

Ключевые слова: асфальтобетон, полиэтилен низкого давления, утилизация, технологическая схема, отходы потребления, моторное масло

Для цитирования: Пугин К.Г. Разработка технологической схемы производства асфальтобетонной смеси с использованием отходов полиэтилена, загрязненного нефтепродуктами // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2024. Т. 14. № 3. С. 570–579. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-3-570-579>. EDN: QIFUUX.

Original article

Development of a flow diagram for the production of asphalt concrete mixture using polyethylene waste, contaminated with oil products

Konstantin G. Pugin¹✉

¹Perm State Agrarian and Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov, Perm, Russia

Abstract. Large quantities of low-pressure polyethylene containers used for transportation and storage of oil products (motor oils) entail higher environmental risks produced by their utilization or disposal. An urgent scientific task is to search for new ways for utilization of such containers, to involve them in production of new target products without thorough cleaning of waste from contaminants and residues of motor oils. The present study involved crushed containers used for storage and transportation of motor

oil in order to explore the possibility of including polyethylene in the production of asphalt concrete mixture. A sample, containing 17.5% of low-pressure polyethylene (contaminated with motor oil by 8% of asphalt mass), and a control sample of asphalt concrete mixture free of polyethylene, were made in order to investigate the change of properties, occurring in the low-pressure polyethylene asphalt concrete. Results. The study assessed main physical and mechanical properties of asphalt concrete samples containing low-pressure polyethylene and motor oil. According to the assessment, a number of properties exceed the values stated in GOST 9128-2013. In addition, the study results included development of technological regulations for producing asphalt concrete mixture with polyethylene as well as the flow diagram for obtaining asphalt concrete mixture. Using polyethylene waste contaminated with motor oil in the production cycle of asphalt concrete mixtures will reduce the consumption of raw materials for asphalt concrete production and the negative impact on the environment.

Keywords: asphalt concrete, low-pressure polyethylene, recycling, flow chart, consumer waste, engine oil

For citation: Pugin K.G. Development of a flow diagram for the production of asphalt concrete mixture using polyethylene waste, contaminated with oil products. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2024;14(3):570-579. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-3-570-579>. EDN: QIFUUX.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день проблемой утилизации отходов занимаются в мире и в Российской Федерации (РФ) многие ученые, используя различные методические и технологические подходы, направленные на извлечение максимальной выгоды при использовании ресурсного потенциала отходов с получением новых целевых продуктов, востребованных на рынке. При этом решаются не только экологические проблемы размещения отходов, но также и экономия природных сырьевых ресурсов.

Уровень технического развития промышленности, разнообразие используемых технических переделов позволяют с минимальными изменениями основного технологического процесса использовать ресурсный потенциал отходов. Использование отходов в качестве ресурсного материала позволяет улучшить характеристики нового продукта [1–5]. Для транспортировки и хранения моторного масла применяется тара из полиэтилена низкого давления (ПНД) различного объема. Такие тары имеют объем от одного до десяти литров и используются для технического обслуживания транспортных средств на станциях и в индивидуальном порядке. Ежегодно их выпускается более трехсот миллионов штук, что позволяет охарактеризовать данный сегмент отходов как многотоннажный. Существующие способы ее утилизации малоэффективны в экономическом и экологическом плане. Вторичная переработка использованной тары из ПНД, загрязненной нефтепродуктами, предполагает ее измельчение, а также очистку от остатков моторного масла. Это формирует новый поток отходов в виде шламов и повышает экологический

риск загрязнения окружающей среды (ОС). Шламы с содержанием остатков нефтепродуктов являются наиболее опасными для ОС, т. к. содержат в своем составе тяжелые металлы, жидкие смеси нафтоновых и ароматических углеводородов, диэфиры, полиалефины и т. д.) [6–9].

Проведенный обзор технических решений по утилизации отходов из ПНД, отходов, загрязненных нефтепродуктами, позволил определить эффективный способ утилизации тары из ПНД, используемой для моторных масел.

В исследованиях, выполненных в университете Arizona State University (США) и опубликованных в журнале *Resources, Conservation and Recycling*, оцениваются преимущества использования пластиковых отходов (в виде хлопьев), изготовленных из полиэтилентерефталата (ПЭТ) в качестве модификатора битума, который повышает прочность сцепления битума в органоминеральных смесях с минеральными компонентами. Для предотвращения эффекта разделения фаз, в виду низкой совместимости ПЭТ и битума, поверхность хлопьев ПЭТ была предварительно обработана маслом с одновременным воздействием микроволновым излучением. Это позволило уменьшить скорость старения битума и увеличить адгезию битума к кислым горным породам [10].

В публикациях от исследователей из School of Transportation Science and Engineering (Китай) и Institute of Highway Engineering (Германия) отмечается, что битум, полученный путем окисления сырой нефти, с трудом соответствует требованиям создания высококачественного асфальтобетонного дорожного покрытия. По этой причине исследователями был

разработан полимерно-модифицированный асфальтобетон путем смешивания с одним или несколькими высокомолекулярными полимерами. В частности, предложено производить модификацию асфальтобетона термопластичным эластомером стирол-бутадиен-стиролом.

Получаемый асфальтобетон обладает превосходными дорожными характеристиками, такими как стойкость к низкотемпературному растрескиванию, усталостному растрескиванию, образованию колеи [11–14].

Аналогичные исследования, выполненные в других развитых странах и РФ, показывают на возможность использования отходов пластика в качестве армирующих или модифицирующих материалов. Моторное масло может рассматриваться в качестве разжижителя битума и источника легких углеводородов, которые обеспечивают в органических вяжущих эластичность. Это позволяет отказаться от процесса очистки отходов ПНД от моторного

масла и расценивать его наличие в качестве сырьевого компонента [15–30].

Анализ научных публикаций, направленных на использование ресурсного потенциала полимерных отходов для получения органоминеральных композитов, позволил выдвинуть предположение, что измельченные отходы канистр из ПНД можно использовать для производства асфальтобетона. Частицы ПНД будут выполнять роль армирующего и модифицирующего элементов. Присутствие в отходах ПНД остатков моторного масла не является препятствием для реализации технологии использования отходов ПНД в составе асфальтобетона.

МЕТОДЫ

В качестве объекта для изучения возможности использования полиэтилена в составе асфальтобетонной смеси была выбрана тара из ПНД (1,4 и 10 л), которая используется для моторного масла. Измельченная тара в виде частиц представлена на рис. 1.



Рис. 1. Измельченная тара из полиэтилена низкого давления
Fig. 1. Shredded HDPE containers

В лабораторном исследовании использовали частицы ПНД с размерами: длина 25–30 мм, ширина 4–9 мм, толщина 0,2–0,4 мм. Длина частиц была выбрана с учетом размеров щебня, для формирования эффекта армирования.

Загрязнителем частиц вступало моторное масло 5w-40, которое подходит для широкого диапазона автомобилей и двигателей. Количество нефтепродукта, загрязняющего тару, после ее использования составило 8 % от массы частиц ПНД.

Для испытуемых асфальтобетонных образцов были использованы минеральные материалы: песок 0–5 мм (ГОСТ 8735-2014); щебень

10–20 мм (ГОСТ 8267-93); отсев дробления (ГОСТ 8735-2014).

В качестве вяжущего использовался битум БНД 90/130 (ГОСТ 22245-90). Компонентный состав асфальтобетонной смеси: щебень – 47 %; песок – 13 %; отсев дробления 32 %; минеральный порошок – 8 %; битум – 5,5 %. Для установления изменения физико-механических характеристик асфальтобетона при добавлении ПНД, загрязненного моторным маслом, были проведены несколько серий испытаний, которые позволили установить оптимальное количество ПНД в составе асфальтобетона. Для достижения повышенных характеристик требуется использовать 17,5 % ПНД от

веса битума. Для примера приведены сравнительные показатели асфальтобетона с содержанием ПНД (образец 1) и без ПНД (образец 2) (таблица). Исследование проводили в соответ-

ствии с требованиями ГОСТ 9128-2013, на оборудовании сертифицированной дорожной лаборатории Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Показатели асфальтобетонов, полученных с добавлением полиэтилена низкого давления
 Indicators of asphalt concrete obtained with the addition of HDPE

Основные показатели	Требования по ГОСТ 9128-2013	Образец 1	Образец 2
Остаточная пористость, %	2,5–5,0	3,01	3,57
Водонасыщение, по объему, %	1,5–4,0	1,38	1,88
Предел прочности при сжатии, МПа			
t+20 °C	> 2,5	4,26	3,75
t+50 °C	> 1,0	1,45	1,36
t 0 °C	< 11,0	8,54	9,48
Коэффициент водостойкости	> 0,90	0,98	0,93
Коэффициент водостойкости при длительном водонасыщении	> 0,85	0,98	0,95
Сдвигоустойчивость по:			
– коэффициенту внутреннего трения,	> 0,87	0,93	0,91
– сцеплению при сдвиге при t +50 °C, МПа	> 0,25	0,40	0,38
Трещиностойкость, при расколе при 0 °C, МПа	2,5–6,0	5,15	5,01

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученных результатов испытания образцов асфальтобетона с ПНД показал, что прочностные показатели при положительных температурах окружающей среды выше на 6,5 и 13 % (при температуре +50 и +20 °C соответственно). Это обеспечивает повышение устойчивости асфальтобетонного покрытия к пластическим деформациям и колееобразованию. Снижение показателя прочности при 0 °C на 10 % указывает на сохранение эластичности асфальтобетона при отрицательных температурах, что приводит к уменьшению образования трещин в зимний период времени. На это дополнительно указывает увеличение показателя трещиностойкости при расколе. Увеличение коэффициента водостойкости на 5 % характеризует асфальтобетон с добавлением ПНД как материал, обладающий большей устойчивостью к воздействию воды во время эксплуатации асфальтобетонного покрытия и во время весенне-осеннего циклического заморзания и оттаивания. Увеличение показателя сдвигоустойчивости характеризует асфальтобетон с ПНД как материал, способный в большей мере сохранять свою структуру при воздействии касательных сил, возникающих при торможении и разгоне транспортных

средств. Повышенные физико-механические характеристики асфальтобетона, полученного с добавлением оптимального содержания ПНД, коррелируются с данными, полученными разными авторами.

Положительный эффект от использования ПНД можно объяснить тем, что в процессе технологического воздействия на оборудовании асфальтобетонного завода частицы ПНД испытывают температурное воздействие (145–170 °C), которое выше температуры плавления ПНД (120–135 °C), при активном механическом воздействии во время сушки и смешивания компонентов асфальтобетонной смеси.

Частицы ПНД приобретают вытянутую форму, частично происходит отделение микро-частиц, которые равномерно распределяются в структуре асфальтобетона. Крупные частицы выполняют роль армирующих элементов, а микро-частицы выступают в роли модификатора битума, преобразуя его в полимернобитумное вяжущее.

В виду того, что изделия из ПНД сохраняют свои свойства при температурах до -60 °C, частицы ПНД в асфальтобетоне придают ему большую эластичность при отрицательных температурах. По итогам лабораторных исследований была разработана технологическая

схема получения асфальтобетонной смеси с ПНД и моторным маслом. В процессе формирования лабораторных образцов асфальтобетона было установлено, что в ряде случаев в асфальтобетонной смеси встречаются агломераты в виде слипшихся частиц ПНД. Это потребовало уточнения процесса смешивания отдельных компонентов асфальтобетонной смеси.

В ходе проведения лабораторных исследований, на основе разброса показателей физико-механических свойств асфальтобетонных образцов, сформированных с различной последовательностью смешивания, была выявлена закономерность обеспечения равномерного распределения частиц ПНД в структуре асфальтобетона.

Для наиболее эффективного (по времени и качеству) распределения ПНД в структуре асфальтобетона необходимо частицы ПНД вносить при смешивании щебня и песка. Такой

принцип смешивания компонентов способен повысить однородности смеси при добавлении в нее отходов ПНД, а также снизить продолжительность перемешивания на 20 %.

Предварительная технологическая оценка использования частиц полиэтилена с моторным маслом показала, что весь процесс производства асфальтобетона, с добавкой в виде ПНД, загрязненного нефтепродуктами, можно осуществить на стандартном оборудовании, использующимся на заводах по изготовлению асфальтобетонов.

Используемое оборудование, производящее сушку, смешивание минеральных компонентов, их дозирование и смешивание с битумом, позволяет, не нарушая общей технологии производства асфальтобетонной смеси, использовать частицы ПНД в качестве добавки. Для приготовления данной смеси предлагается использовать стандартную блок схему, которая представлена на рис. 2.

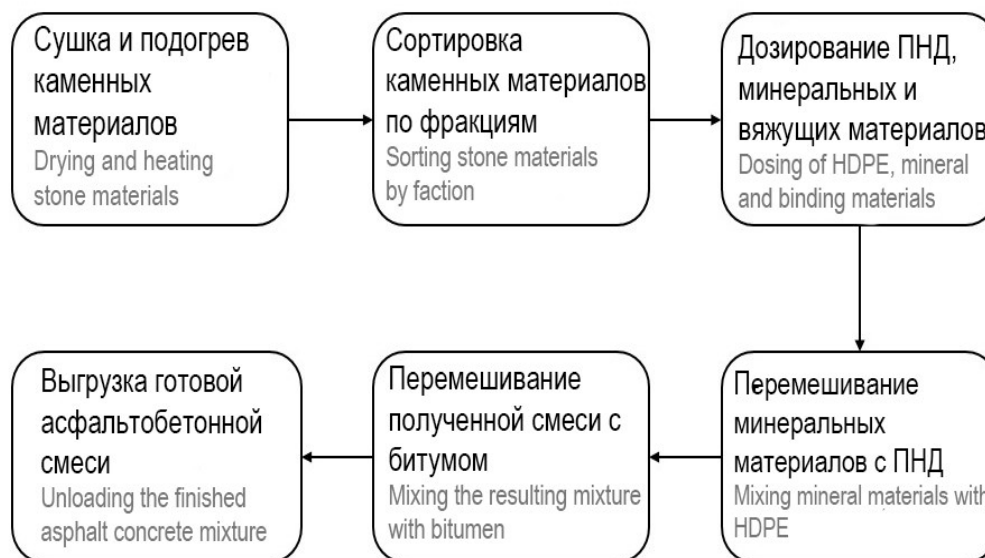


Рис. 2. Стандартная технологическая схема производства асфальтобетонной смеси
Fig. 2. Standard technological scheme for the production of asphalt concrete mixture

По итогам лабораторных исследований был разработан технологический регламент и технические условия на производство асфальтобетонной смеси с ПНД. Документы были разработаны для предприятия, использующего асфальтобетонный завод HDLG QLB-1500, производительностью 120 т/ч. Разработанная технологическая схема представлена на рис. 3. Представлена традиционная схема производства асфальтобетонной смеси на асфальтобетонном заводе. Единственным дополнением является бункер и весовой дозатор для из-

мельченного ПНД, благодаря которым обеспечивается хранение и дозировка отходов полиэтилена.

В процесс приготовления асфальтобетонной смеси с добавлением ПНД не потребуется включение дополнительного дорогостоящего оборудования, а также не нужно организовывать сложную технологическую линию, что является ее значимым преимуществом перед другими технологиями использования ресурсного потенциала отходов ПНД, загрязненных углеводородами.

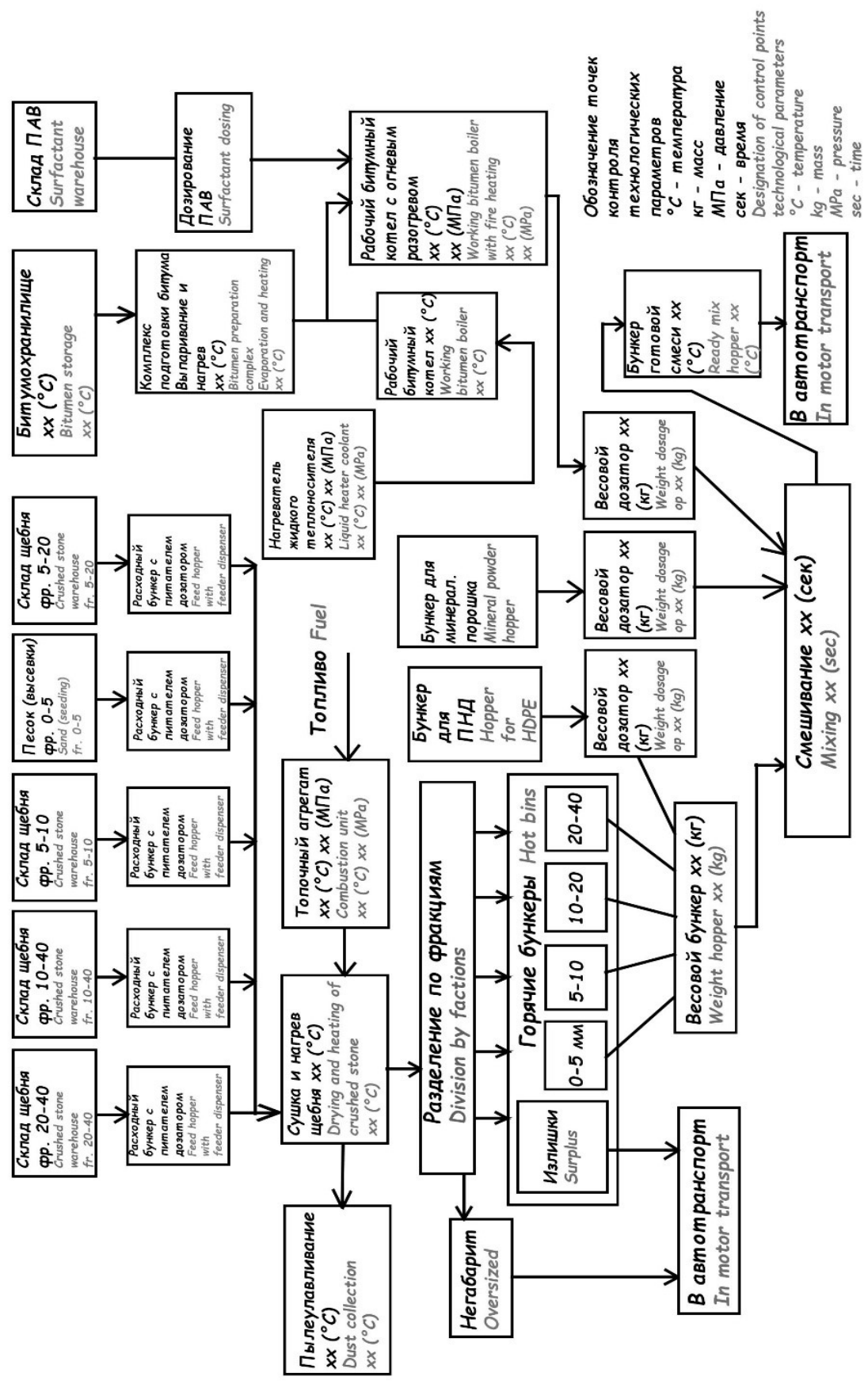


Рис. 3. Технологическая схема производства асфальтобетона с добавлением полиэтилена низкого давления, загрязненного моторным маслом
Fig. 3. Technological diagram of the production process of asphalt concrete with the addition of HDPE contaminated with motor oil

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № FSNM-2020-0024.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что отходы в виде тары из ПНД, используемой для моторного масла, обладает ресурсным потенциалом, который может быть использован для производства асфальтобетонной смеси. Используемые на асфальтобетонных заводах технологические воздействия (температура, механическое смешивание, время воздействия) позволяют эффективно интегрировать ПНД в структуру асфальтобетона. Под действием высокой температуры и физического воздействия частицы ПНД способны образовывать новые механические и хемосорбционные связи с минеральными частицами и битумом асфальтобетона, выполняя роль армирующего элемента и модификатора. Проведенные лабораторные испытания асфальтобетонных доказывают эффективность использования ПНД в их составе. Технологический процесс получения асфальтобетонной смеси при

использовании в ее составе ПНД не претерпевает существенных изменений.

Используемое оборудование на асфальтобетонных заводах не требует модернизации или изменения технологических режимов. Установлено, что для быстрого и эффективного достижения однородности асфальтобетонной смеси при добавлении ПНД, необходимо сначала осуществить смешивание частиц ПНД с песком и щебнем. Это позволяет избежать комкования частиц ПНД в агломераты.

Силовое воздействие крупных частиц щебня на поверхность частиц ПНД формирует более развитую поверхность, а разнонаправленное механическое воздействие (при вращении смесительного барабана) формирует более вытянутые частицы ПНД, что улучшает их армирующее действие. Использование ресурсного потенциала отходов тары из ПНД для моторных масел позволяет не только получать востребованный на рынке продукт, но и обеспечить реализацию экономики замкнутого цикла.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Теличенко В.И., Бенуж А.А., Сухина Е.А. Межгосударственные «зеленые» стандарты для формирования экологически безопасной среды жизнедеятельности // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 4. С. 438–462. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.4.438-462>. EDN: EXLUMH.
2. Слесарев М.Ю., Теличенко В.И. Обзор норм, методов и моделей геоэкологии в аспектах проблем «зеленой» стандартизации строительства // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2020. № 1. С. 42–46. <https://doi.org/10.31857/S0869780920010184>. EDN: SDIIPA.
3. Теличенко В.И., Щербина Е.В. Социально-природно-техногенная система устойчивой среды жизнедеятельности // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 6. С. 5–12. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.06.5-12>. EDN: KUKAGX.
4. Telichenko V.I., Sumerkin Yu. A. Modeling of the Microclimate of a Residential Courtyard During Renovation // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. Vol. 18. Iss. 3. P. 44–53. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-3-44-53>.
5. Devasahayam S., Raju G.B., Hussain C.M. Utilization and Recycling of End of Life Plastics for Sustainable and Clean Industrial Processes Including the Iron and Steel Industry // Materials Science for Energy Technologies. 2019. Vol. 2. Iss. 3. P. 634–646. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.08.002>.
6. Jie Jiang, Ke Shi, Xiangnan Zhang, Kai Yu, Hong Zhang, Jing He [et al.] From Plastic Waste to Wealth Using Chemical Recycling: A Review // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2022. Vol. 10. Iss. 1. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106867>.
7. Шершнева М.В. Новые экозащитные свойства строительных материалов и их отходов // Естественные и технические науки. 2023. № 5 (180). С. 158–160. <https://doi.org/10.25633/ETN.2023.05.06>. EDN: PMLIPK.
8. Баруздин А.А., Закревская Л.В., Николаева К.А. Композиционный материал на основе техногенных отходов // Эксперт: теория и практика. 2023. № 2 (21). С. 17–23. https://doi.org/10.51608/26867818_2023_2_17. EDN: HXAXRG.
9. Hongliang Zhang, Man Huang, Jun Hong, Feng Lai, Yang Gao Molecular Dynamics Study On Improvement Effect of Bis(2-Hydroxyethyl) Terephthalate On Adhesive Properties of Asphalt-Aggregate Interface // Fuel. 2021. Vol. 285. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119175>.
10. Sand Aldagari, Sk Faisal Kabir, Anthony Lamanna, Elham H. Fini Functionalized Waste Plastic Granules to Enhance Sustainability of Bituminous Composites // Resources, Conservation and Recycling. 2022. Vol. 183. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106353>.
11. Guannan Li, Zhaojun Gu, Yiqiu Tan, Chao Xing, Junjie Zhang, Chao Zhang Research On the Phase Structure of Styrene-Butadiene-Styrene Modified Asphalt Based On Molecular Dynamics // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 326. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126933>.

12. Saroufim E., Celauro C., Mistretta M.C. A Simple Interpretation of the Effect of the Polymer Type On the Properties of PMBs for Road Paving Applications // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 158. P. 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.034>.
13. Devasahayam S., Raju G.B., Hussain C.M. Utilization and Recycling of End of Life Plastics for Sustainable and Clean Industrial Processes Including the Iron and Steel Industry // *Materials Science for Energy Technologies*. 2019. Vol. 2. Iss. 3. P. 634–646. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.08.002>.
14. Jassim H.M., Mahmood O.T., Ahmed S.A. Optimum Use of Plastic Waste to Enhance the Marshall Properties and Moisture Resistance of Hot Mix Asphalt // *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2014. Vol. 7. Iss. 1. P. 18–25.
15. Soni K., Punjabi K.K. Improving the Performance of Bituminous Concrete Mix by Waste Plastic // *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2013. Vol. 3. P. 863–868.
16. Razzakh A., Al-Essa A.J., Mutar M.A., Hussein A.A. The Development of Durable Asphalt Pavement Using Modified Polymers and Resol as Reinforcing Materials // *Iraqi Journal of Science*. 2010. Vol. 51. Iss. 1. P. 18–27.
17. Hake S.L., Damgir R.M., Awsarmal P.R. Utilization of Plastic waste in Bitumen Mixes for Flexible Pavement // *World Conference on Transport Research – WCTR 2019 (Mumbai, 26–30 May 2019)*. Mumbai, 2020. Vol. 48. p. 3779–3785.
18. Jie Jiang, Ke Shi, Xiangnan Zhang, Kai Yu, Hong Zhang, Jing He [et al.] From Plastic Waste to Wealth Using Chemical Recycling: A Review // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022. Vol. 10. Iss. 1. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106867>.
19. Пугин К.Г., Пугина В.К. Использование отходов в структуре органоминеральных композитов, применяемых для строительства автомобильных дорог // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2021. № 2. С. 38–46. <https://doi.org/10.15593/24111678/2021.02.05>. EDN: FTFSIW.
20. Пугин К.Г., Юшков В.С. Строительство автомобильных дорог с использованием техногенных материалов // *Вестник Пермского государственного технического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности*. 2011. № 1. С. 35–43. EDN: ODXACR.
21. Pugin K.G., Yakontseva O.V., Salakhova V.K., Burgonutdinov A.M. The Use of Polymer Materials in The Composition of Asphalt Concrete // *Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment*. 2022. Vol. 21. P. 150–155. <http://doi.org/10.21741/9781644901755-27>.
22. Пугин К.Г., Калинина Е.В. Использование отходов предприятий химической и металлургической отрасли для изготовления асфальтобетонных дорожных покрытий // *Экология и промышленность России*. 2011. № 10. С. 28–30. EDN: OHYIKV.
23. Пугин К.Г., Вайсман Я.И. Методические подходы к разработке технологий совместного использования разнородных отходов производства // *Вестник МГСУ*. 2014. № 5. С. 78–90. EDN: SCJUTL.
24. Пугин К.Г., Яконцева О.В., Салахова В.К. Использование полимерных материалов в качестве структурного элемента в составе асфальтобетона // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2021. № 4. С. 29–36. <https://doi.org/10.15593/24111678/2021.04.04>. EDN: WPMJRS.
25. Соломенцев А.Б., Режист М., Жозеф Ш.М. Оценка технологических параметров асфальтобетонных смесей для улично-дорожной сети городских агломераций с добавками низкомолекулярного полиэтилена // *Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура*. 2021. № 3 (18). С. 85–96. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.18.3.009>. EDN: IGKEPV.
26. Проваторова Г.В. Экологические аспекты модификации битума // *Умные композиты в строительстве*. 2021. Т. 2. № 1. С. 47–52. https://doi.org/10.52957/27821919_2021_1_47. EDN: XRJLX.
27. Ming Liang, Changjun Sun, Zhanyong Yao, Hongguang Jiang, Jizhe Zhang Shisong Ren Utilization of Wax Residue as Compatibilizer for Asphalt with Ground Tire Rubber/Recycled Polyethyleneblends // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 230. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116966>.
28. Ming Liang, Xue Xin, Weiyu Fan, Hao Wang, Hongguang Jiang, Jizhe Zhang [et al.] Phase Behavior and Hot Storage Characteristics of Asphalt Modified with Various Polyethylene: Experimental and Numerical Characterizations // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 203. P. 608–620. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.095>.
29. Costa L.M.B., Silva H.M.R.D., Peralta J., Oliveira J.R.M. Using Waste Polymers as A Reliable Alternative for Asphalt Binder Modification–Performance and Morphological Assessment // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 198. P. 237–244. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.279>.
30. Xiong Xu, Zhen Leng, Jingting Lan, Wei Wang, Jiangmiao Yu, Yawei Bai [et al.] Sustainable Practice in Pavement Engineering Through Value-Added Collective Recycling of Waste Plastic and Waste Tyre Rubber // *Engineering*. 2021. Vol. 7. Iss. 6. P. 857–867. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.08.020>.

REFERENCES

1. Telichenko V.I., Benuzh A.A., Suhinina E.A. Interstate Green Standards of Formation Sustainable Built Environment Vital Activity. *Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2021;16(4):438-462. (In Russ.). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.4.438-462>. EDN: EXLUMH.

2. Slesarev M.Yu., Telichenko V.I. Review of Geoecological Standards, Methods and Models in The View of "Green" Standardization of Construction. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2020;1:42-46. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869780920010184>. EDN: SDIIPA.
3. Telichenko V.I., Shcherbina E.V. Social-Natural-Technogenic System of Sustainable Environment of Vital Activity. *Industrial and Civil Engineering*. 2019;6:5-12. (In Russ.). <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.06.5-12>. EDN: KUKAGX.
4. Telichenko V.I., Sumerkin Yu. A. Modeling of the Microclimate of a Residential Courtyard During Renovation. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022;18(3):44-53. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-3-44-53>.
5. Devasahayam S., Raju G.B., Hussain C.M. Utilization and Recycling of End of Life Plastics for Sustainable and Clean Industrial Processes Including the Iron and Steel Industry. *Materials Science for Energy Technologies*. 2019;2(3):634-646. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.08.002>.
6. Jie Jiang, Ke Shi, Xiangnan Zhang, Kai Yu, Hong Zhang, Jing He [et al.] From Plastic Waste to Wealth Using Chemical Recycling: A Review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022;10(1):1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106867>.
7. Shershneva M.V. New Eco-Protective Properties of Building Materials and Their Waste. *Natural and Technical Sciences*. 2023;5(180):158-160. (In Russ.). <https://doi.org/10.25633/ETN.2023.05.06>. EDN: PMLIPK.
8. Baruzdin A.A., Zakrevskaya L.V., Nikolaeva K.A. Composite Material Based On Industrial Wastes. *Expert: Theory and Practice*. 2023;2(21):17-23. (In Russ.). https://doi.org/10.51608/26867818_2023_2_17. EDN: HXAXRG.
9. Hongliang Zhang, Man Huang, Jun Hong, Feng Lai, Yang Gao Molecular Dynamics Study On Improvement Effect of Bis(2-Hydroxyethyl) Terephthalate On Adhesive Properties of Asphalt-Aggregate Interface. *Fuel*. 2021;285:1-14. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119175>.
10. Sand Aldagari, Sk Faisal Kabir, Anthony Lamanna, Elham H. Fini Functionalized Waste Plastic Granules to Enhance Sustainability of Bituminous Composites. *Resources, Conservation and Recycling*. 2022;183:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106353>.
11. Guannan Li, Zhaojun Gu, Yiqiu Tan, Chao Xing, Junjie Zhang, Chao Zhang Research On the Phase Structure of Styrene-Butadiene-Styrene Modified Asphalt Based On Molecular Dynamics. *Construction and Building Materials*. 2022;326:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126933>.
12. Saroufim E., Celauro C., Mistretta M.C. A Simple Interpretation of the Effect of the Polymer Type On the Properties of PMBs for Road Paving Applications. *Construction and Building Materials*. 2018;158:114-123. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.034>.
13. Devasahayam S., Raju G.B., Hussain C.M. Utilization and Recycling of End of Life Plastics for Sustainable and Clean Industrial Processes Including the Iron and Steel Industry. *Materials Science for Energy Technologies*. 2019;2(3):634-646. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.08.002>.
14. Jassim H.M., Mahmood O.T., Ahmed S.A. Optimum Use of Plastic Waste to Enhance the Marshall Properties and Moisture Resistance of Hot Mix Asphalt. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2014;7(1):18-25.
15. Soni K., Punjabi K.K. Improving the Performance of Bituminous Concrete Mix by Waste Plastic. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2013;3:863-868.
16. Razzakh A., Al-Essa A.J., Mutar M.A., Hussein A.A. The Development of Durable Asphalt Pavement Using Modified Polymers and Resol as Reinforcing Materials. *Iraqi Journal of Science*. 2010;51(1):18-27.
17. Hake S.L., Damgir R.M., Awsarmal P.R. Utilization of Plastic waste in Bitumen Mixes for Flexible Pavement. In: *World Conference on Transport Research – WCTR 2019*. 26–30 May 2019, Mumbai. Mumbai; 2020. Vol. 48. p. 3779–3785.
18. Jie Jiang, Ke Shi, Xiangnan Zhang, Kai Yu, Hong Zhang, Jing He [et al.] From Plastic Waste to Wealth Using Chemical Recycling: A Review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022;10(1):1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106867>.
19. Pugin K.G., Pugina V.K. Waste Use in The Structure of Organomineral Composites Used for The Construction of Motorroads. *Transport. Transport Facilities. Ecology*. 2021;2:38-46. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/24111678/2021.02.05>. EDN: FTFSIW.
20. Pugin K.G., Yushkov V.S. Construction of Highways Using Technogenic Materials. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Okhrana okruzhayushchei sredy, transport, bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2011;1:35-43. (In Russ.). EDN: ODXACR.
21. Pugin K.G., Yakontseva O.V., Salakhova V.K., Burgonutdinov A.M. The Use of Polymer Materials in The Composition of Asphalt Concrete. *Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment*. 2022;21:150-155. <http://doi.org/10.21741/9781644901755-27>.
22. Pouguin K.G., Kalinina E.V. Utilization of Waste from Chemical and Metallurgical Industries for Manufacture of Asphalt-Concrete Pavements. *Ecology and Industry of Russia*. 2011;10:28-30. (In Russ.). EDN: OHYIKV.

23. Pugin K.G., Vaysman Ya.I. Methodical Approaches to Waste Co-Recycling Technologies Development. *Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2014;5:78-90. (In Russ.). EDN: SCJUTL.
24. Pugin K.G., Yakontseva O.V., Salakhova V.K. The Use of Polymer Materials as A Structural Element in The Composition of Asphalt Concrete. *Transport. Transport Facilities. Ecology*. 2021;4:29-36. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/24111678/2021.04.04>. EDN: WPMJRS.
25. Solomentsev A.B., Regist M., Joseph Sch.M. Evaluation of Technological Parameters of Asphalt Concrete Mixtures for The Street-Road Network in Urban Agglomerations Using Additives of Polyethylene with Low Molecular Weight. *Housing and Utilities Infrastructure*. 2021;3(18):85-96. (In Russ.). <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.18.3.009>. EDN: IGKEPV.
26. Provatorova G.V. Environmental Aspects of Bitumen Modification. *Smart Composite in Construction*. 2021;2(1):47-52. (In Russ.). https://doi.org/10.52957/27821919_2021_1_47. EDN: XRJJLX.
27. Ming Liang, Changjun Sun, Zhanyong Yao, Hongguang Jiang, Jizhe Zhang Shisong Ren Utilization of Wax Residue as Compatibilizer for Asphalt with Ground Tire Rubber/Recycled Polyethyleneblends. *Construction and Building Materials*. 2020;230:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116966>.
28. Ming Liang, Xue Xin, Weiyu Fan, Hao Wang, Hongguang Jiang, Jizhe Zhang [et al.] Phase Behavior and Hot Storage Characteristics of Asphalt Modified with Various Polyethylene: Experimental and Numerical Characterizations. *Construction and Building Materials*. 2019;203:608-620. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.095>.
29. Costa L.M.B., Silva H.M.R.D., Peralta J., Oliveira J.R.M. Using Waste Polymers as A Reliable Alternative for Asphalt Binder Modification–Performance and Morphological Assessment. *Construction and Building Materials*. 2019;198:237-244. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.279>.
30. Xiong Xu, Zhen Leng, Jingting Lan, Wei Wang, Jiangmiao Yu, Yawei Bai [et al.] Sustainable Practice in Pavement Engineering Through Value-Added Collective Recycling of Waste Plastic and Waste Tyre Rubber. *Engineering*. 2021;7(6):857-867. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.08.020>.

Информация об авторе

Пугин Константин Георгиевич,
д.т.н., профессор кафедры
строительных технологий,
Пермский государственный
аграрно-технологический университет имени
академика Д. Н. Прянишникова,
614990, г. Пермь, ул. Петropавловская, д. 23,
Россия,
✉e-mail: 123zzz@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1768-8177>
Author ID: 622336

Information about the author

Konstantin G. Pugin,
Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department
of Construction Technologies,
Perm State Agrarian and Technological
University named after Academician
D.N. Pryanishnikov,
23, Petropavlovskaya St., Perm 614990,
Russia,
✉e-mail: 123zzz@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1768-8177>
Author ID: 622336

Вклад автора

Автор сделал эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the author

Author contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

Author declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the coauthor.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 14.06.2024.
Одобрена после рецензирования 01.07.2024.
Принята к публикации 02.07.2024.

Information about the article

The article was submitted 14.06.2024.
Approved after reviewing 01.07.2024.
Accepted for publication 02.07.2024.