
ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Научная статья

УДК 625.855.3:665.775

DOI: 10.70991/1815-896X-2026-1-55-254-272

EDN: KCOFTQ



**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИИ «СУХОГО» ВВОДА
МОДИФИКАТОРОВ НА БАЗЕ ПОЛИМЕРОВ ТИПА SBS
В АСФАЛЬТОБЕТОННУЮ СМЕСЬ**

**Светлана Владленовна Полякова^{1✉}
Юрий Эммануилович Васильев²**

¹Российский дорожный научно-исследовательский институт
(ФАУ «РОСДОРНИИ»), Москва, Россия

²Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ), Москва, Россия

¹polyakovasv@rosdornii.ru✉; ORCID: 0009-0005-4493-095X

²vashome@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-1634-0152

Аннотация: В России в настоящее время отсутствуют какие-либо руководящие документы, регламентирующие процесс «сухого» ввода полимеров типа стирол-бутадиен-стирол SBS непосредственно на асфальтобетонных заводах (АБЗ), и применение асфальтобетонных смесей по данной технологии. Широкий опыт применения полимеров SBS (около 30 лет) в дорожном хозяйстве включает только «мокрый» способ их введения в битум с получением полимерно-битумного вяжущего (ПБВ), применение которого регламентируется ГОСТ Р 52056-2025 (ранее ГОСТ Р 52056-2003).

В последнее десятилетие в зарубежной практике особое внимание уделяется изучению возможности применения модификаторов на базе полимеров типа SBS, вводимых в минеральную часть асфальтобетонной смеси по «сухой» технологии непосредственно в асфальтосмесительный узел на АБЗ, что в значительной степени упрощает технологический процесс производства, позволяет оптимизировать расходы, снизить

потребление энергии при производстве полимерасфальтобетонных смесей, уменьшить загрязнение окружающей среды.

Мировые исследования, проводимые в данном направлении, могут послужить технологической основой для дальнейшей разработки и внедрения на территории России новой технологии «сухого» ввода модификаторов на базе SBS, позволяющей повысить долговечность асфальтобетонного покрытия при снижении энергозатрат и общей стоимости производства.

Ключевые слова: *модификаторы на базе полимеров типа SBS, «сухой» способ модификации, асфальтобетонная смесь.*

Для цитирования: Полякова С.В., Васильев Ю.Э. Эффективность технологии «сухого» ввода модификаторов на базе полимеров типа SBS в асфальтобетонную смесь // Дороги и мосты. 2026. № 55/1. С. 254-272. DOI: 10.70991/1815-896X-2026-1-55-254-272.

ROAD CONSTRUCTION MATERIALS

Original article

EFFICIENCY OF THE TECHNOLOGY OF «DRY» INTRODUCTION OF MODIFIERS BASED ON SBS TYPE POLYMERS INTO ASPHALT CONCRETE MIXTURE

Svetlana V. Polyakova¹✉
Yuri E. Vasiliev²

¹FAI «ROSDORNII», Moscow, Russia

²Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI),
Moscow, Russia

¹polyakovasv@rosdornii.ru✉; <https://orcid.org/0009-0005-4493-095X>

²vashome@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1634-0152>

Abstract: *In Russia, there are currently no guidelines regulating the process of «dry» introduction of styrene-butadiene-styrene SBS polymers directly into asphalt concrete plants and application of asphalt concrete mixtures using this technology. Extensive experience with the use of SBS polymers (approximately 30 years) in the road industry includes only the «wet» method of introducing SBS polymer in-*

to bitumen to produce a polymer-bitumen binder (PBB), the use of which is regulated by GOST R 52056-2025 (formerly GOST R 52056-2003).

Over the past decade, international practice has focused on exploring the feasibility of using SBS-based polymer modifiers, introduced into the mineral portion of asphalt concrete mixes using a «dry» method directly in the asphalt mixing unit at asphalt concrete plants. This significantly simplifies the production process, optimizes costs, and reduces energy consumption during the production of polymer asphalt concrete mixtures and environmental pollution.

Global research conducted in this area can serve as the technological basis for the further development and implementation in Russia of a new technology for the «dry» introduction of SBS-based modifiers, which can increase the durability of asphalt concrete pavements while reducing energy consumption and overall production costs.

Keywords: SBS-based polymer modifiers, «dry» modification method, asphalt concrete mix.

For citation: Polyakova S.V., Vasiliev Yu.E. Efficiency of the technology of «dry» introduction of modifiers based on SBS type polymers into asphalt concrete mixture // Roads and Bridges. 2026; (55/1): 254-272 (In Russ.). DOI: 10.70991/1815-896X-2026-1-55-254-272.

ВВЕДЕНИЕ

Различают три основных вида повреждений асфальтобетонных покрытий: растрескивание при низкой температуре, усталостное растрескивание при средних значениях температуры и остаточная деформация при высокой температуре (колеобразование). В настоящее время процесс устойчивости асфальтобетонного покрытия к различным видам повреждений регулируют путем *модификации битума* полимерами. В мировой практике такие типы полимерных модификаторов битума, как термопластичные эластомеры класса SBS и синтетический стирол-бутадиеновый каучук (SBR) нашли наиболее широкую область применения, позволяя улучшить комплекс его свойств [1-3]. Наряду с эластомерами применение нашли и термопластичные пластимеры: этиленвинилацетат (EVA), метилакрилатэтилен (EMA), полипропилен (PP), полиэтилен (PE).

Принципиальный механизм регулирования свойств битума разными полимерами состоит в создании развитой сетки полимера в битуме, в который он добавляется. В **табл.1** приведены схематические изображения основных типов структуры модификаторов, применяемых в дорожном строительстве.

Таблица 1

**Схематические изображения основных типов
структуры модификаторов**

Тип модификатора	Схематическое изображение структуры
<i>Термоэластопласты</i> (полимеры типа стирол-бутадиен-стирол (SBS))	
<i>Термопласты</i> (этиленвинилацетат, метилакрилатэтилен, полипропилен, полиэтилен)	
<i>Термореактивные эластомерные полимеры</i> (каучук, девулканизированная резина)	

Результаты модификации в каждом отдельном случае зависят от структуры модификатора, его совместимости с битумом, их количественного соотношения, технологии производства (температурных режимов приготовления, продолжительности, эффективности смесительной установки) и других факторов.

К одной из важных технологических особенностей SBS-полимеров можно отнести их *совместимость* с битумом. Именно *стирольные блок-сополимеры (SBS)* обладают наибольшим технологическим потенциалом при смешивании с битумом ввиду лучшей их совместимости [4-6]. Другими словами, полимеры типа SBS наиболее технологически совместимы с битумом и при этом отличаются от других полимеров способностью к высокоэластическим деформациям за счет работы пространственной структурной сетки, образованной благодаря физическим связям между блоками макромолекул бутадиена и стирола (**табл. 1**). Эластомеры типа SBS обладают такими физико-механическими свойствами, как эластичность, прочность, термическая стабильность. В

составе асфальтобетонной смеси данные полимеры позволяют улучшить комплекс эксплуатационных характеристик покрытия, а именно, устойчивость к колееобразованию, термическому и усталостному растрескиванию. Именно их способность повышать устойчивость и долговечность асфальтобетонных покрытий как при высоких, так и при низких температурных режимах выгодно отличает их от других модификаторов битума (полиэтилен (PE), полипропилен (PP), этиленвинилацетат (EVA), хлоропреновый каучук (CR), стирол-изопреновый каучук (SIR), этиленпропиленовый каучук (EPDR) и др.).

Особенно важным условием для достижения положительного эффекта при применении эластомеров в асфальтобетонном покрытии является выполнение ряда требований: отсутствие *фазового расслоения вяжущего* в процессе хранения и транспортировки, обеспечение удобоукладываемости асфальтобетонных смесей, достижение заданной плотности асфальтобетона в более короткий период времени, напрямую зависящих от соблюдения температурных режимов укладки, а также другие особенности производства.

Традиционная технология «мокрого» ввода полимеров типа SBS (в битум)

Следует понимать, что традиционной и основной широко распространенной технологией как на территории России, так и в мире является модификация битума полимерами типа SBS, осуществляемая путем их непосредственного введения в битум. В России применение полимеров типа SBS регламентирует *ГОСТ Р 52056-2025 «Вяжущие полимерно-битумные дорожные на основе блоксополимеров типа стирол-бутадиен-стирол. Технические условия»* (ранее ГОСТ Р 52056-2003). Один из примеров зарубежного стандарта – EN 14023:2010¹, который регламентирует требования к полимерному модифицированному битуму (PmB) для дорог, гоночных трасс и аэродромов, где требуется достижение высокого уровня качественных показателей. Однако традиционная технология не лишена недостатков и требует решения ряда дополнительных производственных трудностей, связанных с необходимостью получения промежуточного продук-

¹ «Bitumen and bituminous binders – Specification framework for polymer modified bitumens» (Битум и битумные связующие. Конструктивные технические условия для битумов, модифицированных полимером).

та (полимерно-битумного вяжущего, ПБВ/PmB) для последующего производства асфальтобетонных смесей.

С точки зрения энергии и экологии, приготовление модифицированного битума «мокрым» способом на практике требует от 30 мин до 3 ч смешивания первичного SBS с битумом при высокой температуре (175-180 °С) и дополнительного времени дозревания от 3 до 6 ч в емкостях с принудительным перемешиванием. Для поддержания высокой температуры необходимо использовать большое количество топлива, что приводит к значительному потреблению энергии и образованию парниковых газов, повышению углеродного индекса и воздействия на окружающую среду.

Обязательным условием является необходимость увеличения затрат на модернизацию процесса с дооснащением производства эффективным смесительным оборудованием, емкостным и насосным парком для хранения и транспортировки ПБВ, на дополнительную перевозку ПБВ от производителя поставщикам, на покрытие увеличивающихся временных издержек на лабораторный контроль качества продукта и др. Кроме того, возникает необходимость создания условий для поддержания качества ПБВ в заданный период хранения с сохранением его первоначальных свойств. Следует исключать возможность старения готового вяжущего, деструкцию полимера при нагреве вяжущего, расслоения продукта при хранении и транспортировке, что может привести к снижению качества асфальтобетонных смесей.

Новая технология «сухого» ввода модификаторов на базе полимеров типа SBS (в асфальтобетонную смесь)

По сравнению с «мокрым» способом «сухой» способ модификации асфальтобетонной смеси предполагает совместное смешение всех компонентов асфальтобетонной смеси, в том числе и модификатора, непосредственно на АБЗ, и считается наиболее рациональным, что позволяет производить процесс практически на любом действующем производстве, не изменяя его традиционной технологии и снижая внутренние расходы предприятия (энергозатраты – на 15-25 %, включая расход топлива, электроэнергии, трудовые, складские и др.).

Однако на практике «сухой» способ модификации традиционными полимерами типа SBS в составе смеси минеральных материалов широко не применяется в виду невозможности полного

раскрытия всего потенциала дорогостоящего полимера в составе асфальтобетона: большая часть полимера (не успевая раствориться в битуме) будет работать как наполнитель. Можно предположить, что качество конечного продукта (асфальтобетонной смеси) возможно будет улучшить при увеличении количества полимера в составе смеси, что также приведет к ее удорожанию.

В ходе поиска литературных источников, посвященных данному вопросу (введению эластомеров типа SBS непосредственно в минеральную часть асфальтобетонной смеси на АБЗ по «сухой» технологии) было установлено, что зарубежные исследования в этом перспективном направлении ведутся уже на протяжении десятилетия [7-10]. Исследователи различных стран изучали возможность повышения качества асфальтобетонных смесей путем их модификации *сухим способом с использованием наиболее эффективных полимеров типа SBS*. Так, в 2009 г. в Гренландии был разработан гранулированный состав модификатора на основе SBS, который предлагалось добавлять непосредственно в смеситель «сухим» способом вместе с заполнителями [11]. Введение и смешение SBS-сополимера с минеральной частью асфальтобетонной смеси «сухим» способом, позволило повысить устойчивость дорожного покрытия к колееобразованию по сравнению с традиционной асфальтобетонной смесью, используемой в Гренландии. Отмечалось, что полимерный модификатор на основе SBS-сополимера не полностью проходил стадию набухания и растворялся в битуме, а модифицированная асфальтобетонная смесь по ряду качественных показателей не соответствовала действующим требованиям.

В мировой практике на «сухую» технологию смешивания полимеров типа SBS разработаны патенты и проводятся научные исследования в данном направлении. Например, патент Китая [12] описывает получение модификатора «сухого» ввода, включающего в свой состав первичный полимер типа SBS. Одна из технологий включает получение гранул, содержащих: 65-75 частей полимера SBS; 5-10 частей флюса; 5-10 частей лигроина и 10-15 частей специальной добавки. Данные гранулы на основе SBS предлагается вводить напрямую в смеситель АБЗ при смешивании компонентов асфальтобетонной смеси, с получением конечного продукта, обладающего высокими эксплуатационными характеристиками. Отмечается, что данная технология отличается рядом преимуществ: простотой в производстве, низким по-

треблением энергии и уровнем выбросов в окружающую среду, низкой стоимостью, подтвержденной эффективностью и экологичностью применения.

Следует отметить, что модификатор «сухого» ввода в основном может состоять из измельченного SBS с добавлением различных присадок, включая EVA, нефтяное масло, серу, нефтяную смолу, компатибилизаторы, антиоксиданты и другие присадки. Зачастую SBS и присадки равномерно смешиваются в определенной пропорции, а затем подаются в двухшнековый экструдер для плавления и гранулирования до размера частиц менее 2 мм.

В статье [13] приведены результаты исследований по влиянию модификатора на базе SBS «сухого» ввода на качество асфальтобетонной смеси, при этом к применению рекомендуется состав, включающий следующие соотношения компонентов:

SBS : EVA : naphthenic oil : EVA-g-MAH : BHT = 1 : 0.1–0.5 : 0.05–0.2 : 0.03 : 0.05.

В другом источнике [14] раскрывается сам механизм модификации, метод оценки и технология введения модификатора SBS в асфальтобетонную смесь. Отмечается, что по сравнению с процессом «мокрого» ввода новая технология позволяет избежать проблем с контролем качества в процессе производства асфальтобетонной смеси, а также не требует специального производственного оборудования, длительного хранения ПБВ при высоких температурах и его транспортировки, что дает преимущества в части низкой стоимости, энергопотребления, уровня выбросов, отсутствия расслоения, а также простоты и снижения продолжительности процесса. Модификатор SBS, разработанный китайской компанией Yuan, включает полимер SBS с размером частиц менее 200 мкм², серу (S), тетраметилтиурамдисульфид (TMTD), оксид цинка (ZnO) и каолин (2SiO₂–Al₂O₃–2H₂O) [15].

Именно в Китае был разработан единственный отраслевой документ *T/CHTS 20003-2018 «Техническое руководство по производству смеси и устройству асфальтобетонного покрытия с прямым введением SBS-модификатора на заводе»*, в котором регламентируются технические характеристики модификаторов на основе SBS, а также методы проектирования смеси, процесс смешивания и технологии укладки асфальтобетонных смесей [16]. Данный документ, опубликованный China Communications Press в Пекине в 2018 г., фокусируется на «сухом» способе мо-

² Примерно 75 микрон.

дификации и предназначен для упрощения технологии производства полимерасфальтобетонной смеси и возможности повышения эксплуатационных характеристик покрытия на ее основе.

Механизм взаимодействия модификатора «сухого» ввода на базе SBS с заполнителем

В процессе сухого смешивания модификатора с заполнителем высокая температура под действием силы сжатия, сдвига, центробежной силы и силы тяжести заполнителя позволяет расплавить модификатор и перевести его из высокоэластичного состояния в течение вязкой среды, а уже в присутствии битума образовать на поверхности заполнителя тонкую битумно-полимерную пленку. Механизм действия, основанный на принципе мгновенного растворения, включает следующие стадии: смешивание, плавление полимера, его набухание в присутствии битума с образованием поперечных связей и взаимодействие с заполнителем [17-19] (рис.1).

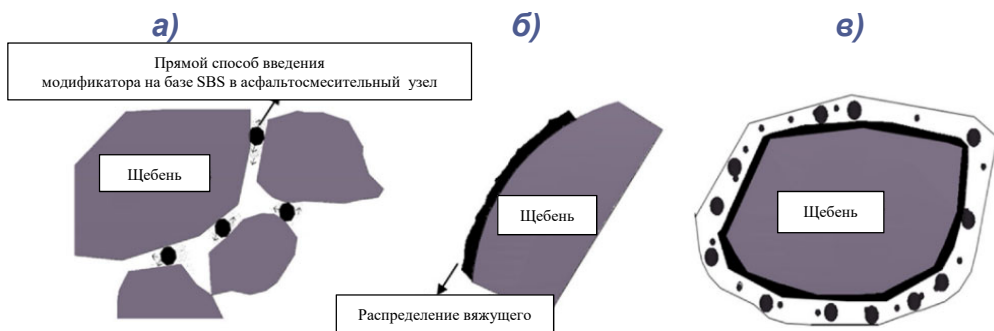


Рис. 1. Механизм взаимодействия модификатора с заполнителем при «сухом» вводе:

- а) стадия смешивания; б) стадия вязкого течения; в) стадия набухания с образованием поперечных связей [14]*

В исследованиях³ методом молекулярной динамики (МД) было изучено поведение поверхности раздела сухих смесей, а также взаимодействие модификатора на базе SBS (65 % от массы модификатора) с битумом, связанное с его содержанием, тем-

³ Zijun Zhang, Wenda Yan, Huadong Sun, Yongling Ding & Fuqiang Dong. Evaluation on the interface characteristics, mechanism and performance of the dry modified SBS asphalt mixtures by multiscale methods. Scientific Reports volume15, Article number: 11393 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91868-2>.

пературой и временными рамками. Порошок SBS линейной структуры с размером частиц 180-270 мкм имел плотность 1,157 г/см³, индекс текучести расплава (Melt Flow Index, MFI⁴) – 16,5 г/10 мин, при быстром плавлении при температурах 180-185 °С.

Характерные изображения, полученные в результате моделирования, показаны на **рис. 2**. Модель взаимодействия состоит из трех слоев: слоя битума (верхний), слоя модификатора SBS (средний) и слоя заполнителя (нижний). На **рис. 2 а** показана начальная стадия, на которой три вещества отделены друг от друга, что соответствует этапу предварительного моделирования. На **рис. 2 б** показана вторая стадия, на которой видно, что три материала начали контактировать. На **рис. 2 в** показана третья стадия, на которой молекулы SBS начинают диффундировать. И, наконец, на **рис. 2 г** показана конечная стадия, когда молекулы SBS полностью интегрируются в битумную матрицу и плотно адсорбируются на слое заполнителя. Кроме того, модификатор на базе SBS поглощает мальтеновые компоненты битума, вызывая набухание и постепенно формируя пространственную сетчатую структуру. Регулируя ключевые факторы, такие как дозировка SBS, условия смешивания и продолжительность хранения, можно улучшить эксплуатационные характеристики асфальтобетонных смесей.

Таким образом, при молекулярном моделировании асфальтобетонная смесь при сухом вводе модификатора на базе SBS демонстрирует перспективные результаты для достижения эффективного уровня модификации при использовании такой технологии в дорожном строительстве. Рассмотренное практическое руководство применимо как для лабораторных исследований, так и для промышленного использования и дает ценную информацию о производстве и оптимизации сухой модификации асфальтобетонных смесей на основе полимеров типа SBS.

Технология «сухого» ввода SBS на АБЗ проста, прозрачна, с точки зрения управления качеством, и включает следующие этапы: введение модификатора на основе SBS-порошка в асфальтосмесительный узел, его перемешивание с горячим заполнителем в течение 5-15 с (и более) при температуре 175-185 °С, затем введение битума, минерального порошка и совместное пе-

⁴ ASTM D1238.

ремешивание в течение 35-45 с (и более) до однородного состояния смеси.

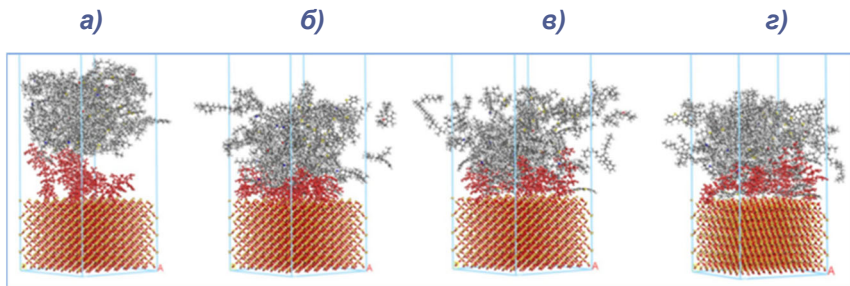


Рис. 2. Процесс моделирования взаимодействия SBS при сухом вводе в асфальтобетонную смесь:

а) начальная стадия моделирования; б) стадия контактирования; в) стадия диффузии SBS; г) конечная стадия моделирования (молекулы SBS интегрируются в битуме и на поверхности заполнителя)

Количество модификаторов на базе SBS «сухого» ввода составляет 2-5 % (и более) от массы битума в смеси и подбирается в зависимости от проектных эксплуатационных характеристик асфальтобетона.

На **рис. 3** приведена схема производства асфальтобетонной смеси, модифицированной на базе SBS «сухого» ввода.

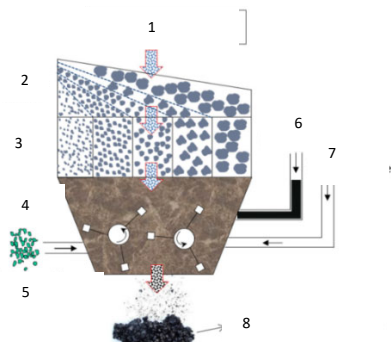


Рис. 3. Схема производства асфальтобетонной смеси, модифицированной на базе SBS, в асфальтосмесителе [20]:

1 - минеральная смесь поле подогрева и обеспылевания; 2 – устройство отбора; 3 – бункер горячий; 4 – бункер для смешивания; 5 – прямое введение SBS-модификатора; 6 – основной битум; 7 – минеральный порошок; 8 – выгрузка асфальтобетонной смеси, модифицированной SBS прямым способом

Общая технологическая последовательность «сухого» ввода SBS на АБЗ

Таким образом, SBS-модификаторы, предназначенные для «сухого» ввода непосредственно в смесителе АБЗ, представляют собой частицы SBS малого размера в качестве основы, дополненные различными добавками. Действие таких модификаторов основано на принципе быстрой растворимости, повышенной эффективности плавления и хорошей совместимости с битумом. Кроме того, получение SBS-модификаторов для «сухого» ввода, основано на принципе *отсутствия окатанных частиц полимера и специального формирования шероховатостей разной высоты на поверхности его частиц*, что существенно позволяет повысить площадь контакта с битумом, улучшить их растворимость и эффективность процесса производства.

В настоящее время в Китае продолжают исследования возможности производства асфальтобетонной смеси с применением модификаторов на базе полимеров типа SBS для «сухого» ввода без промежуточного этапа производства ПБВ. На **рис. 4** показан новый модификатор на основе SBS, а именно высокоэффективный, быстроплавкий модификатор марки SBS-T [21]. Отмечается, что модификатор на базе SBS для «сухого» ввода плавится в течение первой минуты в составе асфальтобетонной смеси при смешивании на АБЗ. Индекс плавления нового модификатора в 100 раз выше, а размер его измельченных частиц составляет 1:100 от размера по сравнению с традиционными гранулами модификатора на базе SBS.



Рис. 4. Новый модификатор на основе SBS (Китай) в сравнении с обычным SBS-модификатором

В табл. 2 приведены основные сравнительные сведения о модификаторах.

Таблица 2

Общие сведения о модификаторах

<i>Характеристика</i>	<i>Чистый SBS</i>	<i>Модификатор SBS-T</i>
<i>Общий вид</i>		
<i>Содержание SBS, %</i>	100	≥50

В научной работе [22] приведены исследования по оценке адгезионных свойств быстроплавкого модификатора марки SBS-T в сравнении с традиционным SBS. Авторы сообщают, что при равных условиях когезия и адгезия с модификатором SBS-T между вяжущим и заполнителем по мере увеличения его дозировки повышается.

В исследовании [23] приводятся результаты, подтверждающие эффективность применения быстроплавкого модификатора марки SBS-T, позволяющего повысить ряд качественных характеристик асфальтобетона, а именно, адгезионные свойства, модуль упругости, жесткость, устойчивость к усталости и другим видам деформации.

В настоящее время в мировой практике продолжают исследования по оптимизации процесса «сухой» модификации асфальтобетонной смеси, как наиболее простого и экологически приемлемого способа повышения эксплуатационных характеристик асфальтобетона [24-26].

ВЫВОДЫ

1. Мировой опыт подтверждает эффективность применения полимеров типа SBS в составе ПБВ при традиционном «мокром» способе их введения, позволяющих повысить эксплуатационные характеристики асфальтобетона и долговечность асфальтобетонного покрытия.

2. Новый «сухой» способ введения модификаторов на базе полимеров типа SBS считается наиболее рациональным и предполагает совместное смешение всех компонентов асфаль-

тобетонной смеси непосредственно в асфальтосмесительной установке. Технология «сухого» ввода модификатора на базе SBS отличается рядом преимуществ и позволяет осуществлять процесс практически на любом действующем производстве, не изменяя его традиционной технологии, исключает высокотемпературное производство промежуточного продукта (PmB/ПБВ), на 15-25 % снижает энергозатраты (расход топлива, электроэнергии, суммарные энергозатраты), уменьшает стоимость конечного продукта (асфальтобетонной смеси), что в свою очередь подтверждает эффективность и экологичность его применения.

3. В мировой практике разработан и действует единственный отраслевой документ по производству смеси и устройству асфальтобетонного покрытия с прямым введением модификатора на базе SBS непосредственно в асфальтосмесительной установке, в котором регламентируются технические характеристики модификаторов на основе SBS, а также методы проектирования смесей, процесс смешивания и технология укладки асфальтобетонных смесей [16]. В настоящее время в ряде стран продолжают исследования возможности дальнейшей оптимизации производственного процесса новой инновационной технологии.

4. При «мокром» и «сухом» способах модификации степень распределения модификатора на базе SBS в составе асфальтобетонной смеси различна. При «сухом» вводе степень распределения SBS несколько хуже, однако данный одностадийный способ позволяет упростить производство, точно контролировать качество асфальтобетонной смеси, снизить затраты на производственное оборудование, транспортировку и хранение, а также решить проблемы, связанные с расслаиванием традиционного ПБВ. Такой подход имеет несомненные перспективы применения и исследовательскую ценность.

Крупные российские производители полимеров SBS могут расширить рынок сбыта в дорожном хозяйстве, предлагая готовые гранулированные модификаторы для «сухого» применения в составе асфальтобетонных смесей, позволяющие повысить эксплуатационные характеристики асфальтобетонного покрытия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Alatas, T. *Effects of different polymers on mechanical properties of bituminous binders and hot mixtures* / T. Alatas, M. Yilmaz // *Construction and Building Materials*. – 2013. – V. 42(5). – P. 161-167. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.027.
2. Khodaii, A. *Evaluation of permanent deformation of unmodified and SBS modified asphalt mixtures using dynamic creep test* / A. Khodaii, A. Mehrara // *Construction and Building Materials*. – 2009. – V. 23(7). – P. 2586-2592. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.015.
3. Brown S.F., R.D. Rowlett, J.L. Boucher. *Asphalt modification*. – Highway research: sharing the benefits / *Proceedings of the conference «The United States Strategic Highway Research Program»*, 29-31 October 1990. – ICE Publishing. – 1991. – PP. 181-203. DOI: <https://doi.org/10.1680/hrstb.16354.0017>.
4. Bull A.L., W.C. Vonk. *Thermoplastic rubber/bitumen blends for roof and road*. – Shell Chemicals Technical Manual TR 8.15, 1984. – London: Shell International Petroleum Company Publishing.
5. Bonemazzi F. et al. *Correlation between the properties of polymers and polymer modified bitumens* / *Proceedings of the Eurobitume and Eurasphalt Congress*, 7-10 May 1996. Strasbourg. – 17 P.
6. Henderson J.F., Szwarc M. *The use of living polymers in the preparation of polymer structures of controlled architecture* // *Journal of Polymer Science: Macromolecular Reviews*, 1968, Vol. 3, Iss: 1, pp 317-401.
7. Luo, H., Zheng C., Yang X., Bao C. *Development of technology to accelerate SBS-modified asphalts swelling in dry modification mode*. *Constr. Build. Mater.* 2022, 314(10), 125703. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125703.
8. Янь, С.; У, Д.; Ху, К.; Чжан, В.; Син, Д.; Цуй, Л.; Ши, С.; Ян, Д.; Ян, Ч. *Механизм модификации, метод оценки и технология создания модификаторов SBS, используемых непосредственно на заводе, в асфальтобетонной смеси: обзор. Полимеры* 2023, 15, 2768. <https://doi.org/10.3390/polym15132768>.
9. Men, B.; Guo, F.; Kang, X.; Yue, J. *Research on the Adhesion Properties of Fast-Melting SBS-Modified Asphalt-Aggregate Based on Surface Free Energy Theory*. *Materials*. 2023, 16, 7601. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16247601>.
10. Fan Y, Xie JG, Wang ZQ. *Research the Microstructure and Properties of Modified Asphalt from Dry SBS-T*. *KEM* 2020; 861:473-81. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.861.473>.
11. *Строительство асфальтового покрытия с добавлением смеси на основе SBS с использованием сухого процесса в Гренландии»: материалы 6-й Международной конференции по содержанию, ремонту и технологическому контролю дорожных покрытий – 2009, с. 493-498.*
12. Ван, Л.З. *Модификатор SBS прямого смешивания и способ его получения. Патент Китая № 201510178483, 23 ноября 2016 г. (на китайском языке). One directly mixes formula SBS modifier and preparation method thereof*. <https://patents.google.com/patent/CN106147108A/en?peid=6501ef6ab62e0%3A4e%3Ad94cf23a>.
13. *The Effect of Direct-to-Plant Styrene-Butadiene-Styrene Block Copolymer Components on Bitumen Modification*. Wengang Zhang, Zhirong Jia, Yixia Zhang,

- Kui Hu, Longting Ding, Fang Wang // *Polymers* 2019, 11(1), 140; <https://doi.org/10.3390/polym11010140>.
14. The Modification Mechanism, Evaluation Method, and Construction Technology of Direct-to-Plant SBS Modifiers in Asphalt Mixture: A Review. Yan X, Wu D, Hu K, Zhang W, Xing J, Cui L, Shi S, Yang J, Yang C. // *Polymers (Basel)*. 2023 Jun. 21;15(13):2768. DOI:10.3390/polym15132768.
 15. Comparative Study on the Stability of SBS Modified Asphalt with M Resin Replacing Sulfur. Zhen Lei, Jinyi Lu, Zhirong Jia, Chaoyu Li, Xuefeng Lin // *International Journal of Science and Engineering Applications Volume 9 – Issue 03, 25-30*, 2019, ISSN: 2319-7560. URL: <https://ijsea.com/archive/volume9/issue3/IJSEA09031001.pdf> (дата обращения: 08.04.2026).
 16. Technical Guideline for Construction of Direct-to-Plant SBS Modified Bituminous Pavement T/CHTS 20003-2018 /Guolu Gaoke Engineering Technology Institute Co., Ltd. [Техническое руководство по строительству асфальтобетонных покрытий с использованием модифицированного битума SBS] T/CHTS 20003 – 2018; China Communications Press: Пекин, Куньмин, 2018.
 17. Duarte G.M., Faxina A. Asphalt concrete mixtures modified with polymeric waste by the wet and dry processes: A literature review // *Construction and Building Materials*, 2021. – December. – 312, 125408. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.125408.
 18. Chu, Y. The mechanism and production control of using direct injection modifiers in the production of asphalt mixtures. *Construction* 2011,33, 3. (In Chinese).
 19. Zhang, W., Jia, Z., Zhang, Y., Hu, K., Ding, L., & Wang, F. (2019). The Effect of Direct-to-Plant Styrene-Butadiene-Styrene Block Copolymer Components on Bitumen Modification. *Polymers*, 11(1), 140. <https://doi.org/10.3390/polym11010140>.
 20. Сян Янь, Ди Ву, Куй Ху, Вэнган Чжан и др. Механизм модификации, методологии и технология применения модификаторов SBS в асфальтобетонной смеси: обзор. *Полимеры* 2023, 15(13), 2768; <https://doi.org/10.3390/polym15132768>.
 21. Практика применения модифицированных битумных вяжущих в Китае при строительстве и ремонте транспортной инфраструктуры. Хао Пейвэнь, профессор, Чайнаньский дорожный университет (КНР): материалы конференции «PRO Битум и ПББ 2025»; Санкт-Петербург. – 03.04.2025.
 22. Мен, Б.; Го, Ф.; Кан, С.; Юэ, Дж. Исследование адгезионных свойств быстроплавого асфальтобетона, модифицированного SBS, на основе теории свободной поверхностной энергии. *Materials* 2023, 16, 7601. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16247601>.
 23. Kang, Xiaolong & Wang, Riran & Yue, Jinchao & An, Xin & Tang, Guoqi. (2023). Investigation of the Adhesion Characteristics of a Novel Fast-Melting SBS-Based Modifier to Asphalt-Aggregate Systems Based on a Multiscale Approach. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 35. 10.1061/JMCEE7.MTENG-16204. <https://pdfs.semanticscholar.org/cffe/0d5e2225c029706691a20c69c99a2169c2e4.pdf>.
 24. Huo, W.; Zhuang, Y.; Wang, Z.; Kang, X.; Wang, R. The Microscopic Mechanism and Rheological Properties of SBS-Modified Asphalt with Warm Mixing Fast-Melting. *Materials* 2023, 16, 5690. <https://pdfs.semanticscholar.org/cffe/0d5e2225c029706691a20c69c99a2169c2e4.pdf>.

25. *Evaluation method of modification effect of direct-to-plant SBS modifier on asphalt. Construction and Building Materials, ISSN: 0950-0618, Vol: 419, Page: 135569. Publication Year 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135569>.*
26. Колесник Д.А., Ефименко В.Е. Применение модификаторов сухого ввода. // Мир дорог. – 2023. – №157. – С. 56-61.

REFERENCES

1. Alatas, T. Effects of different polymers on mechanical properties of bituminous binders and hot mixtures / T. Alatas, M. Yilmaz // *Construction and Building Materials*. – 2013. – V. 42(5). – P. 161-167. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.027.
2. Khodaii, A. Evaluation of permanent deformation of unmodified and SBS modified asphalt mixtures using dynamic creep test / A. Khodaii, A. Mehrara // *Construction and Building Materials*. – 2009. – V. 23(7). – P. 2586-2592. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.015.
3. Brown S.F., R.D. Rowlett, J.L. Boucher. Asphalt modification. – Highway research: sharing the benefits / Proceedings of the conference «The United States Strategic Highway Research Program», 29-31 October 1990. – ICE Publishing. – 1991. – PP. 181–203. DOI: <https://doi.org/10.1680/hrstb.16354.0017>.
4. Bull A.L., W.C. Vonk. Thermoplastic rubber/bitumen blends for roof and road. – Shell Chemicals Technical Manual TR 8.15, 1984. – London: Shell International Petroleum Company Publishing.
5. Bonemazzi F. et al. Correlation between the properties of polymers and polymer modified bitumens / Proceedings of the Eurobitume and Eurasphalt Congress, 7-10 May 1996. Strasbourg. – 17 P.
6. Henderson J.F., Szwarc M. The use of living polymers in the preparation of polymer structures of controlled architecture // *Journal of Polymer Science: Macromolecular Reviews*, 1968, Vol. 3, Iss: 1, pp 317-401.
7. Luo, H., Zheng C., Yang X., Bao C. Development of technology to accelerate SBS-modified asphalt swelling in dry modification mode. *Constr. Build. Mater.* 2022, 314(10), 125703. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125703.
8. Yan', S.; U, D.; Hu, K.; Chzhan, V.; Sin, D.; Cuj, L.; Shi, S.; Yan, D.; Yan, Ch. Mekhanizm modifikacii, metod ocenki i tekhnologiya sozdaniya modifikatorov SBS, ispol'zuemyh neposredstvenno na zavode, v asfal'tobetonnoj smesi: obzor. *Polimery* 2023, 15, 2768. <https://doi.org/10.3390/polym15132768>.
9. Men, B.; Guo, F.; Kang, X.; Yue, J. Research on the Adhesion Properties of Fast-Melting SBS-Modified Asphalt-Aggregate Based on Surface Free Energy Theory. *Materials*. 2023, 16, 7601. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16247601>.
10. Fan Y, Xie JG, Wang ZQ. Research the Microstructure and Properties of Modified Asphalt from Dry SBS-T. *KEM* 2020; 861:473-81. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.861.473>.
11. Stroitel'stvo asfal'tovogo pokrytiya s dobavleniem smesi na osnove SBS s ispol'zovaniem suhogo processa v Grenlandii»: materialy 6-j Mezhdunarodnoj konferencii po sodержaniyu, remontu i tekhnologi-cheskomu kontrolyu dorozhnyh pokrytij — 2009, s. 493-498.
12. Van, L.Z. Modifikator SBS pryamogo smeshivaniya i sposob ego polucheniya. Patent Kitaya № 201510178483, 23 noyabrya 2016 g. (na kitajskom yazyke). One directly mixes formula SBS modifier and preparation method thereof. <https://patents.google.com/patent/CN106147108A/en?peid=6501ef6ab62e0%3A4e%3Ad94cf23a>.

13. *The Effect of Direct-to-Plant Styrene-Butadiene-Styrene Block Copolymer Components on Bitumen Modification.* Wengang Zhang, Zhirong Jia, Yixia Zhang, Kui Hu, Longting Ding, Fang Wang // *Polymers* 2019, 11(1), 140; <https://doi.org/10.3390/polym11010140>.
14. *The Modification Mechanism, Evaluation Method, and Construction Technology of Direct-to-Plant SBS Modifiers in Asphalt Mixture: A Review.* Yan X, Wu D, Hu K, Zhang W, Xing J, Cui L, Shi S, Yang J, Yang C. // *Polymers (Basel)*. 2023 Jun. 21;15(13):2768. DOI:10.3390/polym15132768.
15. *Comparative Study on the Stability of SBS Modified Asphalt with M Resin Replacing Sulfur.* Zhen Lei, Jinyi Lu, Zhirong Jia, Chaoyu Li, Xuefeng Lin // *International Journal of Science and Engineering Applications Volume 9 – Is-sue 03,25-30, 2019, ISSN:-2319-7560. URL: <https://ijsea.com/archive/volume9/issue3/IJSEA09031001.pdf> (data obra-shcheniya: 08.04.2026).*
16. *Technical Guideline for Construction of Direct-to-Plant SBS Modified Bituminous Pavement T/CHTS 20003-2018 /Guolu Gaoke Engineering Technology Institute Co., Ltd. [Tekhnicheskoe rukovodstvo po stroitel'stvu as-fal'tobetonyh pokrytij s ispol'zovaniem modifitsirovannogo bi-tuma SBS] T/CHTS 20003 – 2018; China Communications Press: Pekin, Kitaj, 2018.*
17. Duarte G.M., Faxina A. *Asphalt concrete mixtures modified with polymeric waste by the wet and dry processes: A literature review // Construction and Building Materials, 2021. – December. – 312, 125408. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125408.*
18. Chu, Y. *The mechanism and production control of using direct injection modifiers in the production of asphalt mixtures. Construction 2011,33, 3. (In Chinese).*
19. Zhang, W., Jia, Z., Zhang, Y., Hu, K., Ding, L., & Wang, F. (2019). *The Effect of Direct-to-Plant Styrene-Butadiene-Styrene Block Copolymer Components on Bitumen Modification. Polymers, 11(1), 140. <https://doi.org/10.3390/polym11010140>.*
20. Syan Yan', Di Vu, Kuj Hu, Vengan Chzhan i dr. *Mekhanizm modifikacii, metodocenki i tekhnologiya primeneniya modifikatorov SBS v asfal'tobetonoj smesi: obzor. Polimery 2023, 15(13), 2768; <https://doi.org/10.3390/polym15132768>.*
21. *Praktika primeneniya modifitsirovannyh bitumnyh vyazhushchih v Kitae pri stroitel'stve i remonte transportnoj infrastruktury. Hao Pejven', professor, Chajnan'skij dorozhnyj universitet (KNR): materialy konferencii «PRO Bitum i PVB 2025»; Sankt-Peterburg. – 03.04.2025.*
22. Men, B.; Go, F.; Kan, S.; Yue, Dzh. *Issledovanie adgezionnyh svojstv bystroplavkogo asfal'tobetona, modifitsirovannogo SBS, na osnove teorii svobodnoj poverhnostnoj energii. Materials. 2023, 16, 7601. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16247601>.*
23. Kang, Xiaolong & Wang, Riran & Yue, Jinchao & An, Xin & Tang, Guoqi. (2023). *Investigation of the Adhesion Characteristics of a Novel Fast-Melting SBS-Based Modifier to Asphalt-Aggregate Systems Based on a Multiscale Approach. Journal of Materials in Civil Engineering. 35. 10.1061/JMCEE7.MTENG-16204. <https://pdfs.semanticscholar.org/cffe/0d5e2225c029706691a20c69c99a2169c2e4.pdf>.*
24. Huo, W.; Zhuang, Y.; Wang, Z.; Kang, X.; Wang, R. *The Microscopic Mechanism and Rheological Properties of SBS-Modified Asphalt with Warm Mixing Fast-Melting. Materials. 2023, 16, 5690. <https://pdfs.semanticscholar.org/cffe/0d5e2225c029706691a20c69c99a2169c2e4.pdf>.*
25. *Evaluation method of modification effect of direct-to-plant SBS modifier on asphalt. Construction and Building Materials, ISSN: 0950-0618, Vol: 419, Page:*

135569. *Publication Year 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135569>.*

26. *Kolesnik D.A., Efimenko V.E. Primenenie modifikatorov suhogo vvoda // Mir dorog. – 2023. – № 157. – S. 56-61.*
-

Информация об авторах

С.В. Полякова – кандидат технических наук, заместитель начальника редакционно-издательского отдела, ФАУ «РОСДОРНИИ», Москва, Россия

Ю.Э. Васильев – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Дорожно-строительные материалы и химические технологии», Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

Information about the authors

S.V. Polyakova – Ph. D. (Tech.), Deputy Head of the Editorial and Publishing Section, FAI «ROSDORNII», Moscow, Russia

Yu.E. Vasiliev – Doctor of Engineering, Professor, Head for the Chair of Road Construction Materials and Chemical Technologies, Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Russia

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Рецензенты: канд. техн. наук, директор по инновациям, технологиям и качеству Н.В. Майданова (ГК АБЗ-1).

Статья поступила в редакцию 08.04.2026. Одобрена после рецензирования 13.04.2026. Принята к публикации 22.04.2026.

The article was submitted 08.04.2026. Approved after reviewing 13.04.2026. Accepted for publication 22.04.2026.