

Научная статья

DOI: 10.15593/24111678/2025.01.04

УДК 691.168

К.Г. Пугин

Пермский государственный аграрно-технологический университет
имени академика Д.Н. Прянишникова, Российская Федерация
Пермский филиал Волжского государственного университета
водного транспорта, Российская Федерация

ПОВЫШЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННОЙ ОДНОРОДНОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Асфальтобетоны представляют собой композиционный материал, состоящий из минеральных материалов различного гранулометрического состава и битума. Для регулирования физико-механических и эксплуатационных показателей асфальтобетонов в состав асфальтобетонной смеси вводят дополнительные компоненты. Использование в составе асфальтобетонов различных добавок требует уточнения классической схемы производства асфальтобетонной смеси, определения последовательности введения добавки и технологических режимов ее производства. В большинстве опубликованных работ по использованию структурорегулирующих добавок в составе асфальтобетона не рассматриваются вопросы технологии производства асфальтобетонной смеси. Как правило, в исследованиях указаны полученные результаты без упоминания технологических режимов, в том числе очередности смешивания компонентов.

На примере использования измельченных отходов полиэтилена низкого давления в качестве структурорегулирующей добавки проведено исследование по установлению характера влияния на физико-механические показатели асфальтобетонов процесса смешивания. Анализ полученных показателей асфальтобетонных образцов с частицами полиэтилена низкого давления и вычисленные коэффициенты вариации и осцилляции показали, что на качество асфальтобетонной смеси процесс смешивания оказывает значительное влияние. Установлено, что физико-механические показатели образцов асфальтобетона могут варьироваться в пределах 6–15 %, что указывает на формирование существенной неоднородности асфальтобетонной смеси и, как следствие, асфальтобетон будет иметь значительную неоднородность своей структуры при промышленном выпуске.

Установлено, что для обеспечения высокой степени композиционной однородности структуры асфальтобетона при использовании в его составе измельченного полиэтилена низкого давления необходимо его вводить в состав асфальтобетонной смеси на этапе смешивания каменных материалов. Битум добавляется в смесь после перемешивания каменных материалов с частицами полиэтилена низкого давления. Такой порядок смешивания обеспечивает минимальное время приготовления асфальтобетонной смеси, снижение потребления энергетических ресурсов, обеспечение эффективности технологии утилизации тары из полиэтилена низкого давления. На примере использования полиэтилена низкого давления в качестве структурорегулирующей добавки показано влияние процесса смешивания в технологии производства асфальтобетонных смесей на физико-механические свойства асфальтобетона.

Ключевые слова: асфальтобетон, дорожное строительство, смеситель, асфальтобетонная смесь, неоднородность смеси, полиэтилен низкого давления.

K.G. Pugin

Perm State Agro-Technological University
named after Academician D.N. Pryanishnikov, Perm, Russian Federation
Volga State Academy of Water Transport, Perm Branch, Perm, Russian Federation

INCREASING THE COMPOSITIONAL HOMOGENEITY OF ASPHALT CONCRETE MIXTURES

Asphalt concretes are composite materials consisting of mineral materials of various granulometric compositions and bitumen. To regulate the physical, mechanical and operational properties of asphalt concretes, additional components are introduced into the asphalt concrete mixture. The use of various additives in the composition of asphalt concretes requires clarification of the classical scheme for the production of asphalt concrete mixtures, determination of the sequence of additive introduction and technological modes of its production. Most published works on the use of structure-regulating additives in the composition of asphalt concrete do not consider the issues of asphalt concrete mixture production technology. As a rule, the studies indicate the obtained results without specifying the technological modes, including the order of mixing the components. Using the example of using crushed low-pressure polyethylene waste as a structure-regulating additive, a study was

conducted to establish the nature of the influence of the mixing process on the physical and mechanical properties of asphalt concretes. Analysis of the obtained parameters of asphalt concrete samples with low-pressure polyethylene particles and the calculated variation and oscillation coefficients showed that the mixing process has a significant effect on the quality of the asphalt concrete mixture. It has been established that the physical and mechanical properties of asphalt concrete samples can vary within 6 - 15%, which indicates the formation of significant heterogeneity of the asphalt concrete mixture and, as a consequence, asphalt concrete will have significant heterogeneity of its structure during industrial production. It has been established that in order to ensure a high degree of compositional homogeneity of the asphalt concrete structure when using crushed low-pressure polyethylene in its composition, it is necessary to introduce it into the asphalt concrete mixture at the stage of mixing stone materials. Bitumen is added to the mixture after mixing stone materials with low-pressure polyethylene particles. This mixing procedure ensures minimal time for preparing the asphalt concrete mixture, reducing energy consumption, and ensuring the efficiency of the technology for recycling low-pressure polyethylene containers. Using low-pressure polyethylene as a structure-regulating additive as an example, the effect of the mixing process in the technology of producing asphalt concrete mixtures on the physical and mechanical properties of asphalt concrete is shown.

Keywords: asphalt concrete, road construction, mixer, asphalt concrete mix, heterogeneity of the mix, low-pressure polyethylene.

Асфальтобетоны представляют собой дисперсно-наполненные композиционные материалы, в которых в качестве наполнителя выступают каменные материалы различной крупности (щебень, песок, минеральный порошок), а в качестве матрицы используется битум. Для формирования повышенных эксплуатационных свойств асфальтобетона в состав асфальтобетонной смеси добавляют дополнительные компоненты, которые могут по своему физико-химическому и гранулометрическому составу иметь значительное отличие от традиционных минеральных материалов и битума. Классический способ производства асфальтобетонной смеси состоит в смешивании предварительно разогретых дозированных частей щебня, песка, высевок и минерального порошка с последующим смешением с разогретым битумом. Известно, что условия смешивания многокомпонентных смесей, к которым относятся и асфальтобетоны, в значительной степени влияют на конечные показатели получаемых из них продуктов.

Смешивание является важной стадией в технологии производства асфальтобетонной смеси и оказывает значительное влияние на качественные показатели асфальтобетона. Целью технологического процесса смешивания является создание однородной смеси из различных компонентов и равномерное их распределение по рабочему объёму смесителя. Процесс смешивания должен обеспечить равномерное распределение компонентов в структуре асфальтобетона, при этом не допустить образование комков и пустот в смеси. Смешивание компонентов происходит при принудительном воздействии на них рабочих органов смесителя.

Неравномерное распределение компонентов в структуре асфальтобетона снижает его физико-механические свойства, так как, по определению асфальтобетона, он является рационально подобранной смесью минеральных компонентов различного гранулометрического состава и битума. Изменение содержания одного из компонентов асфальтобетонной смеси в большую или меньшую сторону приводит к ухудшению физико-механических и эксплуатационных показателей асфальтобетона [1–3]. В связи с этим рассмотрение вопроса по обеспечению равномерного распределения всех компонентов в структуре асфальтобетона в процессе его производства на асфальтобетонном заводе с минимальными энергетическими и временными издержками является актуальной научной задачей.

Использование в составе асфальтобетонов добавок, регулирующих их физико-механические и эксплуатационные показатели, требует уточнения классической схемы производства асфальтобетонной смеси, определения последовательности введения добавок при производственном цикле или использование дополнительного технологического оборудования, обеспечивающего равномерность распределения за минимальное время смешивания.

Для обеспечения равномерного распределения добавок в структуре асфальтобетона ряд исследователей предлагают решить данный вопрос за счет конструктивных изменений смесителей, за счет изменения скорости вращения валов смесителя или изменением наклона лопаток смесителя [4–6]. Такой подход к обеспечению равномерного распределения всех компонентов в объеме асфальтобетонной смеси требует модернизации смесительного оборудования или его замены на новое, что может повлечь удорожание стоимости производства асфальтобетонной смеси.

Другие авторы предлагают использовать силовые поля для получения однородных структур асфальтобетона, ультразвуковую обработку, достигая дополнительно улучшения его водостойкости, трещиностойкости и сдвигустойчивости [7]. При использовании добавок в асфальтобетонной смеси с удельным весом, значительно отличающимся от удельного веса основных минеральных наполнителей, действие силовых полей может привести к сегрегации за счет разницы силового воздействия на частицы основного наполнителя и дополнительной добавки, если она представляет собой твердые частицы, а не модификатор битума, образуя с ним коллоидный раствор.

При технологическом процессе смешивания разнородных по своим физико-механическим свойствам материалов влияние оказывает и температура смешивания. При получении композиций, в состав которых входят материалы с разными температурами размягчения и плавления, значительную роль играет порядок смешивания компонентов [8; 9]. Производство асфальтобетонной смеси проходит при нагреве всех компонентов в смесителе от 145 до 160 °С. При использовании добавок в виде легкоплавких материалов возможна сегрегация асфальтобетонной смеси за счет неравномерного распределения более легкоплавких материалов в структуре асфальтобетона, за счет комкования добавочных материалов, слипания их, если температура их разогрева будет достаточна для их слипания.

Ряд авторов предлагают увеличить время перемешивания, тем самым сохраняется технологическое оборудование стандартного асфальтобетонного завода без изменения, меняется только продолжительность технологических операций [10]. Для асфальтобетонной смеси это не очень хороший вариант ввиду изменения свойств битума, связанных с потерей легких фракций углеводородов, которые обеспечивают подвижность и эластичность битума при низких температурах. При увеличении времени смешивания, которое проводится при температуре до 160 °С, асфальтобетон будет приобретать свойства более жесткой структуры, склонной к трещинообразованию под действием внешних и внутренних сил.

Ранее нами были проведены лабораторные исследования по использованию измельченных отходов полиэтилена низкого давления (ПНД) в качестве модификатора асфальтобетона [11; 12]. Ряд авторов в своих научных публикациях продемонстрировали потенциальные технические преимущества использования пластиковых отходов: в качестве модификатора битум использовали для получения асфальтобетонной смеси с повышенными потребительскими свойствами. Это позволяет повысить устойчивость к остаточной деформации, прочность, снизить хрупкость [13–19]. В большинстве опубликованных работ по использованию отходов ПНД в составе асфальтобетона не рассмотрен вопрос приготовления асфальтобетонной смеси. Как правило, в исследованиях указаны полученные результаты, без указания очередности смешивания компонентов.

В ходе проведения предварительного исследования было установлено, что на показатели асфальтобетона влияет очередность смешивания компонентов асфальтобетонной смеси с ПНД. Установлено, что при определенных режимах смешивания образовывались сгустки кусков ПНД. При других режимах требовалось повышенное время смешивания для получения однородной структуры асфальтобетонной смеси. Получение таких результатов показало важность установления процедуры смешивания минеральных компонентов, ПНД и битума при производстве асфальтобетонной смеси.

Материалы и методы исследования

Для установления влияния организации технологического процесса введения частиц ПНД в состав асфальтобетонной смеси, определения оптимальных условий были проведены исследования с использованием традиционных минеральных материалов, битума и частиц ПНД, выступавших в роли модификатора битума и структурорегулирующего элемента. Щебень, песок, отсев дробления (месторождения Пермского края) удовлетворяли требованиям ГОСТ 32703-14, ГОСТ 32730-2014, ГОСТ 32761-2014 битум – ГОСТ 33133-2014, частицы ПНД имели размеры: длина 25–35 мм; ширина 7–15 мм; толщина 0,2–0,35 мм. Для анализа была запроектирована асфальтобетонная смесь – Тип А, I марки. В ее состав вошли: щебень 11,2–16 мм

(32 %) и 5–8 (29 %); песок дробленый 0–4 (36 %); минпорошок МП-2 (3 %); битум БНД 90/130 (5,6 %); ПНД (17,5 % от массы битума, сверх 100 % минеральной части).

Для смешивания компонентов асфальтобетонной смеси был использован смеситель МЛА-30. Испытания полученных образцов асфальтобетона проводили в соответствии с ГОСТ 9128-2013 с учетом ПНСТ 184–2019 и ГОСТ 58406.2–2020, ГОСТ 12801–98.

Используемый измельченный ПНД имеет: удельную плотность – 0,931–0,970 г/см³, температуру плавления 125–132 °С; температуру размягчения 120–124 °С. При таких показателях эта добавка в асфальтобетонную смесь будет склонна: к комкованию – за счет слипания отдельных частиц при механическом воздействии на них в процессе перемешивания; сегрегации – за счет удельной плотности значительно ниже основных минеральных наполнителей и отсутствия создания коллоидных растворов с битумом. Для установления оптимальных условий смешивания компонентов асфальтобетонной смеси с использованием добавки, имеющей вышеуказанные физические характеристики, рассмотрены два варианта смешивания. Первый вариант: ПНД сначала смешивали с битумом (температура смешивания 135 °С), затем в смесь ввели предварительно смешанные и разогретые до 165 °С каменные материалы (щебень, песок отсева дробления). При втором варианте сначала смешивали частицы ПНД с каменными материалами при температуре 165 °С, затем в смесь добавили битум, разогретый до температуры 135 °С при непрерывном смешивании. Общее время процесса смешивания, составило 3 мин. Были сформированы по 5 образцов асфальтобетона на одно значение показателя.

Согласно ГОСТ Р 54400-2020 и ГОСТ 12801-98 для оценки однородности асфальтобетонной смеси используют метод, который заключается в статистической обработке значений показателей свойств смеси в выборке из лабораторного журнала проведения испытаний и оценке ее однородности по коэффициенту вариации показателя предела прочности при сжатии при температуре 50 °С для горячих смесей. Коэффициент вариации C_v является мерой отклонения опытных данных от среднего выборочного значения, выраженной в долях единицы или в процентах, и вычисляется по формуле

$$C_v = \frac{S_n}{X}, \quad (1)$$

где S_n – среднеквадратическое отклонение показателя свойств смеси; X – среднее значение показателя свойств смеси в объеме выборки.

Среднее значение показателя вычисляют как среднеарифметическое из частных значений, образующих выборку, по формуле

$$X = \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2)$$

где x_i – частное значение показателя свойств в i -й пробе; n – количество испытанных проб (объем выборки).

Среднеквадратическое отклонение вычисляют по формуле

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X - x_i)^2}{n - 1}}. \quad (3)$$

По величине среднеквадратического отклонения делают вывод о стабильности показателей асфальтобетона при производстве асфальтобетонной смеси. Большие значения данного показателя указывают на нестабильность показателей готовой смеси. Дополнительно были рассчитаны: дисперсия (средний квадрат отклонения); коэффициент осцилляции; коэффициент вариации. Значение коэффициента осцилляции указывает на величину размаха вариации относительно средних величин, что позволяет произвести сравнение данных при параллельных ис-

следованиях различных составов и условий технологического процесса производства. Коэффициент вариации позволяет исключить влияние масштабного фактора, позволяя сравнить однородность показаний с разным масштабом данных.

Результаты и их обсуждение

В ходе лабораторных исследований сформированные образцы асфальтобетона были испытаны на соответствие требованиям ГОСТ 9128-2013. Результаты проведенных испытаний асфальтобетонных образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели асфальтобетонов при различных вариантах смешивания

Показатель	ГОСТ 9128-2013	Допустимое расхождение между значениями ГОСТ 12801-98	Вариант смешивания № 1	Вариант смешивания № 2
Пористость минеральной части по объему, %	14,0–19,0	3%	19,2	19,5
Предел прочности при сжатии, МПа				
– при температуре 20 °С,	> 2,5	10%	4,59	5,48
– при температуре 50 °С,	> 1,0	10%	2,14	2,26
– при температуре 0 °С	< 11,0	10%	10,15	9,46
Водостойкость	> 0,90	–	0,99	1,00
Коэфф. водостойкости при длительном водонасыщении	> 0,85	10%	0,94	0,93
Сдвигоустойчивость по:				
– коэфф. внутреннего трения	> 0,87	–	0,94	0,93
– сцеплению при сдвиге при 50 °С, МПа	> 0,25	–	0,56	0,60
Трещиностойкость при расколе при 0 °С, МПа	2,5–6,0	–	3,10	2,91
Плотность, г/см ³	–	3%	2,47	2,45

Оценка однородности асфальтобетонной смеси на примере оценки ее основных показателей при различных вариантах смешивания представлена в табл. 2.

Таблица 2

Оценка однородности асфальтобетонной смеси

Показатель вариации	Пористость минеральной части, %		Предел прочности при 50°С, МПа		Коэффициент водостойкости при длительном водонасыщении		Сдвигоустойчивость по сцеплению при 50 °С, МПа	
	Вар №1	Вар №2	Вар №1	Вар №2	Вар №1	Вар №2	Вар №1	Вар №2
Максимум	20,8	20,1	2,32	2,28	0,99	0,94	0,6	0,64
Минимум	16,2	18,9	1,9	2,16	0,81	0,9	0,4	0,55
Размах вариации	4,6	1,2	0,42	0,12	0,18	0,04	0,2	0,09
Среднее линейное отклонение	1,496	0,384	0,150	0,038	0,0616	0,0112	0,0624	0,0272
Дисперсия по генеральной совокупности	2,78	0,19	0,03	1,25	0,0048	0,0002	0,0052	0,0010
Дисперсия по выборке	3,472	0,242	0,035	0,0024	0,0059	0,0002	0,0065	0,0012
Среднеквадратичное отклонение по генеральной совокупности	1,67	0,44	0,17	0,04	0,07	0,01	0,07	0,03
Среднеквадратичное отклонение по выборке	1,86	0,49	0,19	0,05	0,08	0,02	0,08	0,04
Коэфф. вариации, %	10	3	9	2	8	2	15	6
Коэфф. осцилляции, %	25	6	20	5	20	4	38	15

Во время проведения эксперимента производился визуальный контроль процессов смешивания компонентов асфальтобетонной смеси по первому и второму вариантам смешивания. При первом варианте за установленное время смешивания не удавалось равномерно распределить частицы ПНД в битуме. Частично частицы ПНД образовывали агломераты (частицы плавились и слипались между собой). Образовавшиеся агломераты не разбивались лопаткой смесителя. Загрузка каменных материалов в смеситель позволяла частично разбить агломераты, но для достижения равномерного распределения ПНД по всему объему необходимо было дополнительно затратить от 8 до 10 мин.

При втором варианте смешивания равномерное распределение частиц ПНД в среде каменных материалов достигалось за 1–1,5 мин. При последующем добавлении битума в смесь каменных материалов и ПНД агломерации частиц ПНД не наблюдались.

Оценка качества асфальтобетонной смеси по однородности с помощью коэффициентов вариации и осцилляции показала, что у образцов асфальтобетона, полученных по первому варианту смешивания компонентов, значения на 6–15 % выше, чем у образцов, полученных по второму варианту. Это указывает на формирование существенной неоднородности асфальтобетонной смеси, и, как следствие, асфальтобетон будет иметь значительную неоднородность своей структуры по объему. Это обусловлено тем, что частицы ПНД имеют более низкую плотность, по сравнению с каменными материалами, температуру плавления и размягчения ниже, чем температура производства асфальтобетонной смеси. Химическое взаимодействие ПНД и битума также не происходит (за исключением образования физико-химических связей при частичной деструкции структуры частиц ПНД), что указывает на то, что ПНД не выполняет функции матрицы как битум, а остается в качестве наполнителя.

Устройство слоев автомобильных дорог из такого асфальтобетона приведет к их быстрому разрушению, что будет характеризовать технологию утилизации отходов ПНД в асфальтобетонах как неэффективную. Научное обоснование технологических режимов использования ресурсного потенциала отходов при производстве востребованных на рынке продуктов позволяет повысить их эффективность и в больших объемах заместить природные сырьевые материалы на отходы потребления и промышленного производства.

Заключение

Проведенные исследования показали значимость процесса смешивания для формирования высоких стабильных показателей асфальтобетонов. При добавлении материалов в стандартную технологию производства асфальтобетонных смесей, которые характеризуются низкой температурой плавления и размягчения, удельной плотностью значительно ниже, чем каменные материалы, отсутствием способности создавать с битумом коллоидные растворы или полностью в нем растворяются, повышаются требования к процессу смешивания. На примере использования в качестве добавочного (структурорегулирующего) материала ПНД показано, что показатели асфальтобетона могут иметь отклонение до 15 % в зависимости от порядка смешивания компонентов асфальтобетонной смеси. Анализ полученных данных по оценке однородности асфальтобетонной смеси при различном варианте смешения компонентов позволяет установить, что более эффективным является вариант, при котором в начале производят смешивание частиц ПНД с каменными материалами, а затем в полученную смесь добавляют битум и производят окончательное смешивание.

Реализацию смешивания компонентов асфальтобетонной смеси в другой последовательности также возможно производить, но потребуются увеличение времени смешивания, использование конструкции смесителя, отличной от применяемых в настоящее время на асфальтобетонных заводах.

Использование новых компонентов в составе асфальтобетонной смеси требует уточнение классической технологической схемы. Необходимо иметь представление, в каком качестве будет выступать новый компонент – в качестве матрицы или наполнителя. Особенно это необходимо при использовании материалов, выступающих в качестве наполнителя в асфальтобетоне и имеющих значительное отличие по плотности и температуре плавления от минеральных компонентов асфальтобетонной смеси.

Список литературы

1. Sun, Yu Strength assessment and mechanism analysis of cement stabilized reclaimed lime-fly ash macadam / Yu Sun, Lihan Li // Construction and Building Materials. – 2018. – Vol. 166. – P. 118–129.

2. Зубова, О.В. Исследования сдвигоустойчивости дорожных битумозолоизвестняковых смесей / О.В. Зубова, Г.А. Бессараб // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2008. – Вып. 184. – С. 143–148.
3. Зубова, О.В. Дорожно-строительный материал на основе золопесчаной смеси, обработанной цементом и лесохимической добавкой / О.В. Зубова, Г.А. Бессараб, Н.А. Суворова // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2010. – Вып. 193. – С. 261–272.
4. Математическое описание процессов окончательной стадии смешения, проходящих во внешнем канале смесительной камеры / Н.С. Любимый, З.М. Костоев, И.С. Дурнев, А.С. Першин // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2019. – Т. 9, № 3(30). – С. 530–541. DOI: 10.21285/2227-2917-2019-3-530-541
5. Влияние пристеночного эффекта на вибрационное смешивание дисперсных материалов / И.А. Балагуров, В.Е. Мизонов, Н. Berthiaux, С. Gatumel // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 2. – С. 58–62.
6. Energy-saving technology of obtaining composite binders using technogenic wastes / A.A. Romanovich, M.A. Romanovich, A.I. Belov, E.I. Chekhovskoy // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 145. – P. 576–581. DOI: 10.1088/1742-6596/1118/1/012035
7. Петрянин, Б.И. Механоактивация битума и асфальто вяжущего вещества / Б.И. Петрянин, И.В. Субботин // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2009. – № 4(51). – С. 17–19.
8. Определение функциональных взаимосвязей механики смешивания частиц в процессе повторного производства асфальтобетона / Н.С. Любимый, А.Д. Змитрович, Б.С. Четвериков, А.В. Шеховцов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2019. – Т. 16, № 3(67). – С. 214–227.
9. Парамонова, М.С. Общие методы моделирования процессов смешения сыпучих материалов / М.С. Парамонова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 12. – С. 582–584.
10. Новые подходы в нормировании свойств компонентов и технологии приготовления асфальтобетона / А.И. Кудяков, А.К. Эфа, И.Н. Трофимов, А.Л. Базилевич // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2009. – № 1(48). – С. 18–21.
11. Пугин, К.Г. Использование полимерных материалов в качестве структурного элемента в составе асфальтобетона / К.Г. Пугин, О.В. Яконцева, В.К. Салахова // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2021. – № 4. – С. 29–36.
12. Пугин, К.Г. Использование отходов в структуре органоминеральных композитов, применяемых для строительства автомобильных дорог / К.Г. Пугин, В.К. Пугина // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2021. – № 2. – С. 38–46.
13. Franesqui, M.A. Improvement of moisture damage resistance and permanent deformation performance of asphalt mixtures with marginal porous volcanic aggregates using crumb rubber modified bitumen / M.A. Franesqui, J. Yepes, C. García-González // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 201. – P. 328–339. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.181
14. Utilization of polyethylene terephthalate (PET) in bituminous mixture for improved performance of roads / A.F. Ahmad, A.R. Razali, I.S.M. Razelan, S.S.A. Jalil, M.S.M. Noh, A.A. Idris // IOP Conf. Ser: Mater. Sci. Eng. – 2017. – Vol. 203. – P. 01200510. DOI: 10.1088/1757-899X/203/1/012005
15. Evaluation of lab performance of stamp sand and acrylonitrile styrene acrylate waste composites without asphalt as road surface materials / D. Jin, T.K. Meyer, S. Chen, K. AmpaduBoateng, J.M. Pearce, Z. You // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 338. – P. 127569. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127569
16. Environmental and economic assessment of collective recycling waste plastic and reclaimed asphalt pavement into pavement construction: A case study in Hong Kong / Linyi Yao, Zhen Leng, Jingting Lan, Ruiqi Chen, Jiwang Jiang // Journal of Cleaner Production. – 2022. – Vol. 336. – P. 130405.

17. Jianmin, Ma. Hesp, Effect of recycled polyethylene terephthalate (PET) fiber on the fracture resistance of asphalt mixtures / Ma Jianmin, A.M. Simon // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 342, Part A. – P. 127944. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127944
18. Duarte, Gabriel Macêdo. Asphalt concrete mixtures modified with polymeric waste by the wet and dry processes: A literature review / Gabriel Macêdo Duarte, Adalberto Leandro Faxina // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 312. – P. 125408. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125408
19. Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt / Esmaeil Ahmadiania, Majid Zargar, Mohamed Rehan Karim, Mahrez Abdelaziz, Payam Shafigh // *Materials & Design*. – 2011. – Vol. 32, iss. 10. – P. 4844–4849.

References

1. Yu Sun, Lihan Li Strength assessment and mechanism analysis of cement stabilized reclaimed lime-fly ash macadam // *Construction and Building Materials*. – Volume 166. – 2018. – pp. 118-129.
2. Zubova O.V., Bessarab G.A. Issledovaniia sdvigoustoichivosti dorozhnykh bitumozolozvestniakovykh smesei // *Izvestiia Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*– Vyp.184. – 2008. – S. 143-148.
3. Zubova O.V., Bessarab G.A., Suvorova N.A. Dorozhno-stroitel'nyi material na osnove zolopeschanoi smesi, obrabotannoi tsementom i lesokhimicheskoi dobavkoi // *Izvestiia Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*. – Vyp.193. – 2010. – S. 261-272.
4. Matematicheskoe opisanie protsessov okonchatel'noi stadii smesheniia, prokhodiashchikh vo vneshnem kanale smesitel'noi kamery / N. S. Liubimyi, Z. M. Kostoev, I. S. Durnev, A. S. Pershin // *Izvestiia vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. – 2019. – T. 9, № 3(30). – S. 530-541. – DOI 10.21285/2227-2917-2019-3-530-541.
5. Balagurov I.A., Mizonov V.E., Berthiaux H., Gatumel C. Vliianie pristenochnoogo effekta na vibratsionnoe smeshivanie dispersnykh materialov // *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2015. № 2. S. 58-62.
6. Romanovich A.A., Romanovich M.A., Belov A.I., Chekhovskoy E.I. Energy-saving technology of obtaining composite binders using technogenic wastes // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. V. 145. P. 576-581. DOI: 10.1088/1742-6596/1118/1/012035
7. Petrianin, B. I. Mekhanoaktivatsiia bituma i asfal'toviazhushchego veshchestva / B. I. Petrianin, I. V. Subbotin // *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli*. – 2009. – № 4(51). – S. 17-19.
8. Opreделение funktsional'nykh vzaimosviazei mekhaniki smeshivaniia chastits v protsesse povtornogo proizvodstva asfal'tobetona / N. S. Liubimyi, A. D. Zmitrovich, B. S. Chetverikov, A. V. Shekhovtsov // *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*. – 2019. – T. 16, № 3(67). – S. 214-227.
9. Paramonova M.S. Obshchie metody modelirovaniia protsessov smesheniia sypuchikh materialov // *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2018. № 12. S. 582-584.
10. Novye podkhody v normirovanii svoistv komponentov i tekhnologii prigotovleniia asfal'tobetona / A. I. Kudiakov, A. K. Efa, I. N. Trofimov, A. L. Bazilevich // *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli*. – 2009. – № 1(48). – S. 18-21.
11. Pugin K.G., Iakontseva O.V., Salakhova V.K. Ispol'zovanie polimernykh materialov v kachestve strukturnogo elementa v sostave asfal'tobetona // *Transport. Transportnye sooruzheniia. Ekologiya*. 2021. №4. S. 29-36.
12. Pugin K.G., Pugina V.K. Ispol'zovanie otkhodov v strukture organomineral'nykh kompozitov, primeniaemykh dlia stroitel'stva avtomobil'nykh dorog // *Transport. Transportnyesooruzheniia. Ekologiya*. 2021. № 2. S. 38-46.
13. M.A. Franesqui, J. Yepes, C. García-González, Improvement of moisture damage resistance and permanent deformation performance of asphalt mixtures with marginal porous volcanic aggregates using crumb rubber modified bitumen, *Construction and Building Materials*. 201 (2019) 328–339, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.181>.
14. A.F. Ahmad, A.R. Razali, I.S.M. Razelan, S.S.A. Jalil, M.S.M. Noh, A.A. Idris, Utilization of polyethylene terephthalate (PET) in bituminous mixture for improved performance of roads, *IOP Conf. Ser: Mater. Sci. Eng.* 203 (2017) 01200510, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/203/1/012005>.
15. D. Jin, T.K. Meyer, S. Chen, K. AmpaduBoateng, J.M. Pearce, Z. You, Evaluation of lab performance of stamp sand and acrylonitrile styrene acrylate waste composites without asphalt as road surface materials, *Construction and Building Materials*. 338 (2022), 127569, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127569>
16. Linyi Yao, Zhen Leng, Jingting Lan, Ruiqi Chen, Jiwang Jiang, Environmental and economic assessment of collective recycling waste plastic and reclaimed asphalt pavement into pavement construction: A case study in Hong Kong // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 336. 130405.
17. Jianmin Ma, Simon A.M. Hesp, Effect of recycled polyethylene terephthalate (PET) fiber on the fracture resistance of asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, Volume 342, Part A, 2022, 127944 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127944>.
18. Gabriel Macêdo Duarte, Adalberto Leandro Faxina, Asphalt concrete mixtures modified with polymeric waste by the wet and dry processes: A literature review, *Construction and Building Materials*, Volume 312, 2021, 125408 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125408>.
19. EsmaeilAhmadiania, Majid Zargar, Mohamed Rehan Karim, MahrezAbdelaziz, PayamShafigh. Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt // *Materials & Design*. 2011. Vol. 32, Issue 10. P. 4844-4849.

Об авторе

Пугин Константин Георгиевич (Пермь, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор кафедры строительных технологий, Пермского государственного аграрно-технологического университета имени академика Д.Н. Прянишникова (614990, г. Пермь, Петропавловская ул., 23); профессор Пермского филиала Волжского государственного университета водного транспорта (e-mail: 123zzz@rambler.ru).

About the author

Konstantin G. Pugin (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Technologies, Perm State Agro-Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov (23, Petropavlovskaya st., Perm, 614990, Russian Federation); Professor of the Department of Specialties of Water Transport and Transport Management, Perm Branch of the Volga State University of Water Transport (e-mail: 123zzz@rambler.ru).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Поступила: 05.12.2024

Одобрена: 20.01.2025

Принята к публикации: 15.03.2025

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Пугин, К.Г. Повышение композиционной однородности асфальтобетонных смесей / К.Г. Пугин // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2025. – № 1. – С. 43–51. DOI: 10.15593/24111678/2025.01.04

Please cite this article in English as: Pugin K.G. Increasing the compositional homogeneity of asphalt concrete mixtures. *Transport. Transport facilities. Ecology*, 2025, no. 1, pp. 43-51. DOI: 10.15593/24111678/2025.01.04