

УДК 625.855.53

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА АСФАЛЬТОБЕТОНОВ НА ОСНОВЕ ИНЕРТНОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ ИЗ НЕУТИЛИЗИРУЕМЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ СТЕКЛА

Канд. техн. наук **Ю.Г. Борисенко**,
канд. архитектуры **А.Т. Максименко**,
канд. техн. наук **А.А. Солдатов**,
канд. техн. наук **С.О. Яшин**,
старший преподаватель **С.В. Рудак**
(Северо-Кавказский федеральный
университет (СКФУ)),
консультант **Р.М.М. Азан**
(Министерство общественных работ и дорог
Йеменской Республики)

Конт. информация: borisenko2005@yandex.ru;
rayanazz2014@gmail.com

Обоснована возможность использования в составах асфальтобетонных в качестве инертного заполнителя неселективных бытовых отходов стекла (стеклобоя). Предложены рациональные составы мелкозернистых асфальтобетонных на основе стеклобоя. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния фракционного состава и содержания стеклобоя в асфальтобетонной смеси на эксплуатационные свойства асфальтобетонных. Выявлено, что по основным эксплуатационным характеристикам разработанные составы асфальтобетонных на основе стеклобоя соответствуют требованиям действующих нормативных документов к дорожным горячим плотным мелкозернистым асфальтобетонным и могут быть рекомендованы для применения в слоях конструкций дорожных одежд.

Ключевые слова: *стеклобой, асфальтобетон, инертный заполнитель, физико-механические и эксплуатационные свойства, сдвигоустойчивость, теплостойкость, трещиностойкость, термостабильность, морозостойкость, износостойкость.*

ВВЕДЕНИЕ

Дефицит качественных инертных материалов для производства дорожных асфальтобетонных во многих регионах Российской Федерации является одной из актуальнейших проблем. Поиск альтернативного сырья с использованием местных материалов, отходов промышленности

или бытовых отходов при строительстве, ремонте и реконструкции автомобильных дорог позволит получить существенную экономию материальных, энергетических и финансовых ресурсов, а также обеспечить значительный экологический эффект. Это особенно актуально в связи с реализацией в Российской Федерации приоритетных государственных национальных проектов, одним из которых является национальный проект «Безопасные качественные дороги».

Другой приоритетной государственной программой является программа «Охрана окружающей среды» (Постановление Правительства РФ № 397 от 31.03.2020 г.), в рамках которой ставятся задачи комплексной утилизации бытовых и промышленных отходов. Правительством РФ утверждено распоряжение № 84-р (от 25.01.2018 г.) «Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года», в котором приведены основные ориентиры развития отрасли обращения с отходами. Стратегией предусматривается с 2019 г. запрет захоронения твердых бытовых отходов, в том числе стекла и стеклянной тары, являющимися ценным материалом, пригодным для повторного использования. В России в настоящее время на переработку направляется порядка 7,5 % стеклобоя, а 92,5 % – захоранивается. Суммарный объем образования отходов стекла в РФ по экспертным оценкам превышает 4 млн. т (из которых на оборотную стеклотару приходится всего 7 тыс. т, остальное – стеклобой) [1].

В настоящее время разрабатываются различные направления применения многотоннажных не утилизируемых отходов стекла в производстве строительных материалов, одним из которых является применение стеклобоя в качестве заполнителя конструкционных бетонов [2-4]. Однако использование стеклобоя в бетонах связано с рядом трудностей. Так, в бетонной смеси стеклобой ведет себя как ее активный компонент, вступая в химические реакции с другими составляющими. Это зачастую приводит к негативным последствиям: происходит недопустимое расширение бетона при снижении его коррозионной стойкости и т.д. Для нейтрализации влияния таких факторов требуется усложнять технологию приготовления бетона, применять различные ПАВ и добавки.

Имеется ряд исследований, посвященных применению стеклобоя в дорожно-строительных материалах на органических связующих [5-9].

В работах Мелконяна Р.Г., Власова С.Г., Минько Н.И. и др. [3, 6] указывается, что промышленный и бытовой стеклобой по прочности и зерновому составу близок к минеральным материалам, применяемых в асфальтобетонах, и вполне может их заменить. Применение стеклобоя способствует снижению расхода битума в смеси, улучшает рефлекти-

рующие свойства дорожного покрытия. Согласно результатам исследований [2], в битумоминеральных смесях рекомендуется применять стеклобой фракций крупностью не более 15 мм, потеря массы стеклобоя при испытаниях на дробимость не должна превышать 15 %, а содержание самого стеклобоя не должно превышать 50 % массы смеси. Выявлено, что введение в асфальтобетонную смесь более 10 % стеклобоя заметно ухудшает тепло-, водо- и морозостойкость получаемого материала.

В Великобритании для строительства дорожных покрытий предложен материал – гласасфальт (смесь стекла с асфальтобетоном), содержащий 45-73 % дробленого стекла [7]. Гласасфальт обладает рядом преимуществ по сравнению с обычным асфальтобетоном: возможность укладки при более низкой температуре; улучшение видимости покрытия в ночное время за счет отражения света фар автомобиля от микросфер стекла; повышение шероховатости поверхности покрытия, увеличение срока службы дорожного покрытия.

В США известен опыт применения асфальтобетона с содержанием 60 % молотого стекла, 33 % каменной муки и 5 % битума [8]. При его изготовлении возможно применение и несортированного стеклобоя.

На основании вышеизложенного, по нашему мнению, имеется большой потенциал использования многотоннажных не утилизируемых отходов стекла (в частности, неселективного бытового бутылочного стеклобоя) как инертного заполнителя для асфальтобетонных и битумоминеральных смесей.

Как известно, в качестве крупного заполнителя асфальтобетонов в основном применяется щебень, получаемый путем дробления прочных горных пород, крупного гравия и прочных нераспадающихся металлургических шлаков, а наиболее предпочтительными являются материалы, обладающие хорошим сцеплением с битумным вяжущим. Главным образом применяют заполнители из плотных прочных горных пород. Одним из основных требований к минеральному заполнителю является его высокая прочность. Так, прочность щебня из горных пород, характеризующаяся маркой, соответствующей пределу прочности при сжатии образцов-цилиндров исходной горной породы в водонасыщенном состоянии, должна составлять от 20 до 140 МПа [9].

Для приготовления асфальтобетонных смесей используются магматические и осадочные горные породы. Магматические горные породы (граниты, базальты, диабазы и др.) относятся к кислым породам, обладающим соответствующим для строительного камня минеральным составом, высокой механической прочностью при сжатии (от 120 до 390 МПа) [10-12], но недостаточно высокой прочностью при растяжении – 6,5-43 МПа [10]. Средняя плотность гранитов и гранитоидов составляет 2500-2800 кг/м³; общая пористость – 0,38-1,28 %; водопо-

глощение – 0,1-0,3 %, модули упругости – $7-8 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона – 0,25-0,3 [10]. Из осадочных горных пород наиболее применимыми в дорожно-строительной отрасли являются карбонатные (прочные известняки, доломиты), относящиеся к основным горным породам. Средняя плотность известняков и доломитов составляет 2000-2700 кг/м³, средние значения пористости – 6-7 % (до 15 %) [10, 11]. Кислые породы в асфальтобетонах и битумоминеральных композициях слабо вступают в химическое взаимодействие с битумным вяжущим, т.е. ведут себя как инертные материалы, роль которых сводится к созданию прочного каркаса композиции.

С целью обоснования возможности эффективного применения стеклобоя в асфальтобетонах и битумоминеральных композициях в качестве инертного плотного заполнителя был проведен анализ физико-механических, деформационных и технических свойств стекла, который показал следующее:

- Теоретическая прочность стекла при сжатии, рассчитанная исходя из природы и прочности химических связей в веществе, составляет порядка 10^5 МПа, при растяжении – $1-1,2 \cdot 10^4$ МПа. Фактическая прочность массивного стекла составляет 30-100 МПа при изгибе и 500-2000 МПа – при сжатии [10, 12], что не только сопоставимо, но и значительно выше аналогичных показателей многих магматических и карбонатных горных пород, применяемых в асфальтобетонных смесях.
- По данным разных авторов [10], например, для листового стекла допустимое напряжение составляет порядка 15-20 МПа. При постоянной нагрузке стекло может выдержать 15-20 % нагрузки при кратковременном воздействии, что вполне сопоставимо с эксплуатационными нагрузками в работе дорожных покрытий, которые составляют в среднем порядка 5-6 МПа (максимально – до 10-13 МПа) [13].
- Стекло обладает сходными с плотными горными породами деформационными и физико-механическими показателями: модуль упругости $E = 6,8-6,9 \cdot 10^4$ МПа; модуль сдвига $G = 2,8 \cdot 10^4$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,22$; плотность $\rho = 2500$ кг/м³; ударная вязкость – $1,35 \cdot 10^3$ Дж/м²; твердость по шкале Мооса – 6-7; микротвердость – 5400-6000 МПа [10].
- Стекло обладает высокими теплопроводностью (от 0,6 до 1,34 Вт/м · °С) и удельной теплоемкостью (от 0,3

до 1,05 кДж/ (кг · °С) [12], что имеет важное значение для технологических и эксплуатационных характеристик асфальтобетонов.

- Стекло относится к кислым материалам (содержание оксида кремния SiO₂ – более 65 %). Следовательно, в составе битумо-минеральных композиций оно будет вести себя в основном как инертный материал, заполняющий объем и создающий прочный каркас. Взаимодействие стекла с органическим вяжущим следует ожидать на уровне образования физико-химических связей (адгезии).
- Частицы стеклобоя, в сравнении с частицами щебня, в силу особенностей топографии своей поверхности (более гладкой и менее развитой), обладают меньшей удельной поверхностью и открытой пористостью. Учет этих факторов при применении в битумо-минеральных композициях позволит снизить битумоемкость получаемого композиционного материала.
- Замена дорогостоящих плотных заполнителей на стеклобой позволит снизить стоимость асфальтобетона и эффективно утилизировать бытовые отходы стекла.

Таким образом, применение стеклобоя в качестве инертного заполнителя асфальтобетонов и битумо-минеральных композиций вполне обосновано.

Были проведены экспериментальные исследования возможности эффективного использования в битумо-минеральных композициях наименее востребованных для вторичной переработки стеклоотходов – неселективного бытового бутылочного стеклобоя.

Материалы и методы исследований

В рамках экспериментальной работы были выполнены исследования горячих мелкозернистых асфальтобетонных смесей типа Б для IV и V дорожно-климатических зон с заполнителем, содержащим стеклобой, запроектированные в соответствии с требованиями ГОСТ 9128-2013. В составах асфальтобетонов использовали: гранитный щебень и отсеvy его дробления фракции 20-0,16 мм; активированный известняковый минеральный порошок МП-1; неселективные бытовые отходы стекла – несортированный бой бутылочного стекла (бесцветный (полубелый) и темный (зеленое и коричневое стекло)) фракции 20-5 мм; битум марки БНД 60/90, соответствующий нормативным требованиям ГОСТ к битумам нефтяным дорожным. Свойства щебня и стеклобоя представлены в **табл. 1**.

Свойства щебня и стеклобоя

| Показатели | Фактические значения | | Требования ГОСТ 8267-93*, ГОСТ 8736-93 |
|--|----------------------|------------------|--|
| | Ще- бень* | Стекло- бой** | |
| Истинная плотность, кг/м ³ | 2631 | 2656 | - |
| Средняя плотность, кг/м ³ | 2596 | 2540 | - |
| Насыпная плотность, ρ_n , кг/м ³ | 1326 | 1310 | - |
| Содержание пылевидных и глинистых частиц, % по массе, не более | 0,9 | нет | 2 |
| Марка по дробимости | 1000 | 800 | Не менее 1000 |
| Марка по истираемости | И-1 | - | И1 |
| Марка по морозостойкости | F-150 | - | Не ниже F50 |

Примечание: *производство щебня – ГУП СК «Кочубеевский карьер», Ставропольский край;

** стеклобой – несортированный бой бутылочного стекла.

Исследуемые составы асфальтобетонов типа Б содержали фракции стеклобоя, которыми заменяли те или иные аналогичные фракции плотного заполнителя. В предложенных составах варьировали содержание крупных фракций стеклобоя (20-5 мм) [14]. В качестве состава-прототипа использовали стандартную мелкозернистую асфальтобетонную смесь типа Б (ГОСТ 9128-2013). Замену фракций плотного запол-

нителя на стеклобой осуществляли исходя из равенства объемов долей проектируемых составов и зернового состава-прототипа на плотном заполнителе. Для этого определяли насыпную плотность каждой фракции щебня и соответствующей фракции стеклобоя.

При исследовании свойств асфальтобетонов на основе стеклобоя и асфальтобетонов-прототипов на плотном заполнителе использовались стандартные и нестандартизированные методы. Физико-механические и эксплуатационные свойства исследуемых асфальтобетонов определяли в соответствии с ГОСТ 12801-98 и ориентировались на нормативные требования к асфальтобетонным смесям типа Б, I марки применительно к местным условиям ЮГА России (IV и V дорожно-климатических зон).

Износостойкость (истираемость) асфальтобетонов определяли с помощью прибора для определения истираемости бетона и износостойкости неглазурованных керамических плиток ЛКИ-3М.

Термостабильность асфальтобетонов оценивали по коэффициенту термостабильности k_{mc} , представляющему отношение показателей прочности при сжатии образцов горячих легких битумоминеральных композиций при температурах 0 °С и 50 °С [15]:

$$k_{mc} = \frac{R_0}{R_{50}} \quad , \quad (1)$$

где

R_0 и R_{50} – прочность асфальтобетона при сжатии при 0 и 50 °С.

В результате проведения предварительных исследований были установлены рациональные составы асфальтобетонов, модифицированных стеклобоем, принятые к дальнейшим исследованиям. При этом ориентировались на максимальные показатели физико-механических свойств и максимально возможное содержание стеклобоя в асфальтобетонной смеси [14]. Зерновые составы и физико-механические свойства модифицированных стеклобоем асфальтобетонов (Составы 1 и 2) и асфальтобетона-прототипа на плотном заполнителе (Состав 3) представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Зерновые составы исследуемых асфальтобетонов, мас. %

| Состав | Фракции стеклобоя (СБ*) и щебня (Щ**) в составе смеси | | Размер зерен, мм, не более | | | | | | | | | |
|----------|---|------|----------------------------|----|------|------|------|------|------|-------|------|-------|
| | 15-10 | 10-5 | 20 | 15 | 10 | 5 | 2,5 | 1,25 | 0,63 | 0,315 | 0,16 | 0,071 |
| Состав 1 | Щ | СБ | 100 | 90 | 85 | 55,2 | 43,1 | 33,1 | 24,1 | 18,1 | 13 | 5 |
| Состав 2 | СБ | СБ | 100 | 90 | 85,4 | 55,5 | 43,4 | 33,3 | 24,2 | 18,2 | 13,1 | 5 |
| Состав 3 | Щ | Щ | 100 | 90 | 85 | 55 | 43 | 33 | 24 | 18 | 13 | 5 |

Примечание: СБ – бутылочный стеклобой; Щ** – гранитный щебень.*

Таблица 3

Физико-механические свойства асфальтобетонов, принятых к исследованию

| Составы | Фракции стеклобоя в смеси, мм | Содержание стеклобоя в смеси С _{сб} , мас. % | Содержание битума в смеси, С, мас. % | Плотность, ρ, кг/м ³ | Прочность при сжатии, МПа | | | Коэффициент водостойкости | | Водонасыщение, W, % |
|--|-------------------------------|---|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|------------------|---------------------|
| | | | | | R ₀ | R ₂₀ | R ₅₀ | k _в | k _{вод} | |
| Состав 1 | 10-5 | 29,8 | 5 | 2,38 | 8,1 | 4,2 | 2 | 0,92 | 0,84 | 2,6 |
| Состав 2 | 15-5 | 34,5 | 5 | 2,36 | 8,0 | 3,6 | 1,7 | 0,92 | 0,82 | 2,1 |
| Состав 3 | - | - | 5,5 | | 10,8 | 4,5 | 2,2 | 0,91 | 0,87 | 1,6 |
| Требования ГОСТ 9128-2013 к асфальтобетону тип Б; IV, V дорожно-климатические зоны | | | 5-6,5 | - | ≤13 | ≥2,5 | ≥1,3 | ≥0,85 | ≥0,75 | 1,5-4 |

Результаты экспериментальных исследований

Несмотря на то, что включение в состав асфальтобетонных смесей стеклобоя несколько снижает основные физико-механические показатели асфальтобетона, но и обеспечивает снижение битумоемкости на 0,5 %. Увеличение содержания стеклобоя в смеси ведет и к незначительному уменьшению плотности асфальтобетона. Установлено, что прочностные показатели (R_0 , R_{20} , R_{50}) и водостойкость (k_w , $k_{вод}$, W) модифицированных стеклобеем асфальтобетонов несколько ниже соответствующих показателей асфальтобетона-прототипа на плотном заполнителе, но полностью удовлетворяют требованиям ГОСТ.

Влияние фракционного состава и количества стеклобоя в смеси на физико-механические свойства модифицированных асфальтобетонов нами подробно обсуждалось в [14, 16]. В представленной работе обратимся к изложению и обсуждению результатов экспериментальных исследований влияния стеклобоя на эксплуатационные характеристики асфальтобетонов (сдвигоустойчивость, теплостойкость, термостабильность, трещиностойкость, морозостойкость, износостойкость).

Для оценки сдвигоустойчивости исследуемых асфальтобетонов определяли коэффициенты внутреннего трения ($tg\varphi$) и сцепление при сдвиге при температуре 50 °С (C_{π}). Результаты исследования представлены в табл. 4.

Таблица 4

Сдвигоустойчивость исследуемых асфальтобетонов

| Состав | Содержание стеклобоя в смеси, $C_{сб}$, мас. % | Содержание битума в смеси, C , мас. % | Коэффициент внутреннего трения, $tg\varphi$ | Сцепление при сдвиге при температуре 50 °С, C_{π} , МПа |
|--|---|---|---|---|
| Состав 1 | 29,8 | 5 | 0,86 | 0,43 |
| Состав 2 | 34,5 | 5 | 0,87 | 0,44 |
| Состав 3 | - | 5,5 | 0,96 | 0,57 |
| Требования ГОСТ 9128-2013 к асфальтобетону тип Б; IV, V дорожно-климатические зоны | | 5-6,5 | не менее 0,83 | не менее 0,38 |

В ходе проведенных исследований удалось выявить, что показатели сдвигоустойчивости модифицированных стеклобеем асфальтобетонов удовлетворяют требованиям ГОСТ 9128-2013. Следует отметить, что наличие стеклобоя в составах асфальтобетонных смесей обуславливает некоторое снижение сдвигоустойчивости асфальтобетона. Более значимое влияние стеклобой оказывает на снижение показателей сцепления при сдвиге C_{π} (так, согласно полученным данным, C_{π} исследуемых композиций в сравнении с прототипом снизилось на 23-24,5 %). Снижение показателей сцепления и коэффициентов внутреннего трения модифицированных асфальтобетонов обуславливается особенностями топографии поверхности стеклобоя (которая более сглаженная и менее развитая в сравнении с гранитным щебнем) и меньшей физико-химической активностью на поверхности раздела *битумное вяжущее – стекло*.

Теплостойкость предложенных составов асфальтобетонов, модифицированных стеклобеем, характеризуется показателями прочности при сжатии при 50 °С R_{50} (табл. 3). Согласно полученным результатам, теплостойкость модифицированных асфальтобетонов достаточно высокая и соответствует требованиям ГОСТ 9128-2013. С увеличением крупности фракций и содержания стеклобоя в составе асфальтобетонной смеси значения показателей прочности R_{50} снижаются.

Как известно, одной из характерных особенностей асфальтобетонов является способность в большой степени изменять свои свойства с изменением температуры. Поэтому одной из важнейших задач является разработка материалов, одинаково хорошо противостоящих образованию сдвиговых деформаций при высоких летних эксплуатационных температурах и трещинообразованию при низких зимних, т.е. материалов, обладающих высокой термостабильностью. Термостабильность предложенных составов асфальтобетонов на основе стеклобоя оценивали по коэффициенту термостабильности k_{mc} (табл. 5) (чем ниже значение этого коэффициента, тем менее подвержен температурному влиянию материал, т.е. тем он более термостабилен).

В результате проведенных исследований предложенных асфальтобетонов на основе стеклобоя и сравнения с асфальтобетоном-прототипом на плотном заполнителе выявлено, что присутствие в составе смесей стеклобоя повышает деформационную устойчивость материала в интервале эксплуатационных температур. Наиболее высокой термостабильностью ($k_{mc} = 4,05$) обладает битумоминеральная композиция с содержанием стеклобоя $C_{сб}$, равным 29,79 % мас. (Состав 1).

Трещиностойкость исследуемых материалов оценивали по показателю предела прочности на растяжение при расколе R_p . Согласно результатам исследований трещиностойкости модифицированных асфаль-

тобетонов (табл. 5), установлено, что значения R_p предложенных составов на основе стеклобоя удовлетворяют требованиям ГОСТ 9128-2013. Более высокий показатель R_p зафиксирован у композиции с более низким содержанием стеклобоя (Состав 1). Предел прочности на растяжение при расколе асфальтобетона-прототипа на плотном заполнителе (Состав 3, табл. 5) на 15,5-23,2 % выше R_p модифицированных отходами стекла композиций. Как известно, свойства асфальтобетонов при низких температурах в основном определяются свойствами битума и степенью структурирования битума минеральным наполнителем, а также степенью взаимодействия битумного вяжущего с минеральным заполнителем. Более низкие показатели трещиностойкости исследуемых смесей обусловлены менее прочными физико-химическими связями (пониженным сцеплением) между битумным вяжущим и частицами стекла.

Таблица 5

*Термостабильность и трещиностойкость
исследуемых асфальтобетонов*

| <i>Составы</i> | <i>Содержание стеклобоя в смеси $C_{сб}$, мас. %</i> | <i>Коэффициент термостабильности, $k_{мс}$</i> | <i>Предел прочности на растяжение при расколе, R_p, МПа</i> |
|---|---|---|--|
| Состав 1 | 29,8 | 4,05 | 4,52 |
| Состав 2 | 34,5 | 4,71 | 4,11 |
| Состав 3 | - | 4,91 | 5,35 |
| <i>Требования ГОСТ 9128-2013 к асфальтобетону тип Б; IV, V дорожно-климатические зоны</i> | | - | 4-6,5 |

Морозостойкость асфальтобетонов характеризуется количеством циклов замораживания-оттаивания, при достижении которых прочность при сжатии испытываемых образцов асфальтобетона при 20 °С снижается не более чем на 25 % от исходной прочности асфальтобетона. Морозостойкость образцов предложенных битумо-минеральных смесей на основе стеклобоя (Составы 1 и 2) и асфальтобетона-прототипа на

плотном заполнителе (Состав 3) определяли в соответствии с ГОСТ 12801-98. Результаты испытаний представлены в **табл. 6**.

Таблица 6

Показатели предела прочности при сжатии R_{20} и коэффициентов морозостойкости $k_{мрз}$ образцов битумоминеральных композиций и асфальтобетона-прототипа при испытании на морозостойкость

| Количество циклов замораживания и оттаивания | Предел прочности при сжатии при температуре 20 °С, R_{20} , МПа | | | Коэффициент морозостойкости, $k_{мрз}$ | | |
|--|---|----------|----------|--|----------|----------|
| | Состав 1 | Состав 2 | Состав 3 | Состав 1 | Состав 2 | Состав 3 |
| 0 | 4,22 | 3,84 | 4,64 | - | - | - |
| 25 | 4,47 | 3,89 | 4,76 | 1,06 | 1,01 | 1,03 |
| 50 | 3,97 | 3,49 | 4,65 | 0,94 | 0,91 | 1 |
| 75 | 3,5 | 3,07 | 4,38 | 0,83 | 0,8 | 0,94 |
| 100 | 3,25 | 2,88 | 4,29 | 0,77 | 0,75 | 0,92 |
| 125 | 2,87 | 2,53 | 4,18 | 0,68 | 0,66 | 0,9 |
| 150 | 2,79 | 2,3 | 4,01 | 0,66 | 0,6 | 0,86 |

Морозостойкость образцов асфальтобетонов на основе стеклобоя достаточно высокая и составила более 100 циклов попеременного замораживания и оттаивания. Необходимо отметить, что значение коэффициента морозостойкости ($k_{мрз}$) битумоминеральной композиции с содержанием стеклобоя 29,79 % мас. (Состав 1) после 100 циклов замораживания и оттаивания несколько выше, чем у битумоминеральной композиции с содержанием стеклобоя 34,44 % мас. (Состав 2). Морозостойкость асфальтобетона-прототипа на плотном заполнителе составила более 150 циклов замораживания и оттаивания.

Одним из основных видов повреждений дорожных покрытий является их преждевременный износ. Вследствие износа покрытия происходит его истирание, выкрашивание, шелушение, что в последующем провоцирует образование колеи или выбоин и приводит к значительному снижению ровности. При этом резко ухудшаются эксплуатационные качества дороги, ускоряется процесс разрушения дорожных покрытий, уменьшается скорость движения и межремонтный пробег автомобилей, ухудшаются условия безопасности движения, а также создается дискомфорт для пользователей.

Для сравнительной оценки износостойкости покрытий исследуемых асфальтобетонов применяли установку ЛКИ-3М и методику для определения истираемости бетона и износостойкости неглазурованных керамических плиток. Истираемость (износостойкость) асфальтобетонов характеризовали показателем истираемости G , зависящим от изменения потери массы испытуемых образцов при трении о вращающийся в горизонтальной плоскости истирающий диск. Для каждого испытания было приготовлено 4 образца. В качестве абразивного материала использовали смесь дробленого песка и природного песка. В ходе испытания каждый образец асфальтобетона проходил условно расстояние длиной 600 м. Результаты испытаний представлены в табл. 7.

Таблица 7

Показатели истираемости образцов битумоминеральных композиций на основе стеклобоя и плотного асфальтобетона-прототипа

| <i>Состав</i> | <i>Содержание стеклобоя в смеси, $C_{сб}$, % мас.</i> | <i>Показатель истираемости, G, г/см^2</i> |
|---------------|--|--|
| Состав 1 | 29,79 | 0,14 |
| Состав 2 | 34,44 | 0,16 |
| Состав 3 | - | 0,083 |

Установлено, что показатели истираемости G битумоминеральных композиций на основе стеклобоя почти в два раза превышают показатель истираемости асфальтобетона-прототипа на плотном заполнителе. С увеличением содержания бытовых отходов стекла в смеси показатель G увеличивается. Результаты испытаний показали, что наличие высокого содержания стеклобоя в асфальтобетоне снижает его износостойкость, что необходимо учитывать при его применении в дорожных конструкциях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обоснована возможность эффективного применения бытовых неселективных стекольных отходов (стеклобоя) в качестве минерального заполнителя асфальтобетонов для конструктивных слоев дорожных одежд, что обосновано следующим: стекло обладает высокой фактической прочностью, сопоставимой с прочностью традиционных плотных минеральных заполнителей; стекло обладает сходными с плотными горными породами физико-механическими, теплотехническими и деформационными характеристиками; стекло

относится к кислым материалам (содержание SiO_2 более 65 %) и в составе асфальтобетона будет вести себя как инертный заполнитель, обеспечивающий прочный каркас; включение фракций стеклобоя в состав асфальтобетона позволит обеспечить снижение битумоемкости смеси, так как частицы боя стекла в сравнении с щебнем обладают меньшей удельной поверхностью и малой открытой пористостью; замена дорогостоящих плотных заполнителей на отходы стекла (стеклобой) позволит снизить стоимость асфальтобетона и эффективно утилизировать бытовые отходы стекла.

2. В результате экспериментальных исследований физико-механических свойств разработаны рациональные составы мелкозернистых горячих асфальтобетонов на основе стеклобоя, отличающиеся пониженным количеством битума (C равно 5 % мас.) при оптимальном его содержании в смеси и содержанием стеклобоя $C_{сб}$ фракций 15-5 мм 29,79-34,44 % мас.
3. Выявлено, что сдвигоустойчивость и трещиностойкость предложенных асфальтобетонных смесей на основе стеклобоя полностью удовлетворяют требованиям ГОСТ 9128-2013 для дорожных горячих плотных мелкозернистых асфальтобетонов типа Б I марки для IV и V дорожно-климатических зон. Исследование термостабильности показало, что добавление стекла в состав асфальтобетонной смеси способствует повышению деформативной устойчивости асфальтобетона при высоких эксплуатационных температурах и повышению деформационной устойчивости при низких эксплуатационных температурах.
4. В результате экспериментальных исследований установлена достаточно высокая морозостойкость образцов из асфальтобетона на основе стеклобоя, которая составила более 100 циклов попеременного замораживания и оттаивания.
5. Результаты испытаний на износостойкость (истираемость) позволили выявить негативное влияние стеклобоя в составе асфальтобетона на износостойкость покрытия. Данный важный фактор необходимо учитывать при проектировании асфальтобетонных смесей на основе стеклобоя, в связи с этим (на данном этапе исследований) их рекомендуется применять в нижних слоях дорожных покрытий.
6. Более низкие показатели ряда эксплуатационных свойств исследуемых асфальтобетонов на основе стеклобоя (например, морозостойкость и износостойкость) обусловлены недостаточно высокой адгезией битумного вяжущего и стеклобоя и не позволяют рекомендовать предложенные составы для применения в верхних слоях дорожных одежд. Повысить сцепление заполнителя из стеклоотходов с битумом возможно путем применения различных добавок и ПАВ,

поэтому целесообразным является проведение дальнейших исследований в этом перспективном направлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аналитический отчет DISCOVERY RESEARCH GROUP. Анализ рынка переработки стеклобоя (отходов стекла) в России. – 2019. – 101 с.*
2. *Белокопытова А.С. Разработка процессов утилизации стеклобоя путем создания композиционных материалов: дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2006. – 199 с.*
3. *Мелконян Р.Г. Экологические и экономические проблемы использования стеклобоя в производстве стекла / Р.Г. Мелконян, С.Г. Власова. – Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2013. – 100 с.*
4. *Пузанов С.И. Оценка комплексного воздействия стеклобоя на окружающую среду и совершенствование технологий его вторичного использования: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2010. – 184 с.*
5. *Павлушкин Т.К. Использование стекольного боя в производстве строительных материалов / Т.К. Павлушкин, Н.Г. Кисиленко // Стекло и керамика. – 2011. – № 5. – С. 27-34.*
6. *Минько Н.И. Использование стеклобоя в технологии материалов строительного назначения / Н.И. Минько, В.В. Калатози // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2018. – № 1. – С. 82-86.*
7. *Зайцев Е.И. Строительные безобжиговые композиты на основе боя технических стекол // Российский химический журнал. – 2003. – Т. XLVII. – № 4. – С. 26-31.*
8. *Miller I.J. Uses for waste glass a survey / I.J. Miller, M.D. Bailey // Report. – 1981. – № 2289. – P. 33.*
9. *Строительные материалы. Учебно-справочное пособие / Под ред. Г.А. Айрапетова, Г.В. Несветаева. – Ростов-на-Дону: «Феникс», 2004. – 608 с.*
10. *Строительные материалы: Справочник / Под ред. А.С. Болдырева, П.П. Золотова. – М.: Стройиздат, 1989. – 567 с.*
11. *Микульский В.Г. Строительные материалы (материаловедение и технология). – М.: ИАСВ, 2002. – 536 с.*
12. *Рыбьев И.А. Строительное материаловедение. – М.: Высшая школа, 2002. – 701 с.*
13. *Гезенцевей Л.Б. Дорожный асфальтобетон / Л.Б. Гезенцевей, Н.В. Горелышев, А.М. Богуславский, И.В. Королев. – М.: Транспорт, 1985. – 350 с.*

14. Борисенко Ю.Г. Битумоминеральные композиции для дорожного строительства с использованием бытовых отходов стекла (стеклобоя) / Ю.Г. Борисенко, Р.М.М. Азан, Д.П. Швачев, Д.А. Воробьев // *Строительные материалы*. – 2019. – № 5. – С. 51-56.
15. Борисенко О.А. Битумоминеральные композиции, модифицированные отсевами дробления керамзита для асфальтовых материалов с повышенными термостабильностью и трещиностойкостью: дис. ... канд. техн. наук. – Воронеж, 2008. – 185 с.
16. Amin Al-Fakin M. Bituminous Mineral Compositions for Paving with Cullet / M. Al-Fakin Amin, R.M. Azan., U.G. Borisenko, D.P. Shvachev, etc. // *Case Studies in Construction Materials*. – 2020. – Vol. 12(2) – PP. 2-9.

L I T E R A T U R A

1. *Analiticheskij otchet DISCOVERY RESEARCH GROUP. Analiz rynka pererabotki stekloboya (otходov stekla) v Rossii*. – 2019. – 101 s.
2. Belokopytova A.S. *Razrabotka processov utilizacii stekloboya putem sozdaniya kompozicionnyh materialov: dis. ... kand. tekhn. nauk.* – Moskva, 2006. – 199 s.
3. Melkonyan R.G. *Ekologicheskie i ekonomicheskie problemy ispol'zovaniya stekloboya v proizvodstve stekla* / R.G. Melkonyan, S.G. Vlasova. – Ekaterinburg: Izd-vo Ural. Un-ta, 2013. – 100 s.
4. Puzanov S.I. *Ocenka kompleksnogo vozdejstviya stekloboya na okruzhayushchuyu sredu i sovershenstvovanie tekhnologij ego vtorichnogo ispol'zovaniya: Dis. ... kand. tekhn. nauk.* – Perm', 2010. – 184 s.
5. Pavlushkin T.K. *Ispol'zovanie stekol'nogo boya v proizvodstve stroitel'nyh materialov* / T.K. Pavlushkin, N.G. Kisilenko // *Steklo i keramika*. – 2011. – № 5. – S. 27-34.
6. Min'ko N.I. *Ispol'zovanie stekloboya v tekhnologii materialov stroitel'nogo naznacheniya* / N.I. Min'ko, V.V. Kalatozi // *Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova*. – 2018. – № 1. – S. 82-86.
7. Zajcev E.I. *Stroitel'nye bezobzhigovye kompozity na osnove boya tekhnicheskikh stekol* // *Rossijskij himicheskij zhurnal*. – 2003. – T. XLVII. – № 4. – S. 26-31.
8. Miller I.J. *Uses for waste glass a survey* / I.J. Miller, M.D. Bailey // *Report*. – 1981. – № 2289. – R. 33.
9. *Stroitel'nye materialy. Uchebno-spravocnoe posobie* / Pod red. G.A. Ajrapetova, G.V. Nesvetaeva. – Rostov-na-Donu: «Feniks»,

2004. – 608 s.
10. *Stroitel'nye materialy: Spravochnik / Pod red. A.S. Boldyreva, P.P. Zolotova. – M.: Strojizdat, 1989. – 567 s.*
 11. *Mikul'skij V.G. Stroitel'nye materialy (materialovedenie i tekhnologiya). – M.: IASV, 2002. – 536 s.*
 12. *Ryb'ev I.A. Stroitel'noe materialovedenie. – M.: Vysshaya shkola, 2002. – 701 s.*
 13. *Gezencvej L.B. Dorozhnyj asfal'tobeton / L.B. Gezencvej, N.V. Gorelyshev, A.M. Boguslavskij, I.V. Korolev. – M.: Transport, 1985. – 350 s.*
 14. *Borisenko Yu.G. Bitumomineral'nye kompozicii dlya dorozhnogo stroitel'stva s ispol'zovaniem bytovyh othodov stekla (stekloboya) / Yu.G. Borisenko, R.M.M. Azan, D.P. Shvachev, D.A. Vorob'ev // Stroitel'nye materialy. – 2019. – № 5. – S. 51-56.*
 15. *Borisenko O.A. Bitumomineral'nye kompozicii, modifitsirovannye otsevami drobleniya keramzita dlya asfal'tovykh materialov s povyshennymi termostabil'nost'yu i treshchinostojkost'yu: dis. ... kand. tekhn. nauk. – Voronezh, 2008. – 185 s.*
 16. *Amin Al-Fakin M. Bituminous Mineral Compositions for Paving with Cullet / M. Al-Fakin Amin, R.M. Azan., U.G. Borisenko, D.P. Shvachev, etc. // Case Studies in Construction Materials. – 2020. – Vol. 12(2) – PP. 2-9.*

.....

**PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF ASPHALT CONCRETES
BASED ON INERT FILLER FROM NON-RECYCLED HOUSEHOLD
GLASS WASTE**

Ph. D. (Tech.) Yu.G. Borisenko,

Ph. D. (Architecture) A.T. Maksimenko,

Ph. D. (Tech.) A.A. Soldatov,

Ph. D. (Tech.) S.O. Iashin,

Senior Lecturer S.V. Rudak

*(North-Caucasian Federal
University (NCFU)),*

Consultant R.M.M. Azan

*(Ministry of Public Works and Roads
of the Republic of Yemen)*

*Contact information: borisenko2005@yandex.ru;
rayanazz2014@gmail.com*

The possibility of using non-selective household glass waste (cullet) in asphalt concrete compositions as an inert filler has been justified. Rational

compositions of fine-grained asphalt concrete based on cullet are proposed. The results of experimental studies of the fractional composition and content of cullet influence in asphalt concrete mixture on the performance characteristics of asphalt concrete are presented. It is revealed that according to the main performance characteristics the developed compositions of asphalt concrete based on cullet meet the requirements of the current regulatory documents for road hot dense fine-grained asphalt concrete and can be recommended for using in pavement structures layers.

Key words: *cullet, asphalt concrete, inert filler, physical-mechanical and performance characteristics, shear resistance, heat resistance, crack resistance, thermostability, frost resistance, wear resistance.*

Рецензент: канд. техн. наук С.В. Полякова (ФАУ «РОСДОРНИИ»).

Статья поступила в редакцию: 17.03.2022 г.