

Транспортные сооружения / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2025, Том 12, № 4 / 2025, Vol. 12, Iss. 4 <https://t-s.today/issue-4-2025.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/21SATS425.pdf>

DOI: 10.15862/21SATS425 (<https://doi.org/10.15862/21SATS425>)

2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Пугин, К. Г. Оптимизация состава и эксплуатационные характеристики асфальтобетона из горных пород, вмещающих хризотил-асбест / К. Г. Пугин, О. В. Яконцева // Транспортные сооружения. — 2025. — Т. 12. — № 4. — URL: <https://t-s.today/PDF/21SATS425.pdf>. DOI: 10.15862/21SATS425.

For citation:

Pugin K.G., Yakontseva O.V. Optimization of the composition and performance of asphalt concrete from rock formations containing chrysotile asbestos. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2025;12(4): 21SATS425. Available at: <https://t-s.today/PDF/21SATS425.pdf>. DOI: 10.15862/21SATS425. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 691.168

Пугин Константин Георгиевич

ФГБОУ ВО «Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова», Пермь, Россия

ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия

Профессор

Доктор технических наук, доцент

E-mail: 123zzz@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1768-8177>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=622336

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/F-8610-2019>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=55823720700>

Яконцева Ольга Валерьевна

ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия

Аспирант

E-mail: yakontseva.olga@yandex.ru

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57446060700>

Оптимизация состава и эксплуатационные характеристики асфальтобетона из горных пород, вмещающих хризотил-асбест

Аннотация. В статье представлены результаты комплексного исследования, направленного на обоснование возможности применения горных пород, вмещающих хризотил-асбест (на примере Алапаевского хромитового массива, Урал), в качестве альтернативного минерального сырья для производства асфальтобетонных смесей. Показано, что горная порода, разрабатываемая в карьере «III Поденный рудник», содержащая в своей структуре волокна хризотил-асбеста, по своим физико-техническим свойствам удовлетворяет требованиям, предъявляемым к минеральным компонентам асфальтобетонной смеси.

Авторами для оптимизации состава асфальтобетонной смеси типа применён полный факторный эксперимент с варьированием содержания волокон (0,5–2,5 %) и битума (5,5–7,5 %). Построены регрессионные модели и трёхмерные поверхности отклика. Установлены оптимальное содержание волокна хризотил-асбеста — 1,2–1,8 % и битума — 5,9–7,2 % (сверх 100 % минеральной части).

Полученный авторами состав асфальтобетона характеризуется улучшенными эксплуатационными свойствами: прочность при сжатии при 50°C возрастает на 30–40 % относительно составов без армирования, коэффициент водостойкости достигает 0,95–1,00, трещиностойкость при 0°C сохраняется в допустимых пределах. Показано, что высокая удельная поверхность (10–25 м²/г) и адсорбционная активность волокон хризотил-асбеста позволяют полностью исключить из состава асфальтобетонной смеси товарный минеральный порошок, тем самым снизив экономические и транспортные затраты на ее производство. Вовлечение вскрышных пород и отходов переработки хризотилсодержащих месторождений способствует сокращению техногенной нагрузки и расширению сырьевой базы дорожного строительства в регионах, испытывающих дефицит традиционных нерудных материалов. Предложенный подход обеспечивает возможность проектирования асфальтобетонных смесей с прогнозируемыми характеристиками при одновременной экономии ресурсов и снижении себестоимости строительства асфальтобетонных покрытий.

Ключевые слова: хризотил-асбест; асфальтобетон; армирование; серпентиниты; дорожное строительство; битум; строительные материалы

Введение

Дисперсное армирование является одним из эффективных способов повышения эксплуатационных характеристик асфальтобетонных покрытий. Введение в состав органоминеральной смеси волокнистых материалов позволяет создать пространственный микроармирующий каркас, который препятствует развитию трещин, увеличивает сдвигоустойчивость и повышает усталостную долговечность материала. В мировой практике применяются различные виды армирующих добавок: целлюлозные волокна (для щебеночно-мастичных асфальтобетонов), синтетические (полиэфирные, полиакрилонитрильные, полипропиленовые), а также базальтовые и стеклянные волокна. Применение синтетических волокон связано с повышением себестоимости смеси и необходимостью использования специализированного оборудования для их ввода [1–4].

Для достижения высоких значений характеристик органоминеральных композитов, за счет мелкодисперсного армирования, требуется равномерное распределение волокнистого компонента, обеспечение высокой адгезии к битуму, а также обоснованного выбора геометрии и концентрации волокон. Нарушение баланса ведёт к комкованию и увеличению расхода вяжущего либо к недостаточному упрочнению. Помимо этого, волокна должны сохранять стабильность в интервале температур приготовления асфальтобетонной смеси (160–180°C) и не разрушаться в процессе перемешивания. Перспективным решением является использование заполнителей, извлечённых из горных пород, содержащих природные волокна хризотил-асбеста [5–8].

Такой подход позволяет совместить функции минерального наполнителя и армирующей добавки, исключив необходимость введения дорогостоящих синтетических волокон.

В частности, на Урале хризотил-асбест встречается в следующих горных массивах: Баженовский массив (Средний Урал); Киембаевское месторождение (Оренбургская область); Верблюжьегорский, Таловский массивы (Южный Урал). Главный промышленный тип вмещающих горных пород — месторождения, связанные с массивами серпентинизированных ультрамафитов (апоультрамафитовый тип).

В результате метаморфической трансформации ультрабазитов, протекающей по типу серпентинизации, в их структуре сформировались волокнистые агрегаты хризотил-асбеста [9].

В соответствии с санитарно-эпидемиологическими правилами и нормами (СанПиН 1.2.3685-21, СП 2.2.3670-20) на территории Российской Федерации установлен дифференцированный подход к регулированию асбестосодержащих материалов: добыча, обогащение и использование асбеста амфиболовой группы (крокидолита, амозита и др.) в материалах и изделиях гражданского назначения запрещены. В то же время хризотил-асбест (группа серпентина) допускается к промышленному применению при условии соблюдения строгих гигиенических и технологических регламентов. Ключевым ограничением для дорожного строительства является требование, согласно которому при использовании строительных нерудных материалов из хризотилсодержащих горных пород в дорожном и железнодорожном строительстве содержание свободных волокон хризотил-асбеста не должно превышать 0,6 %. Ограничение в 0,6 % свободных волокон хризотил-асбеста в нерудных строительных материалах имеет гигиеническое обоснование и направлено на обеспечение безопасности труда при проведении дорожно-строительных работ. Данный норматив обеспечивает, чтобы при механической обработке материалов (дроблении, транспортировке, укладке) концентрация респираторных волокон в воздухе рабочей зоны не превышала установленные ПДК. Кроме того, обращение с хризотилсодержащими материалами регламентируется ГОСТ 12871-2013 «Хризотил. Общие технические условия», устанавливающим требования к качеству сырья и готовой продукции. Данные нормативные положения открывают возможности для расширения сырьевой базы дорожного строительства за счет вовлечения местных пород и отходов их добычи при условии контроля содержания свободных волокон.

Постановка проблемы

Несмотря на наличие значительных запасов горных пород, вмещающих хризотил-асбест, на территории Урала и других регионов России, их применение в производстве асфальтобетонных смесей в настоящее время практически не осуществляется. В ряде субъектов Российской Федерации, где отсутствуют традиционные карьеры нерудных материалов (гранитов, известняков), такое положение становится критическим, поскольку ограничивает сырьевую базу дорожного строительства и вынуждает использовать привозные заполнители, что существенно удорожает возведение и ремонт автомобильных дорог [10–12].

Одной из ключевых причин, препятствующих широкому вовлечению хризотилсодержащих пород в дорожную отрасль, является неконтролируемый характер высвобождения волокон хризотил-асбеста в процессе технологической обработки на асфальтобетонных заводах (АБЗ). В ходе стандартных операций — сушки минеральных материалов в барабанных установках и последующего перемешивания компонентов в смесителях принудительного действия — происходит интенсивное механическое воздействие на зерна заполнителя. В результате истирания поверхности зерен и разрушения слабосвязанных участков породы в смесь выделяются свободные волокна хризотил-асбеста [13; 14].

Данный процесс носит стохастический характер и не поддается прямому регулированию при традиционной технологии приготовления асфальтобетона. Высвобождающиеся волокна обладают высокой удельной поверхностью (до 20 м²/г) и значительно увеличивают суммарную площадь поверхности минеральных компонентов смеси. При фиксированном содержании битума, рассчитанном на исходные заполнители, возрастание удельной поверхности приводит к дефициту вяжущего: битума оказывается недостаточно для равномерного обволакивания всех частиц и формирования качественной структуры асфальтобетона. Как следствие, наблюдаются ухудшение физико-механических характеристик материала (снижение водостойкости, прочности при сдвиге, трещиностойкости), либо возникает необходимость увеличения расхода битума для компенсации повышенной адсорбционной способности смеси, что снижает экономическую эффективность производства [15; 16].

Авторами ранее был разработан способ регулирования содержания волокон в минеральной части асфальтобетонной смеси (патент RU 2845041), что позволило путем изменения режимов технологического воздействия (в частности, варьирования расхода газо-воздушной смеси в сушильном барабане АБЗ) управлять процессом высвобождения свободных волокон из хризотилсодержащих заполнителей, обеспечивая их нормируемое содержание в готовой минеральной массе. На основе данного технического решения открывается возможность целенаправленного использования горных пород, вмещающих хризотил-асбест, в качестве полноценного сырья для производства асфальтобетонных смесей с прогнозируемыми эксплуатационными свойствами.

Цель исследования — оптимизация состава и оценка физико-механических характеристик асфальтобетона, полученного с использованием заполнителей из горных пород, вмещающих хризотил-асбест, при управляемом содержании свободных волокон.

Материалы и методы исследования

Для достижения поставленной цели — оптимизации состава и оценки физико-механических характеристик асфальтобетона, полученного с использованием заполнителей из горных пород, вмещающих хризотил-асбест, при управляемом содержании свободных волокон — в работе использовали следующие материалы, оборудование и методики.

В качестве заполнителей применяли щебень фракции 4–8 мм, 8–16 мм, отсев дробления фракции 0–5 мм и песок 0–4 мм, полученные из карьера «Ш Поденный рудник», расположенного в северной части Алапаевского хромитоносного массива (Средний Урал). Горные породы месторождения представлены серпентинитами, содержащими природные волокна хризотил-асбеста в количестве 0,5–1,5 % по данным химико-минералогического анализа. Отбор образцов осуществляли в соответствии с требованиями ГОСТ 8269.0-97.

В качестве вяжущего применяли битум марки БНД 90/130 по ГОСТ 22245-90. Основные показатели битума: глубина проникновения иглы при 25°C — 10,1 мм, температура размягчения по кольцу и шару — 47°C, дуктильность при 25°C — 78 см, при 0°C — 4,9 см.



Рисунок 1. Волокно хризотил-асбеста полученное после промывки щебня (фото авторов)

В качестве минерального наполнителя использовали минеральный порошок марки МП-1 по ГОСТ 32761-2014 (карбонатные горные породы) и свободные волокна хризотил-асбеста. Зерновой состав МП-1: частиц мельче 0,125 мм — не менее 85 %, мельче 0,063 мм — не менее 70 %. Битумоемкость — 34 г. Свободные волокна хризотил-асбеста были получены промыванием щебня после процесса сушки в сушильном барабане АБЗ (рис. 1).

Асфальтобетонные смеси готовили в лабораторной смесительной установке при температуре битума 160°C и температуре минеральных материалов 165°C. Образцы асфальтобетона соответствовали типу А, марки П. Образцы формовали по методике, регламентированной ГОСТ 12801-98.

Планирование эксперимента и варьируемые факторы. Для установления зависимости физико-механических характеристик асфальтобетона от содержания свободных волокон хризотил-асбеста и расхода битума был применён трёхуровневый план полного факторного эксперимента типа 3. В качестве независимых переменных приняты: X_1 — содержание свободных волокон хризотил-асбеста в смеси заполнителей, % (изменяли в интервале 0,5–2,5 % с шагом 1,0 %); X_2 — содержание битума БНД 90/130, % от массы минеральной части (интервал варьирования 5,5–7,5 % с шагом 1,0 %).

Значения факторов для трёх уровней (нижний, средний, верхний) представлены в таблице 1.

Таблица 1

Интервалы варьирования факторов

Уровень	Кодовое значение	X_1 (волокна), %	X_2 (битум), %
Верхний	+1	2,5	7,5
Средний	0	1,5	6,5
Нижний	-1	0,5	5,5

Разработано авторами

Методы испытаний. Физико-механические характеристики асфальтобетона определяли по ГОСТ 9128-2013. Применимость для целей исследования. В научной практике допускается использование стандартов, утративших силу для целей обязательного строительного контроля, при проведении фундаментальных и прикладных исследований, направленных на сравнительную оценку свойств материалов, разработку новых составов и анализ структурных изменений. В настоящей работе исследуется не столько соответствие материала конкретному нормативу для приемки в эксплуатацию, сколько закономерности влияния содержания свободных волокон хризотил-асбеста на эксплуатационные свойства асфальтобетона в сравнительном аспекте. Для решения такой задачи применение ГОСТ 9128-2013 является достаточным и обеспечивает сопоставимость полученных данных с обширной базой предшествующих отечественных исследований в области дисперсного армирования асфальтобетона.

Для выявления закономерностей влияния факторов X_1 и X_2 на выходные параметры (водонасыщение, прочность, коэффициент водостойкости) использовали пакет прикладных программ STATISTICA. По результатам испытаний строили регрессионные модели и трёхмерные поверхности отклика, позволяющие визуализировать области оптимальных сочетаний факторов.

Результаты

При измельчении хризотил-асбеста образуются волокна длиной от 50 мкм до 15 мм, диаметром от 1 мкм, до 0,5 мм. Волокна имеют слоистую структуру поверхности (рис. 2).

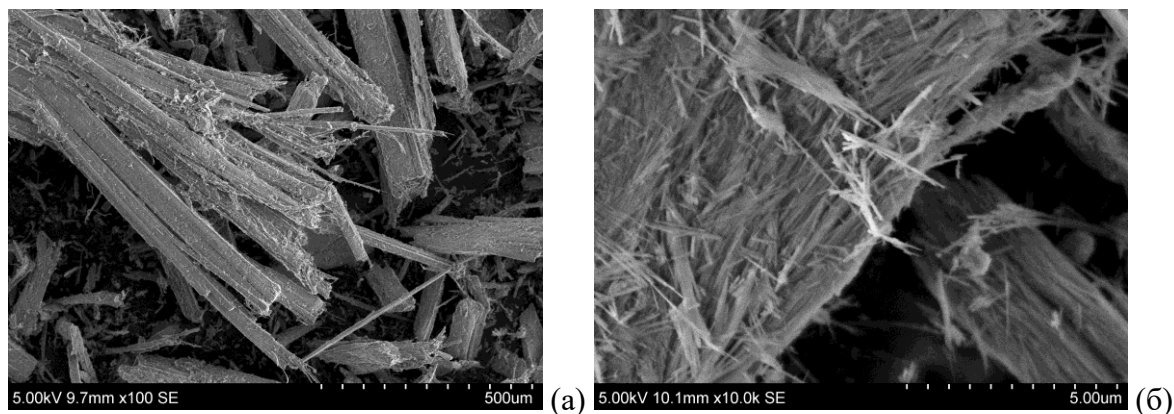


Рисунок 2. Волокна хризотил-асбеста при увеличении (а) в 100 раз, (б) в 10 тыс. раз (фото авторов)

Волокна хризотил-асбеста имеют пучковую организацию — волокна собраны в параллельные пучки диаметром от 0,5 до 2,0 мкм, что соответствует типичной фибриллярной структуре хризотил-асбеста. **Высокая степень дисперсности** характерна для волокон, выделенных при сушке и истирании щебня. Поверхность волокон имеет развитую **микрошероховатость**, на ней присутствуют микровыступы, что значительно увеличивает активную удельную поверхность.

Усредненный химический состав волокон хризотил-асбеста: SiO_2 — 42 %, Al_2O_3 — 0,5 + 1,3 %, Fe_2O_3 — 1,4 %, Fe_2O — 0,5–2,0 %, MgO — 40–43 %, Na_2O — следы, H_2O (связанная) — 12,0–13,5 %. Физико-химические свойства волокон: прочность на разрыв более 300 МПа; плотность от 2,4 до 2,6 г/см³; температура плавления от 1 400–1 500°C; модуль упругости 16 000–20 000 МПа; щелочность: от 9,1 до 10,3 рН.

При изучении физико-механических свойств асфальтобетона объектом исследования служила горячая плотная мелкозернистая асфальтобетонная смесь Типа А, марки П, как наиболее широко распространенная при дорожном строительстве. Состав асфальтобетонной смеси был спроектирован без использования минерального порошка. Для каждой точки плана изготавливали по три образца на каждый вид испытаний, что соответствует требованиям ГОСТ 12801-2009. Общее количество сформованных образцов составило 243 шт. Такой объем выборки обеспечивает статистическую значимость результатов и позволяет провести дисперсионный анализ для оценки влияния факторов.

Приготовление смесей, формование и уплотнение образцов выполняли в лабораторных условиях по стандартным методикам, регламентированным ГОСТ 9128-2013 и ГОСТ 12801-2009. Первичную обработку экспериментальных данных проводили с использованием пакета прикладных программ STATISTICA. Для каждой функции отклика строили трёхмерные поверхности, определяли уравнения регрессии второго порядка, оценивали значимость коэффициентов по критерию Стьюдента и адекватность моделей по критерию Фишера. Оптимизацию состава выполняли методом построения обобщённых поверхностей отклика с учётом ограничений, заданных нормативными документами (ГОСТ 9128-2013). Функции отклика: Y_1 — водонасыщение, по объёму, % Y_2 — предел прочности при сжатии $R_{сж} 50C^0$, МПа; Y_3 — предел прочности при сжатии $R_{сж} 20C^0$, МПа; Y_4 — предел прочности при сжатии $R_{сж} 0C^0$, МПа; Y_5 — коэффициент водостойкости; Y_6 — коэффициент водостойкости при длительном водонасыщении; Y_7 — сдвигоустойчивость по коэффициенту внутреннего трения; Y_8 — сдвигоустойчивость по сцеплению при сдвиге при 50°C, МПа Y_9 — трещиностойкость, МПа.

Согласна промежуточных значений физико-механических показателей асфальтобетонных образцов была построена матрица данных, представленная в таблице 2.

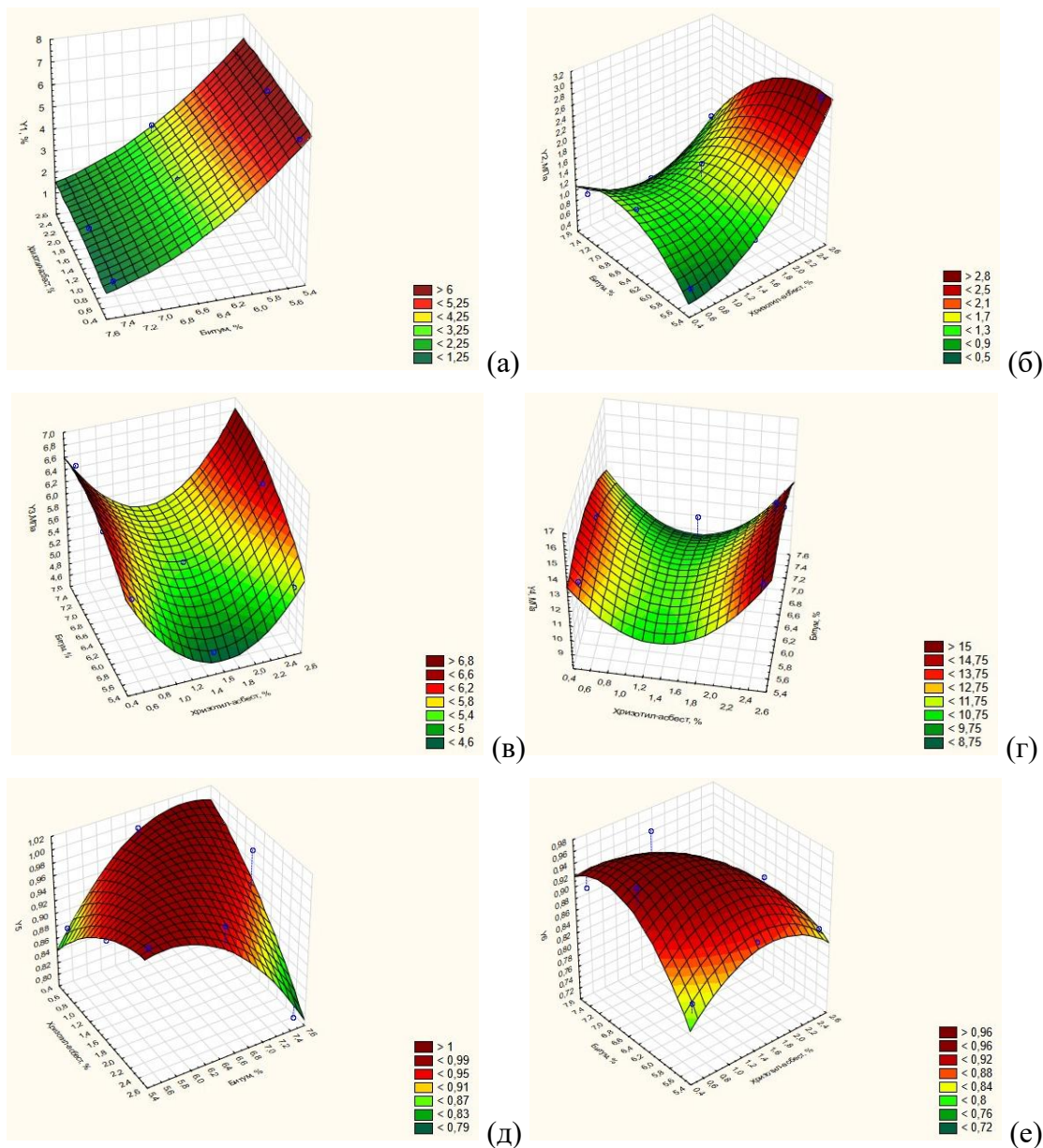
Таблица 2

Матрица данных

Точки плана	Факторы		Функции отклика								
	X ₁	X ₂	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈	Y ₉
1	0,5	7,5	1,42	0,95	6,51	11,59	0,97	0,90	0,94	0,29	5,58
2	0,5	6,5	2,91	1,36	6,19	13,69	1,00	0,96	0,89	0,39	5,43
3	0,5	5,5	6,38	0,62	5,91	13,60	0,88	0,83	0,88	0,28	4,52
4	1,5	7,5	1,64	0,69	5,46	10,34	0,99	0,95	0,93	0,27	5,28
5	1,5	6,5	3,23	1,65	5,39	9,97	0,95	0,91	0,91	0,41	5,26
6	1,5	5,5	6,58	0,91	4,69	10,34	0,93	0,88	0,90	0,27	4,1
7	2,5	7,5	1,46	1,37	6,56	11,66	0,79	0,73	0,94	0,36	4,99
8	2,5	6,5	3,77	2,15	6,40	15,87	0,98	0,88	0,88	0,45	4,80
9	2,5	5,5	6,35	2,97	5,47	14,83	0,99	0,85	0,87	0,27	4,53

Разработано авторами

Полученные с помощью пакета прикладных программ STATISTICA трехмерные поверхности функций отклика показаны на рисунке 3.



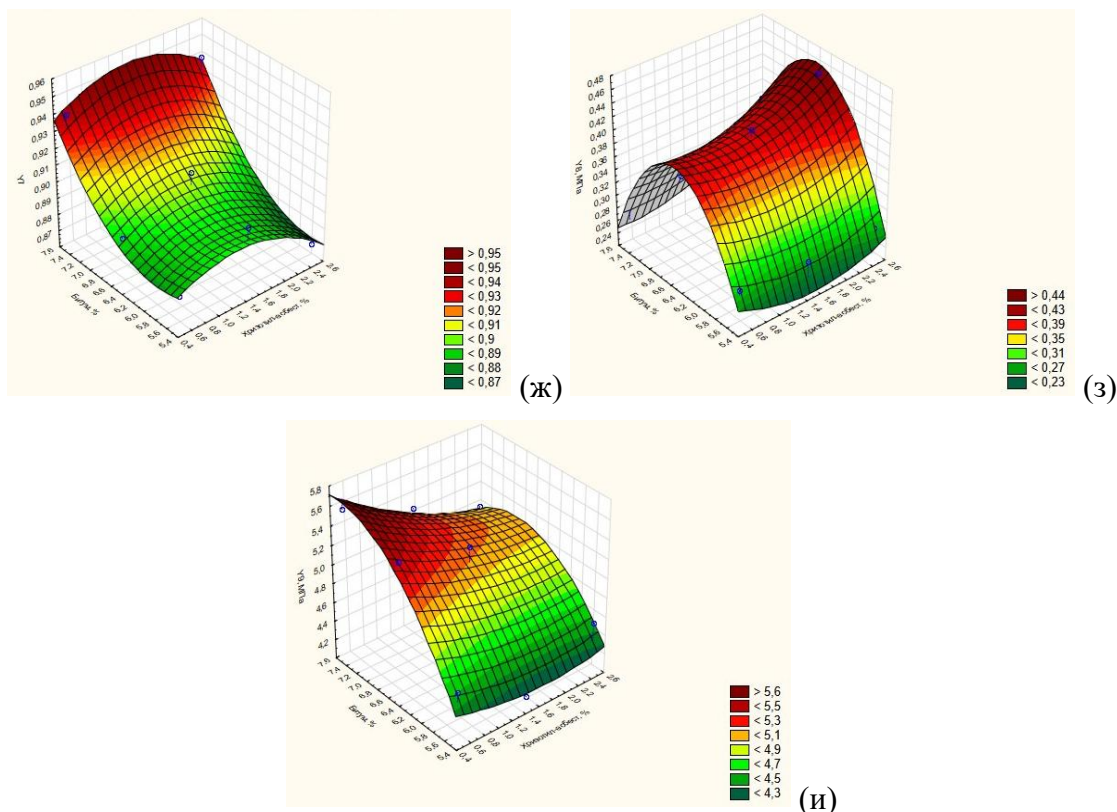


Рисунок 3. Поверхности функций откликов: (а) водонасыщение, % (требование ГОСТ 9128-2013 от 2 до 5 %); (б) предел прочности при сжатии $R_{сж} 50C^0$, МПа ($> 1,0$ МПа); (в) $R_{сж} 20C^0$, МПа ($> 2,5$ МПа); (г) $R_{сж} 0C^0$, МПа ($< 11,0$ МПа); (д) коэффициент водостойкости ($> 0,9$); (е) коэффициент водостойкости при длительном водонасыщении; (ж) сдвигоустойчивость по коэффициенту внутреннего трения; (з) сдвигоустойчивость при 50^0C , МПа ($> 0,25$); (и) трещиностойкость, МПа (от 3,0 до 5,5 МПа) (составлено авторами)

Используя программный комплекс, были получены уравнения регрессии (x — содержание хризотил-асбеста, y — содержание битума):

$$Y1 = 47,3551 + 0,3362*x - 11,1796*y - 0,1017*x^2 + 0,0175*x*y + 0,6683*y^2$$

$$Y2 = -21,2767 + 2,2696*x + 6,5638*y + 0,4867*x^2 - 0,4825*x*y - 0,4683*y^2$$

$$Y3 = -3,4362 - 3,8063*x + 3,1729*y + 0,9933*x^2 + 0,1225*x*y - 0,2267*y^2$$

$$Y4 = -26,8264 - 7,505*x + 14,0883*y + 3,3233*x^2 - 0,29*x*y - 1,1167*y^2$$

$$Y5 = -1,8708 + 0,5212*x + 0,7721*y - 0,0217*x^2 - 0,0725*x*y - 0,0517*y^2$$

$$Y6 = -2,1327 + 0,4354*x + 0,8546*y - 0,055*x^2 - 0,0475*x*y - 0,06*y^2$$

$$Y7 = 1,4324 + 0,0204*x - 0,1938*y - 0,0133*x^2 + 0,0025*x*y + 0,0167*y^2$$

$$Y8 = -4,8414 - 0,18*x + 1,6333*y + 0,0233*x^2 + 0,02*x*y - 0,1267*y^2$$

$$Y9 = 1,7968 + 0,045*x + 0,1383*y + 0,0067*x^2 - 0,01*x*y - 0,0083*y^2$$

На основе представленных уравнений регрессии проведён анализ влияния содержания волокон хризотил-асбеста на основные эксплуатационные характеристики асфальтобетона. Оценка значимости параметра выполнена по величине коэффициентов при линейном члене x и квадратичном члене x^2 , а также по характеру изменения функции отклика при варьировании x в исследуемом интервале (0,5–2,5 %).

Наибольшее положительное влияние содержание волокон хризотил-асбеста оказывает на: предел прочности при сжатии при 50°C (повышение прочности на 30–40 % при увеличении содержания волокон от 0,5 до 2,5 % при оптимальном битуме); предел прочности при сжатии при 0°C (снижение прочности до 25–30 % при введении волокон, что обеспечивает сохранение эксплуатационной целостности дорожного покрытия за счет увеличения его деформативности и эластичности, предотвращается хрупкое разрушение и трещинообразование при замерзании воды в порах); водонасыщение (косвенное влияние через изменение структуры порового пространства).

Меньшее влияние волокна хризотил-асбеста оказывают на: сдвигоустойчивость по коэффициенту внутреннего трения и по сцеплению при сдвиге; трещиностойкость (при высоком содержании волокон, свыше 1,5 %).

Для получения оптимальных значений битума и хризотил-асбеста в асфальтобетонной смеси, которые обеспечивают нормативные значения, сведем все полученные показатели по функциям отклика в общую таблицу 3.

Таблица 3

Показатели функций отклика

Показатель	Допустимые по ГОСТ 9128 содержание волокон хризотил-асбеста, % (X_1)	Допустимые по ГОСТ 9128 значения содержания битума, % (X_2)
Y1	0,4–2,5	6,0–7,6
Y2	0,4–2,6	5,0–7,6
Y3	0,4–2,6	5,0–7,6
Y4	0,8–1,8	5,0–7,6
Y5	0,8–1,8	5,0–6,8
Y6	0,9–2,6	5,4–7,6
Y7	1,2–2,2	6,0–7,6
Y8	0,4–2,6	5,8–7,2
Y9	0,4–2,6	5,8–7,4
Y10	0,9–2,6	5,4–7,6
Y11	0,4–2,6	6,0–7,2
Интервал оптимального значения	1,2–1,8	5,9–7,2

Разработано авторами

По совокупности изменений показателей, было установлено, что оптимальное содержание хризотил-асбеста находится в пределах от 1,2 до 1,8 %, для битума — от 5,9 до 7,2 %.

Оптимальный состав асфальтобетонной смеси определяется соотношением минеральных компонентов — щебня, песка, минерального порошка и отсевов дробления. По результатам проведённых исследований установлено, что для обеспечения требований ГОСТ 9128-2013 рациональное содержание компонентов составляет: щебень фракций 16–8 мм и 8–4 мм (в сумме) — 38–48 %; песок (отсев дробления) фракции 4–0 мм — 30–39 %; волокна хризотил-асбеста — 1,2–1,8 %; битум марок БНД 90/130 или БНД 70/100 — 5,9–7,2 % (сверх 100 % минеральной части).

Обсуждение

Волокна хризотил-асбеста представляют собой магнезиальные слоистые силикаты с трубчатой структурой: его кристаллы свёрнуты в трубочки диаметром 20–50 нм, что обеспечивает высокую адсорбционную активность и способность образовывать устойчивые композиции с битумом. Структура волокна хризотил-асбеста характеризуется прочными структурными связями. Это принципиально отличает его от целлюлозных волокон, которые

легко набухают и образуют развитую армирующую сетку за счёт проникновения углеводородов битума в межфибрилярное пространство. Для волокон хризотил-асбеста характерно, что они не набухают в битуме и не изменяют своей геометрии. Взаимодействие с битумом ограничивается поверхностной адсорбцией полярных компонентов битума (смола, асфальтены) на активных центрах волокон. Внутренние микрокапилляры волокон только частично заполняются масляными фракциями битума, в этой связи избирательная диффузия масел происходит частично. Это означает, что хризотил-асбест выполняет роль жёсткого структурообразователя, а не пластифицирующего агента. Эффективность его действия определяется не набуханием, а соотношением «удельная площадь волокон — количество битума».

Получены регрессионные зависимости физико-механических характеристик асфальтобетона из горячих асфальтобетонных смесей от содержания битумного вяжущего и волокон хризотил-асбеста позволяет осуществлять целенаправленное проектирование асфальтобетонных смесей различного функционального назначения.

Введение волокнистых материалов в асфальтобетон приводит к формированию пространственного микроармирующего каркаса, который изменяет механизм распределения внутренних напряжений возникающих в конструктивном слое при действии внешних нагрузок.

Увеличение прочности структуры асфальтобетона при повышенных температурах (50°C) окружающей среды достигается за счет высокой сорбционной активностью волокон хризотил-асбеста (удельная поверхность составляет 10–15 м²/г). При повышении температуры и как следствие снижения вязкости битума волокна обеспечивают снижение подвижности битума, предотвращая его миграцию и повышая сопротивляемость структуры сдвиговым деформациям. Кроме того, волокна перераспределяют внешнюю нагрузку с матрицы (битум-волокно) на армирующий каркас (щебень-песок), что позволяет повысить устойчивость конструктивного слоя в целом.

Нелинейность полученных зависимостей свидетельствует о существовании оптимального диапазона концентрации волокон (1,2–1,8 %), в котором достигается баланс между положительными эффектами армирования (рост сдвигустойчивости, повышение водостойкости) и возможными негативными проявлениями. В этом интервале формируется равномерная пространственная сетка из волокон без образования агломератов, а повышенная сорбционная активность компенсируется достаточным содержанием битума (5,9–7,2 %), что обеспечивает пластификацию контактов между волокнами.

Слабое влияние волокнистого компонента на показатели сдвигустойчивости объясняется тем, что данный параметр преимущественно определяется гранулометрией минерального скелета (щебень, песок) и качеством межзерновых контактов крупных фракций. Волокна, локализуясь в межчастичном пространстве, участвуют в формировании сцепления на микроуровне, однако не оказывают существенного влияния на макроструктуру минерального остова.

Повышение коэффициента водостойкости связано с тем, что волокна хризотил-асбеста, обладая гидрофильной природой поверхности, образуют с битумом устойчивые адсорбционные слои, препятствующие вытеснению вяжущего водной средой. Дополнительным фактором является снижение вероятности образования фильтрационных каналов в структуре материала благодаря равномерному распределению волокон.

Таким образом, регрессионные модели подтверждают значимость содержания волокон хризотил-асбеста как управляющего фактора, определяющего комплекс эксплуатационных свойств асфальтобетона, максимальная эффективность достигается при оптимизации состава в диапазоне 1,2–1,8 %.

Выводы

Научно обоснована возможность использования горных пород, вмещающих хризотил-асбест (серпентиниты Алапаевского массива), в качестве комплексного сырья для производства асфальтобетонных смесей.

Методами математического планирования эксперимента (полный факторный план) определён оптимальный состав асфальтобетона типа А марки П, не содержащий товарного минерального порошка. Рациональное содержание компонентов составляет: щебень (16–4 мм) — 38–48 %; отсев дробления фракции 4–0 мм — 30–39 %; свободные волокна хризотил-асбеста — 1,2–1,8 %; битум БНД 90/130 — 5,9–7,2 % (сверх 100 % минеральной части). Полученный состав удовлетворяет требованиям ГОСТ 9128-2013 по всем контролируемым показателям. В работе исследовались не столько показатели соответствия материала нормативным требованиям приемки, сколько закономерности влияния содержания свободных волокон хризотил-асбеста на эксплуатационные свойства асфальтобетона в сопоставительном аспекте. Использование ГОСТ 9128–2013 для решения поставленной задачи является обоснованным, так как гарантирует сопоставимость полученных результатов с данными предшествующих отечественных работ в области дисперсного армирования асфальтобетона.

Волокна хризотил-асбеста оказывают нелинейное влияние на физико-механические свойства асфальтобетона. Наибольший положительный эффект зафиксирован для предела прочности при сжатии при 50°C (увеличение на 30–40 %), коэффициента водостойкости (0,95–1,00) и сдвигоустойчивости.

Таким образом, применение вмещающих пород с природным содержанием хризотил-асбеста позволяет не только расширить сырьевую базу дорожно-строительных материалов, но и получить асфальтобетон с повышенными эксплуатационными характеристиками. Эффект достигается за счет формирования дополнительных структурных связей на различных уровнях, а также интенсификации процесса смешивания и равномерного распределения компонентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев, С.В. Воздействие природных факторов на состояние дорог в различных регионах России / С.В. Алексеев, Д.Л. Симонов, А.С. Катикова // Инновационные транспортные системы и технологии. — 2022. — Т. 8, № 4. — С. 14–30. — URL: <https://transstyst.ru/transj/article/view/115044> (дата обращения: 20.02.2026). — DOI: [10.17816/transstyst20228414-30](https://doi.org/10.17816/transstyst20228414-30). — EDN: [IJPNCA](https://www.edn.net/IJPNCA).
2. Очур-Оол, А.П. Кристаллическая структура минералов группы серпентина (хризотил-асбест) / А.П. Очур-Оол, Х.Б. Манзырыкчы, В.Н. Зырянова // Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки. — 2021. — № 4(86). — С. 14–22. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47698499> (дата обращения: 20.02.2026). — DOI: [10.24411/2221-0458-2021-86-14-22](https://doi.org/10.24411/2221-0458-2021-86-14-22). — EDN: [OVQHTJ](https://www.edn.net/OVQHTJ).
3. Яконцева, О.В. Использование горных пород с хризотиласбестом для производства асфальтобетонных смесей / О.В. Яконцева, К.Г. Пугин // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. — 2024. — № 3(284). — С. 37–42. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67852893> (дата обращения: 20.02.2026). — EDN: [FZMITYB](https://www.edn.net/FZMITYB).

4. Пугин, К.Г. Использование горных пород с хризотил-асбестом для производства асфальтобетона / К.Г. Пугин, О.В. Яконцева // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. — 2024. — № 2(54). — С. 16–29. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=74517818> (дата обращения: 20.02.2026). — DOI: [10.15593/2409-5125/2024.02.02](https://doi.org/10.15593/2409-5125/2024.02.02). — EDN: [HZCMZU](https://elibrary.ru/item.asp?id=74517818).
5. Пугин, К.Г. Структурообразование в асфальтобетоне при использовании минеральных порошков с высокой удельной поверхностью / К.Г. Пугин, О.В. Яконцева, К.Ю. Тюрюханов // Транспортные сооружения. — 2024. — Т. 11, № 2. — С. 15SATS224. — URL: <https://t-s.today/15SATS224.html> (дата обращения: 20.02.2026). — DOI: [10.15862/15SATS224](https://doi.org/10.15862/15SATS224). — EDN: [DOEOOF](https://elibrary.ru/item.asp?id=74517818).
6. Пугин, К.Г. Особенности использования местных минеральных материалов при производстве асфальтобетона / К.Г. Пугин, О.В. Яконцева // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. — 2022. — № 3. — С. 36–43. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49539297> (дата обращения: 20.02.2026). — DOI: [10.15593/24111678/2022.03.04](https://doi.org/10.15593/24111678/2022.03.04). — EDN: [RJGZQO](https://elibrary.ru/item.asp?id=49539297).
7. Яковлев, Г.И. Мелкозернистый бетон, модифицированный суспензией хризотилых нановолокон / Г.И. Яковлев, Р. Дрохитка, Г.Н. Первушин [и др.] // Строительные материалы. — 2019. — № 1-2. — С. 4–10. — URL: <https://journal-cm.ru/index.php/ru/zhurnaly/2019/vse-stati-za-2019/melkozernistyj-beton-modifitsirovannyj-suspenziej-khrizotilovykh-nanovolokon> (дата обращения: 20.02.2026). — DOI: [10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-4-10](https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-4-10). — EDN: [VVEYMW](https://elibrary.ru/item.asp?id=74517818).
8. Щепотин, Г.К. Повышение морозоустойчивости земляного полотна автомобильных дорог / Г.К. Щепотин, Н.А. Машкин // Известия высших учебных заведений. Строительство. — 2015. — № 3(675). — С. 85–91. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23764416> (дата обращения: 20.02.2026). — EDN: [UAAYPZ](https://elibrary.ru/item.asp?id=23764416).
9. Дондоков, З.Б.Д. Минерально-сырьевой комплекс Республики Бурятия: состояние и перспективы развития / З.Б.Д. Дондоков, Л.В. Потапов, Е.В. Кислов // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2015. — № 6. — С. 43–51. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24852432> (дата обращения: 20.02.2026). — EDN: [UXVZNR](https://elibrary.ru/item.asp?id=24852432).
10. Щеткова, Е.А. Хризотил как оптимальный армирующий агент для фибробетонов / Е.А. Щеткова, Р.В. Севастьянов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. — 2015. — № 2. — С. 174–191. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23752522> (дата обращения: 20.02.2026). — DOI: [10.15593/2224-9826/2015.2.12](https://doi.org/10.15593/2224-9826/2015.2.12). — EDN: [TZUERJ](https://elibrary.ru/item.asp?id=23752522).
11. Суворов, И.О. Влияние дисперсного полиармирования на усадочные деформации фибропенобетона неавтоклавного твердения / И.О. Суворов // Вестник Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова. — 2015. — № 1. — С. 32–35. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22860230> (дата обращения: 20.02.2026). — EDN: [TGGNCD](https://elibrary.ru/item.asp?id=22860230).
12. Пшеничных, О.А. Деформационно-прочностные характеристики дисперсно-армированных асфальтобетонов / О.А. Пшеничных // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. — 2020. — № 3(143). — С. 41–44. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44705891> (дата обращения: 20.02.2026). — EDN: [DFKTYM](https://elibrary.ru/item.asp?id=44705891).

13. Пшеничных, О.А. Сравнительный анализ физико-механических свойств двух видов асбеста в качестве армирующего материала для асфальтобетонной смеси / О.А. Пшеничных, Е.В. Оболенская, А.В. Волощук [и др.] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. — 2024. — № 1(165). — С. 63–68. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=68623262> (дата обращения: 20.02.2026). — EDN: [LCAVTK](#).
14. Братчун, В.И. О технико-экономической целесообразности комплексной модификации дорожных асфальтобетонов / В.И. Братчун, Н.И. Яркова, Э.Л. Радюкова, О.А. Пшеничных // Строитель Донбасса. — 2024. — № 3(28). — С. 33–38. — URL: <https://strdon.donnasa.ru/?p=2160&lang=en> (дата обращения: 20.02.2026). — DOI: [10.71536/sd.2024.3c28.5](https://doi.org/10.71536/sd.2024.3c28.5). — EDN: [SHVGVW](#).
15. Лукашевич, В.Н. Исследование изменений состояния и свойств волокон дисперсной арматуры в процессе строительства и эксплуатации асфальтобетонных покрытий / В.Н. Лукашевич, О.Д. Лукашевич // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2023. — Т. 25, № 3. — С. 185–196. — URL: <https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/1523> (дата обращения: 20.02.2026). — DOI: [10.31675/1607-1859-2023-25-3-185-196](https://doi.org/10.31675/1607-1859-2023-25-3-185-196). — EDN: [TQJNLC](#).
16. Пшеничных, О.А. Исследование усталостной долговечности дисперсно-армированных асфальтобетонов / О.А. Пшеничных, Е.А. Ромасюк, И.Е. Волощук [и др.] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. — 2023. — № 1(159). — С. 109–115. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53736431> (дата обращения: 20.02.2026). — EDN: [EPSGRE](#).

Pugin Konstantin Georgievich

Perm State Agrarian-Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov, Perm, Russia
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia
E-mail: 123zzz@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1768-8177>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=622336

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/F-8610-2019>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=55823720700>

Yakontseva Olga Valerievna

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia
E-mail: yakontseva.olga@yandex.ru

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57446060700>

Optimization of the composition and performance of asphalt concrete from rock formations containing chrysotile asbestos

Abstract. This article presents the results of a comprehensive study aimed at substantiating the feasibility of using rocks containing chrysotile asbestos (using the Alapaevsk chromite massif, Ural region, as an example) as an alternative mineral raw material for the production of asphalt concrete mixtures. It is demonstrated that the rock produced at the III Dayennyi Rudnik quarry, which contains chrysotile asbestos fibers, meets the physical and technical properties requirements for asphalt concrete mixture mineral components.

To optimize the composition of the asphalt concrete mixture, the authors used a full factorial experiment with varying fiber content (0,5–2,5 %) and bitumen (5,5–7,5 %). Regression models and three-dimensional response surfaces were constructed. The optimal chrysotile asbestos fiber content was determined to be 1,2–1,8 % and bitumen content was 5,9–7,2 % (over 100 % mineral content).

The asphalt concrete composition obtained by the authors is characterized by improved performance properties: compressive strength at 50°C increases by 30–40 % compared to compositions without reinforcement, the water resistance coefficient reaches 0,95–1,00, and crack resistance at 0°C remains within acceptable limits. It was shown that the high specific surface area (10–25 m²/g) and adsorption activity of chrysotile asbestos fibers allow for the complete elimination of commercial mineral powder from the asphalt concrete mixture, thereby reducing the economic and transportation costs of its production. The use of overburden and waste from chrysotile-containing deposits helps reduce the anthropogenic impact and expand the raw material base for road construction in regions experiencing a shortage of traditional aggregates. The proposed approach enables the design of asphalt concrete mixtures with predictable characteristics while simultaneously conserving resources and reducing the cost of asphalt concrete pavement construction.

Keywords: chrysotile asbestos; asphalt concrete; reinforcement; serpentinites; road construction; bitumen; building materials