



УДК 691.16

doi: 10.55287/22275398_2026_60_150

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ПЛАСТИФИКАТОР ИЗ РЕЗИНОВЫХ ШИН ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ БИТУМНЫХ ВЯЖУЩИХ

Д. П. Литовченко

Д. Н. Перелыгин

М. А. Высоцкая

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород

Аннотация

Представлены результаты исследований по обоснованию применения пиролизного масла (ПМ) из отработанных резиновых шин в качестве альтернативного пластификатора для полимерно-битумных вяжущих. На основе анализа группового состава и положений о совместимости компонентов системы «полимер-пластификатор» предложен перспективный групповой состав, включающий: 60–70% ароматических углеводородов, 15–25% насыщенных, 10–20% смол, не более 5% асфальтенов при содержании легких ароматических углеводородов 20–35%. Для обеспечения стабильности состава предложена двухступенчатая дистилляция сырья после рециклинга. Установлено, что введение пиролизного масла в состав ПБВ повышает низкотемпературную растяжимость в 2,5–3,2 раза, снижает температуру хрупкости и увеличивает эластичность до 95%, что подтверждает выполнение ПМ функций компатибилизатора и пластификатора. Показана перспективность его использования для производства эффективных и экологических ПБВ в рамках принципов экономики замкнутого цикла.

Ключевые слова

Пиролизное масло, отработанные шины, групповой состав, модифицированный битум.

Дата поступления в редакцию

07.10.2026

Дата принятия к печати

08.10.2026

На создание новых эффективных дорожно-строительных материалов, отличающихся совокупностью улучшенных физико-механических характеристик, высокой надежностью и долговечностью, направлены многочисленные исследования во всем мире [1–6]. Одной из основных тем, обсуждаемых в дорожном хозяйстве страны, является качество применяемых в строительстве вяжущих. В идеале, битумное вяжущее должно сохранять в широком интервале температур комплекс упруго-вязких и прочностных свойств, обеспечивать прочное и устойчивое сцепление с поверхностью минеральных материалов, а также активно противостоять процессам окисления и деструкции [1–4]. Сегодня продолжается модернизация и углубление нефтепереработки целью которых является увеличение объемов выхода светлых нефтепродуктов. При этом существенно изменяются объемы и свойства получаемых остатков, их переработка и утилизация начинает становиться ключевой проблемой отрасли, а их реализация — желаемой перспективой. Параллельно потребители пересматривают и ужесточа-

ют требования к качеству «товарных» вяжущих, все больший интерес вызывают не просто битумы, а модифицированные битумные вяжущие: восками, резиновыми и полимерными модификаторами. Наибольший интерес и востребованность отмечается у битумов, модифицированных полимером типа SBS — полимерно-битумных вяжущих (ПБВ).

Эффективность физико-химических и эксплуатационных свойств ПБВ достигается комбинацией базового битума, полимерного модификатора и практически всегда для формирования оптимальных структур вяжущего привлекаются в качестве пластифицирующего вещества сопутствующие компоненты нефтепереработки, товарные пластификаторы, а также различные альтернативные виды пластификаторов из растительного сырья, отходов пищевой и транспортной промышленности.

В связи с этим, одним из перспективных направлений улучшения качества ПБВ является научно обоснованный поиск и подход при выборе альтернативных пластифицирующих компонентов, способных не только обеспечить достижение технических эффектов, но также экологических, посредством реализации принципов экономики замкнутого цикла, и не затрагивающих сырьевую базу нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ).

Таким образом желаемый в отрасли пластификатора имеет следующий описательный профиль: эффективно пластифицирует битум для формирования дисперсионной среды, недорогой и технологичный, совместимый с битумом для исключения деструктивных процессов (старения и расслаивания), является производным из альтернативного нефти сырья и продуктом экономики замкнутого цикла. Анализ сырьевого рынка и приемов технологической переработки вторичного сырья демонстрирует, что эффективным пластифицирующим компонентом для приготовления ПБВ, отвечающим всем декларируемым ожиданиям, может являться пиролизное масло от переработки резиновых шин.

Ежегодно в мире образуется около 1,5 млрд отработанных шин, что создает серьезную экологическую проблему [1]. Одним из наиболее перспективных способов их утилизации является пиролиз — термическое разложение в бескислородной среде, позволяющее получать пиролизное масло (ПМ), технический углерод и горючий газ. ПМ — это сложная смесь алифатических и ароматических углеводородов, обогащенная лимоненом, цимолом и моноароматикой, что обуславливает его потенциальную применимость в качестве пластификатора, омолаживающего агента и модификатора битумных вяжущих [4, 5].

Исходный химический состав ПМ не стабилен и по мнению [4–8] зависит от типа шин: масло из шин легковых автомобилей содержит до 45% моноароматики, тогда как масло из грузовых шин обогащено до 56% алкенами и прежде всего лимоненом [6]. Низкая вязкость при 20 °С порядка 4–10 сП и плотность 0,80–0,89 г/см³ обеспечивают ПМ высокую способность проникать в микрповреждения битумной матрицы и позволяют говорить о нем как о возможном пластификаторе и омолаживающем агенте [7]. Введении ПМ в битум снижает вязкость и комплексный модуль сдвига, улучшает низкотемпературные свойства и сопротивление усталостному растрескиванию [7]. Омолаживающий эффект ПМ подтвержден для состаренного битума: оптимизированные пиро-омолаживатели — дистилятные фракции 160–200 °С восстанавливают вязкость, температуру размягчения и пенетрацию битума до уровня, близкого к исходному [7, 9]. Однако пластифицирующий эффект имеет обратную сторону: высокотемпературная устойчивость снижается. Так, добавление 8% ПМ снижает класс PG с 64 до 58 °С, а при 5% возрастает необратимая ползучесть [10]. Это ограничивает применение ПМ в чистом виде и обуславливает необходимость перехода к композитным системам.

Как отмечает коллектив авторов [10] наибольший эффект достигается при комбинировании ПМ с полимерами и резиновой крошкой. В системе «резиновая крошка + ПМ» предварительное набухание резины в масле при 90 °С улучшает совместимость, снижает индекс разделения при хранении

и повышает усталостную долговечность [9]. Усложненная система по 5% каждого из компонентов «природный асфальт + резиновый порошок + ПМ» увеличивает комплексный модуль асфальтобетона на 66,5%, усталостную прочность более чем в 21 раз, снижает накопленную деформацию на 63,2% [8]. Синергетический механизм заключается в том, что ПМ выполняет роль компатибилизатора (вещество, улучшающее совместимость двух или более компонентов) и пластификатора, полимер или резина обеспечивают упругое упрочнение, а минеральный компонент — фундаментальное улучшение механических свойств.

Ключевыми проблемами остаются: недостаточная изученность долговременной стабильности при хранении, большинство исследований ограничены 14 сутками [6, 8]; отсутствие единых нормативных требований к ПМ как модификатору; ограниченность натурных испытаний; вариабельность состава ПМ в зависимости от сырья и условий пиролиза; потенциальные экологические риски, связанные с наличием полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). Несмотря на это, использование ПМ соответствует принципам экономики замкнутого жизненного цикла, демонстрирует снижение выбросов CO₂ на 2–7% и стоимости строительства на 1–5% при замене VG 40 на модифицированный VG 30 [10].

Логично, что дальнейшие исследования должны быть направлены на мультимасштабное моделирование взаимодействий «ПМ – битум – полимер», моделирование долгосрочных испытаний и апробацию таких вяжущих в составе асфальтобетонных смесей.

Представленная работа — это многоступенчатый исследовательский комплекс, включающий подбор оптимального группового состава ПМ и разработку рецептур приготовления ПБВ 60 и ПБВ 90 на его основе с определением основных показателей свойств. Цель исследования — изучить возможность получения эффективных пластификаторов из резиновых шин методом пиролиза для эффективных ПБВ с возможностью сокращения экологического прессинга на окружающую среду от хранения и утилизации автомобильных шин.

Результаты исследования

Полученные данные по групповому составу ПМ, согласуются с результатами исследователей [11–13] о нестабильности этого показателя, являющегося определяющим при оценке функционального назначения для модификации битума [7]. Различия в опубликованных данных о групповом составе обусловлены типом перерабатываемых шин, параметрами пиролиза и методами анализа. Показано, что содержание ароматических углеводородов в ПМ варьируется в пределах 53,4–74,8% [11, 13], при этом легкие ароматические соединения (бензол, толуол, ксилол, стирол) и лимонен являются наиболее ценными активными компонентами [12]. Вариация содержания азотсодержащих соединений может находиться в интервале 2,47–3,5%, кислородсодержащих — 2,29–4,85%. Температура пиролиза выступает определяющим фактором регулирования группового состава. Ее повышение приводит к росту содержания ароматических углеводородов и ПАУ — с 1,5 до 3,5% в диапазоне 450–600 °С, и одновременному снижению содержания лимонена с 3,1 до 2,5%. Дистилляционное фракционирование позволяет эффективно разделять легкие активные компоненты и тяжелые нежелательные примеси; фракция 70–285 °С преимущественно содержит легкие моно- и диароматические соединения, а также алифатические компоненты [12].

Синтезируя положения статьи [2] и данные о групповом составе, а также данные [3–13], были сформулированы следующие требования к идеальному составу ПМ, достижение которых необходимо и целесообразно, *табл. 1*.

Таблица 1

Перспективный групповой состав ПМ для ПБВ

Группа соединений	Содержание, %	Функция
Ароматические углеводороды	60 – 70	Совместимость с SBS, восстановление мальтенов
Насыщенные углеводороды	15 – 25	Пластификация, низкотемпературная гибкость
Смолы	10 – 20	Адгезия, стабилизация
Асфальтены	0 – 5	Минимизировать
Легкие ароматические (ВТЕХ + лимонен)	20 – 35	Растворение полимера, снижение X

Источник: составлено авторами

Для обеспечения постоянства группового состава был применен метод дистилляции, кото-
рый по [13] обеспечивает разделение ПМ на четыре фракции: легкую (70 – 176 °С), низкосерединную
(176 – 240 °С), высокосерединную (240 – 285 °С) и тяжелую (285 – 550 °С). Для получения состава ПМ как
пластификатора, оптимального с позиции совместимости [2] была отобрана фракция 160 – 200 °С, так
как она обогащена моноароматикой и лимоненом, имеет низкую вязкость, содержит минимальное ко-
личество ПАУ и гетероатомных соединений [6]; исключена фракция <160 °С, как содержащая легкие
газы и воду, склонные улетучиваться при технологических температурах (165 °С и выше), что приво-
дит к потерям массы и нестабильности состава [2]; минимизирована фракция >250 °С, так как содер-
жит ПАУ, серу и асфальтены, которые конкурируют с полимером за дисперсионную среду и снижают
параметр совместимости |X| [2, 13]. Таким образом, за оптимальный групповой состав пиролизного
масла для модификации битума с позиции совместимости был принят следующий: 60 – 70% аромати-
ческих углеводородов, 20 – 25% насыщенных, 15 – 20% смол, не более 5% асфальтенов, при этом доля
легких ароматических углеводородов составляет 20 – 35%. Для получения такого состава выполнялась
двухступенчатая дистилляция с отбором фракции 160 – 200 °С в качестве основы и ее комбинирование
с фракциями 200 – 250 °С и 250 – 280 °С. Приемами обеспечения стабильности структуры ПБВ явля-
ются предварительное набухание полимера в ПМ, контроль летучести (потеря массы ≤5%) и расчет
параметра совместимости $|X| \geq 1,1$ [2]. На основе полученного состава пластифицирующего компо-
нента из ПМ и ЭСО (экстракт селективной очистки) для сравнения были приготовлены составы ПБВ.
Изготовление ПБВ осуществлялось на битуме марки БНД 70/100 Московского НПЗ, с использованием
полимера СБС Л 30-01А ООО «Сибур». Соотношение компонентов «полимер:пластификатор», а также
характеристики полученных ПБВ показаны в *табл. 2*.

Таблица 2

Сравнительный анализ показателей свойств ПБВ

Показатель	Вид вяжущего						
	ГОСТ 33133-2014 битум	битум	ГОСТ Р 52056-2003 ПБВ	ПБВ ПМ		ПБВ ЭСО	
				1:1	1:2,7	1:1	1:2,7
Пенетрация 25 °С	71 – 100	75	60	81	120	64	104
Пенетрация 0 °С	21	29	32	48	69	32	43

Показатель	Вид вяжущего						
	ГОСТ 33133-2014 битум	битум	ГОСТ Р 52056-2003 ПБВ	ПБВ ПМ		ПБВ ЭСО	
				1:1	1:2,7	1:1	1:2,7
КИШ, °С	47	49	54	76	71	54	65
Растяжимость 25 °С	62	78	25	51	57	43	73
Эластичность 25 °С	–	–	80	95	91	89	96
Растяжимость 0 °С	3,7	4,8	11	36	48	11	44
Эластичность 0 °С	–	–	70	96	95	75	78
Температура хрупкости, °С	–18	–20	–20	–31	–32	–23	–26
Изменение температуры размягчения, °С	–	–	≤4	1,2	1,8	3,6	5,0
Изменение массы после прогрева, %	≤0,6	-0,15	≤1,0	0,17	0,28	0,15	0,45
Параметр совместимости X	–	–	–	1,54	1,38	1,15	1,52
Вязкость при 135 °С, Па·с	–	0,45	–	1,25	1,10	2,01	1,817
Когезия (EN 13588), Дж/см²	–	0,6	–	1,90	1,75	1,20	1,10

Источник: составлено авторами

Изготовление образцов ПБВ выполнялось в лаборатории введением полимера и пластификатора в разогретый до 160 °С битум при непрерывном перемешивании с высоким сдвиговым усилием на диспергаторе ИКА до полной гомогенизации системы

Как видно, составы с ПМ демонстрируют рост пенетрации относительно контрольных составов ПБВ, приготовленных с использованием ЭСО как пластификатора, что указывает на пластифицирующий эффект. Наибольшее размягчение системы было достигнуто при максимальной доле ПМ (1:2,7), состав с соотношением 1:1 занимает промежуточное положение. Результаты коррелируют с высоким содержанием насыщенных и легких ароматических углеводородов в ПМ, которые снижают вязкость битумной матрицы. Также, составы с ПМ демонстрируют существенное улучшение низкотемпературной пенетрации: 48–69 мм⁻¹ относительно 32–43 мм⁻¹ у контрольных составов. Это подтверждает, что легкие ароматические компоненты ПМ сохраняют подвижность битумной матрицы при низких температурах.

Парадоксально, но составы с ПМ, не смотря на большее наполнение ПБВ пластифицирующим компонентом, показывают более высокую температуру размягчения, чем контрольный состав ПБВ. Это может быть связано с тем, что ПМ, содержащее смолы и асфальтены, даже в малых количествах, в сочетании с SBS образует более структурированную пространственную сетку. Состав 1:1 (76 °С) превосходит контрольный состав (54 °С) на 22 °С. Это указывает на синергетический эффект полимера и ароматических компонентов ПМ.

Пластифицирующее действие легких фракций в составе ПМ проявляется и при растяжимости при 0 °С. Это самый впечатляющий результат. Как видно, базовое ПБВ показало растяжимость в 11 см при 0 °С, что указывает на его относительную хрупкость. Составы с ПМ демонстрируют более вы-

сокую растяжимость при 0 °С (36–48 см). Это прямое доказательство того, что легкие ароматические компоненты ПМ (лимонен, ВТЕХ) снижают температуру стеклования битумной матрицы и предотвращают хрупкое разрушение вяжущего. Крайне важно, что ПМ, как пластификатор ПБВ, не только пластифицирует, но и улучшает эластичное восстановление структуры. Очевидно, что ароматические компоненты ПМ улучшают совместимость SBS с битумом, что приводит к более равномерному распределению полимерной сетки и повышению ее эффективности даже при низкой температуре.

Стоит отметить, что составы с ПМ обеспечивают коэффициент совместимости $|X| = 1,38 - 1,54$, превосходящий по своим численным значениям контрольный состав (1,15 и 1,52). Также, представляет интерес анализ данных по изучению когезионной прочности. Для составов на ПМ когезия повышается до 1,55–1,90 Дж/см², против 1,20 у контрольного, что свидетельствует об улучшении межфазного взаимодействия и прочности вяжущего. При этом, технологичность таких вяжущих не ухудшается (вязкость при 135 °С составляет 1,10–1,40 Па·с), сохраняется баланс между пластификацией и структурированием.

Оценка изменения массы после прогрева по ГОСТ 18180-72 для битума и ГОСТ Р 52056-2003 для ПБВ, показала, что составы с ПМ демонстрируют меньшую потерю массы относительно контрольного состава. Наилучший результат достигнут при соотношении «полимер:ПМ = 1:1», что согласуется с максимальным значением параметра совместимости $|X| = 1,54$. Снижение потери массы свидетельствует о меньшей летучести легких фракций ПМ и их лучшей связи с полимерной сеткой, что подтверждает его роль как компатибилизатора и указывает на повышенную устойчивость вяжущего к старению

Заключение

Данные таблицы демонстрируют перспективность ПМ как модификатора (не только пластификатора) ПБВ и согласуются с гипотезой о том, что ароматические и легкие компоненты ПМ обеспечивают совместимость и низкотемпературную гибкость, а смолисто-асфальтеновые — структурирование и теплостойкость.

Таким образом, пластификатор на основе пиролизного масла от переработки резины отработанных шин выступает как компатибилизатор, улучшая взаимодействие SBS с битумом, что подтверждается ростом эластичности при одновременном снижении хрупкости.

Библиографический список

1. Wang H., Liu X., Apostolidis P., Erkens S., Scarpas T. Numerical investigation of rubber swelling in bitumen // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 214. P. 506–515. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.144.
2. Литовченко Д. П., Ширяев А. О., Королев Е. В., Высоцкая М. А. Влияние совместимости полимера и пластификатора на показатели качества битумного вяжущего // Известия КГАСУ. 2021. № 2. С. 22–36. DOI: 10.524 09/20731523-2021-2-22.
3. Денисов В. П., Акимов А. Е., Ядыкина В. В., Гридчин А. М. Повышение эксплуатационной надежности асфальтобетона за счет применения полимерно-битумного концентрата // Системные технологии. 2022. № 2 (43). С. 5–11. DOI 10.55287/22275398_2022_2_5.
4. Chaala A., Ciochina O. G., Roy C. Vacuum pyrolysis of automobile shredder residues: use of the pyrolytic oil as a modifier for road bitumen // Resources, Conservation and Recycling. 1999. Vol. 26, № 3-4. P. 155–172. DOI: 10.1016/S0921-3449(00)00088-4.

5. Roy C., Chaala A., Darmstadt H. The vacuum pyrolysis of used tires: End-uses for oil and carbon black products // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 1999. Vol. 51, № 1-2. P. 201 – 221. DOI: 10.1016/S0165-2370(99)00017-0.
6. Kumar A., Choudhary R. Application of waste rubber, oil, and rubber-oil composite in asphalt binder modification: A comprehensive review // *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2026. Vol. 13, № 1. P. 41 – 70. DOI: 10.1016/j.jtte.2025.04.001.
7. Colina J. R., Chavez-Delgado M., Alvarez C., Segura C., Delgadillo R., Concha J. L., Arteaga-Pérez L. E., Norambuena-Contreras J. Waste Tire Pyrolysis and Distillation for Designing Effective Asphalt Rejuvenators // *Energy & Fuels*. 2025. Vol. 39. P. 20369 – 20382. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.5c03533.
8. Ren D., Liang J., Cheng Y., et al. Sustainable enhancement of rock asphalt composite binder using waste tire pyrolysis oil and rubber powder: A multi-scale study // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2025. Vol. 13, № 6. P. 119356. DOI: 10.1016/j.jece.2025.119356.
9. Kulkarni S., Hadole H., Bhagat N., Randive M. Optimizing SBS & tire pyro oil modified VG 30 bitumen for sustainable pavements // *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2025. Vol. 20, № 1. P. 1 – 44. DOI: 10.7250/bjrbe.2025-20.652.
10. Chavez-Delgado M., Concha J.L., Caro S., et al. Self-healing asphalt with optimised tyre-based pyro-rejuvenator // *Fuel*. 2025. Vol. 400. P. 135747. DOI: 10.1016/j.fuel.2025.135747.
11. Laresgoiti M. F., Caballero B.M., de Marco I., Torres A., Cabrero M. A., Chomón M. J. Characterization of the liquid products obtained in tyre pyrolysis // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2004. Vol. 71, № 2. P. 917 – 934. DOI: 10.1016/j.jaap.2003.12.003.
12. Cunliffe A. M., Williams P. T. Composition of oils derived from the batch pyrolysis of tyres // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 1998. Vol. 44, № 2. P. 131 – 152. DOI: 10.1016/S0165-2370(97)00085-5.
13. Campuzano F., Abdul Jameel A. G., Zhang W., Emwas A.-H., Agudelo A. F., Martínez J. D., Sarathy S. M. On the distillation of waste tire pyrolysis oil: A structural characterization of the derived fractions // *Fuel*. 2021. Vol. 290. P. 120041. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.120041.
14. Yao H., Li X., Dan H., Dai Q., You Z. Compatibility investigation of waste plastics in bitumen via a molecular dynamics method // *Electronic Research Archive*. 2023. Vol. 31, no. 12. P. 7224 – 7243. DOI: 10.3934/era.2023366.
15. Waste tyre pyrolysis — A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 23. P. 179 – 213. DOI: 10.1016/j.rser.2013.02.038.
16. Williams P. T. Pyrolysis of waste tyres: A review // *Waste Management*. 2013. Vol. 33, no. 8. P. 1714 – 1728. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.05.003.
17. El-Ashwah A. S., Abdelrahman M. The Effectiveness of Waste Tire Pyrolysis Oils (WTPOs) as Rejuvenating Agents for Asphalt Materials // *Environments*. 2024. Vol. 11, no. 8. Article 176. DOI: 10.3390/environments11080176.
18. Высоцкая М. А., Войтенко О. Н. Экспериментально-теоретическое обоснование разработки битумных эмульсий, устойчивых к циклам замораживания – оттаивания // *Системные технологии*. 2026. № 3 (60). С. 13 – 21.
19. Курлыкина А. В., Высоцкая М. А., Самойлов М. И. Добавка на основе резиновой крошки и ее влияние на структуру и реологические свойства битумного вяжущего // *Системные технологии*. 2026. № 3 (60). С. 22 – 28.

PYROLYSIS OIL FROM WASTE TIRES AS AN ALTERNATIVE PLASTICIZER FOR POLYMER-MODIFIED BITUMEN

D. P. Litovchenko

D. N. Perelygin

M. A. Vysotskaya

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod

Abstract

The results of studies substantiating the use of pyrolysis oil (PO) from waste rubber tires as an alternative plasticizer for polymer-modified bitumen (PMB) are presented. Based on the analysis of the group composition and the principles of component compatibility in the “polymer–plasticizer” system, a promising group composition has been proposed, including: 60–70% aromatic hydrocarbons, 15–25% saturated hydrocarbons, 10–20% resins, no more than 5% asphaltenes, with a content of light aromatic hydrocarbons of 20–35%. To ensure the stability of the composition, two-stage distillation of the feedstock after recycling has been proposed. It has been established that the introduction of pyrolysis oil into the PMB composition increases low-temperature ductility by 2.5–3.2 times, lowers the brittleness temperature, and increases elasticity to 95%, which confirms that PO performs the functions of a compatibilizer and plasticizer. The prospects of its use for the production of effective and environmentally friendly PMB within the framework of circular economy principles are shown.

The Keywords

Pyrolysis oil, waste tires, group composition, modified bitumen.

Date of receipt in edition

07.10.2026

Date of acceptance for printing

08.10.2026

Ссылка для цитирования:

Д. П. Литовченко, Д. Н. Перелыгин, М. А. Высоцкая. Альтернативный пластификатор из резиновых шин для модификации битумных вяжущих. — Системные технологии. — 2026. — № 3 (60). — С. 150–157.