

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОКОНТАКТНОГО АСФАЛЬТОБЕТОНА

Традиционно в РФ на дорогах с интенсивным движением для верхнего слоя асфальтобетонного покрытия используется щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь, которая обладает такими преимуществами как: сдвигоустойчивость, трещиностойкость и, самое важное, износостойкость — устойчивость к абразивному износу от шипованной резины. При этом чем крупнее ЩМА, тем более высокой стойкостью к износу обладает покрытие из него. По данным [1] при увеличении средневзвешенного размера зерен каркаса образующей фракции на 1 мм относительная скорость износа снижается примерно на 10%.

Д. А. Колесник, руководитель группы исследования строительных материалов, АО «ВАД»

Д. В. Пахаренко, главный технолог, АО «ВАД»



На дорогах с большим транспортным потоком, например, как КАД вокруг Санкт-Петербурга или а/д «Скандинавия», применяется SMA-19 по ГОСТ 58401.2 [2] или может применяться ЩМА-30 по СТО 34390716.042–2012 [3]. Большое количество щебня, его крупность, а также высокое содержание вяжущего дает ЩМА преимущество перед остальными видами асфальтобетона. Но эти же преимущества ЩМА приводят к его недостаткам, в первую очередь, экономическим — высокая стоимость щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси, во вторую — это технологические ограничения по укладке тонких слоев: чем крупнее щебень, чем больше размер ЩМА, тем толще должен быть укладываемый слой покрытия. Обычно толщина укладываемого слоя — более 2,5–3,0 размеров зерна, т.е. для SMA-19 это как минимум 5 см, для более крупных смесей SMA-22 или ЩМА-30 это будет уже как минимум 6 см. При допустимой в процессе эксплуатации глубине колеи износа в 2,5 см мы получаем нерациональное использование материалов, поскольку истирание происходит неравномерно по всей площади покрытия. Получается, у нас есть две основные проблемы, которые выливаются в следующую форму: применять ЩМА — это дорого, а устройство толстых слоев для покрытий износа экономически не рационально.

Для решения этих проблем нам необходимо разработать, спроектировать, подобрать такую асфальтобетонную смесь, которая будет способна обеспечить такие же физико-механические свойства как у ЩМА или даже выше, в особенности по колее износа, для обеспечения высокого срока эксплуатации, но при этом будет, как минимум, дешевле, чем ЩМА, и, как максимум, иметь высокую технологичность — возможность укладки тонкими слоями (3–4 см). Из всего этого можно выделить две основные задачи, которые требуют решения:

1. Обеспечение износостойкости;
2. Снижение стоимости.

Первая задача по повышению износостойкости является приоритетной, поскольку ее решение непосредственно повышает безопасность движения на автодороге и увеличивает межремонтные сроки по замене слоя износа. При рассмотрении первой проблемы было определено, что износ покрытия, в основном, зависит от применяемого каменного материала — его качества, количества и размерности. В меньшей степени износ зависит от качества и количества вяжущего. Таким образом, применение большого количества качественного, крупного износостойкого щебня повышает устойчивость асфальтобетона к абразивному износу, что подтверждается и теорией, и практикой. В ЩМА

применение крупной фракции щебня ограничивается требованием ГОСТа к зерновому составу и на момент постановки задачи в нашей организации применялись ЩМА с максимальным содержанием крупной фракции, а значит, и с максимальным средневзвешенным размером зерна. Мы сформулировали для себя вопросы: как увеличить средневзвешенный размер щебня? Какое максимальное количество крупного щебня можно вовлечь в асфальтобетонную смесь, чтобы на дороге получить плотный асфальтобетон с содержанием воздушных пустот (остаточной пористостью) 4%.

МИНЕРАЛЬНО-МАСТИЧНЫЙ АСФАЛЬТОБЕТОН (ММС)

Для решения поставленных вопросов мы решили взять щебень одной крупной фракции и провести наложение его пустот таким образом, чтобы получить плотную смесь. Но как узнать, какое максимальное количество зерен крупного щебня можно вовлечь в смесь, да еще так, чтобы смесь была при этом плотной, чтобы содержание пустот было в пределах 3,5–4,0%? Известно, что на однофракционном материале очень легко получить дренирующий асфальтобетон, но нам для наших погодных-климатических условий не нужна такая высокая пустотность. Нами был разработан свой, новый метод подбора состава асфальтобетонной смеси, основанный на уже

существующих методиках объемного проектирования и с использованием гиратора. Гиратор позволяет замерять геометрическую плотность в процессе изготовления образца, этой способностью машины мы воспользовались для решения нашей задачи, для проектирования смеси с максимальным содержанием крупного щебня, мы назвали ее «минерально-мастичная смесь» (ММС).

Подготовленный чистый щебень взвешивался, затем равномерно опрыскивался и смачивался водой, засыпался в форму гиратора и подвергался уплотнению до 100 оборотов. Важно для получения правильного результата взвешивать сухой щебень, вносить эту цифру в расчет (в гиратор) и только потом смачивать его водой из распылителя для снятия трения между зернами в процессе уплотнения на гираторе. Процедуру повторяют несколько раз, для получения более точного результата — гираторной плотности крупного заполнителя. Далее проводится расчет пустот в крупном заполнителе и путем несложных расчетов, которые будут приведены ниже, проводим наполнение каркасообразующей структуры отсевом, минеральным порошком, пылью и вяжущим — так, чтобы достичь оптимальных показателей пустот в минеральном заполнителе (ПМЗ более 17%) и содержания воздушных пустот уже в асфальтобетонном образце 4% без раздвижки основного каркаса. Методика этого испытания будет рассмотрена более подробно. В итоге в лаборатории мы получили подбор минерально-мастичной смеси (таблица 1) с максимально возможным количеством щебня, без раздвижки зерен, контактной структуры и с содержанием пустот в гираторных образцах 3,7%. К сожалению, максимально возможное количество крупного щебня оказалось не такой большой цифрой — всего 77%. Больше его количество приведет к увеличению пустотности и невозможно получить плотное покрытие на дороге. На рисунке 2 представлен общий вид и структура полученного асфальтобетона на основе ММС-20 по разрезанным гираторным образцам.

Таблица 1. Зерновой состав минерально-мастичной смеси ММС-20 с максимальным содержанием крупной фракции и контактной структурой

№	Наименование материала	Содержание, %
1	Щебень габбро-диабаз фр. 10-15мм	77
2	Песок из отсева дробления габбро-диабаз фр. 0-5мм	11
3	Минеральный порошок	7
4	Пыль уноса	5
5	Полимерно-битумное вяжущее ПБВ-60	5,3
6	Технологическая целлюлозная добавка	0,4



Рисунок 1. Первая укладка минерально-мастичной смеси (ММС-15). Вологодская обл., 3 июня 2015 г.

Таблица 2. Результаты испытаний кернов из покрытия на абразивный износ по Праллю

№	Наименование, вид смеси	Место отбора	Объемная плотность образца, г/см ³	Величина истирания, мл, по данным ФКУ «Северо-Запад»
1	Тонкослойное покрытие ММС-15	М 8 км 417-437 ПК 166+00 право	2,590	39
2	Тонкослойное покрытие БМС-15 традиционная	М 8 км 417-437 ПК 167+60 право (2 полоса от обочины)	2,581	52
3	Тонкослойное покрытие ММС-20	М 8 км 417-437 ПК 167+00 право	2,624	24
4	Тонкослойное покрытие из традиционного ЩМА-20	М 8 км 417-437 ПК 167+60 право (1 полоса от обочины)	2,626	27

Первая минерально-мастичная смесь (ММС-15 и ММС-20) появилась под Вологдой в июне 2015 г. в переходной-скоростной полосе (рисунок 1). ММС-15 содержала 70% щебня фракции 10–15 мм и была уложена слоем 3,5–4 см. Тогда мы просто заменили всю щебеночную часть ЩМА одной фракцией щебня, провели серию лабораторных тестов, которые показали хорошие результаты, и сделали небольшой опытный участок.

В таблице 2 представлены результаты испытания на износ кернов, отобранных из асфальтобетонного покрытия с опытно-экспериментального участка. Если сравнить ММС-15 с традиционно применяемой асфальтобетонной смесью для тонкослойных покрытий типа Novachip БМС-15, то у нас есть значительный прирост в 25% по лабораторной величине истирания. Сравнение ММС-20 и стандартного ЩМА-20 показывают уже меньшую разницу — примерно

в 10%, но все же смесь ММС-20 имеет чуть лучший результат. Технологически укладывать ЩМА-20 и ММС-20 тонким слоем 3–3,5 см очень сложно, возникают дефекты покрытия, поэтому приходится поднимать толщину, таким образом, для тонких слоев смеси с крупностью зерна 20 мм не подходят.

По факту ММС очень близка к ЩМА, но за счет чуть большего количества щебня крупной фракции обладает лучшей износостойкостью (таблица 2), при этом сдвигустойчивость и трещиностойкость обеспечиваются применением качественного ПБВ, что подтверждается как результатами испытаний в лаборатории, так и практикой.

Следующим значительным шагом было строительство опытно-экспериментального участка с ММС-20 по рецепту, приведенному в таблице 1, на Кольцевой автомобильной дороге (КАД) в Санкт-Петербурге. Высокая скорость транспортного

потока и сверхнормативная интенсивность движения на КАД обеспечивают быструю и эффективную проверку работоспособности нового асфальтобетона, его устойчивости к воздействию шипованной резины. Строительство участка было выполнено в сентябре 2016 г. По согласованию с Заказчиком было устроено несколько опытно-экспериментальных участков в виде асфальтобетонного покрытия толщиной 5 см протяженностью примерно по 1 км. В течение двух лет весной проводились замеры фактической глубины колеи. Полученные результаты представлены в таблице 3. В качестве эталонного, контрольного участка здесь выступал ЩМА-20 с закругленным, в рамках ГОСТ 31015, зерновым составом. К сожалению, летом 2018 года участки попали в адресную программу по устранению колеи, поэтому у нас есть данные только по двум годам эксплуатации на КАД.

Фактические результаты свидетельствуют о преимуществе минерально-мастичного асфальтобетона по колее износа после двух лет эксплуатации на КАД, где интенсивность превышает 25 тыс. авт./сутки по полосе, в среднем за 2 года эксплуатации колея на асфальтобетоне из ММС-20 меньше на 2,0–5,0 мм в сравнении с ЩМА-20 и SMA-19 на одинаковых каменных материалах и вяжущем.

В августе 2018 года на КАД в Санкт-Петербурге в районе Софийской развязки был построен еще один опытно-экспериментальный участок с асфальтобетонной смесью ММС-20, SMA-19 на щебне габбро-диабазе и SMA-19 на щебне гранит. Это один из самых интенсивных участков кольцевой автодороги. По данным ФКУ Упрдор «Северо-Запад» за год по третьей полосе проехало 10 592 090 автомобилей, приведенных к легковому, со средней скоростью 89 км/час, что примерно соответствует 7–9 годам эксплуатации дороги третьей



Рисунок 2. ММС-20 укладка тонким (3 см) слоем в Вологодской обл.; структура разрезанных гираторных образцов.

Таблица 3. Результаты замеров колеи на опытно-экспериментальных участках на КАД в Санкт-Петербурге, эксплуатируемых с сентября 2016 г. по март 2018 г.

№	Наименование материала	Адрес участка	Глубина колеи, мм	
			Май 2017 г.	Март 2018 г.
1	ЩМА-20 на ПБВ-60 (закругленный состав)	КАД прямой ход внутренний, 4-я полоса от КМ 73+900 до КМ 74+840	6,0	18,0
2	SMA-19 на PG 76-28	КАД прямой ход внутренний, 4-я полоса КМ 74+840 по КМ 75+730	7,0	21,5
3	ММС-20 на ПБВ 60	КАД прямой ход внутренний, 4-я полоса КМ 75+730 по КМ 76+335	7,0	16,0
4	ЩМА-20 на ПБВ-60 (закругленный состав)	КАД обратный ход внешний, 3-я полоса КМ 66+000 по КМ 66+640	7,0	22,0
5	SMA-19 на PG 76-28	КАД обратный ход внешний, 3-я полоса КМ 66+640 по КМ 67+600	8,0	24,5
6	ММС-20 на ПБВ 60	КАД обратный ход внешний, 3-я полоса КМ 67+600 по КМ 68+680	6,0	19,5

Таблица 4. Результаты мониторинга колеи на опытно-экспериментальных участках на КАД в Санкт-Петербурге, август 2018 г. — 2020 г.

№	Наименование материала	Глубина колеи, мм		
		Апрель 2019г.	Ноябрь 2019г.	Сентябрь 2020г.
1	SMA-19 PG 76-28 щебень габбро-диабаз	11	12,5	23,4
2	SMA-19 PG 76-28 щебень гранит	11	12,5	20,2
3	ММС-20 ПБВ-60 (PG 76-28) щебень габбро-диабаз	9	11,5	19,0

технической категории, а два года эксплуатации на КАД будут уже соответствовать 14–18 годам эксплуатации асфальтобетона. Результаты наблюдений по суммарной колее приведены в таблице 4. Щебеночно-мастичный асфальтобетон на граните, запроектированный объемно-функциональным способом, в процессе эксплуатации показал себя хорошо относительно такого же SMA-19 на диабазе, но у минерально-мастичного асфальтобетона ММС-20 на диабазе по суммарной глубине колеи есть преимущества в 1,2–3,4 мм по сравнению с SMA. Таким образом, по результатам фактических наблюдений можно с уверенностью сказать, что минерально-мастичная смесь может использоваться для устройства износостойких покрытий автомобильных дорог с высокой интенсивностью.

ОПТИМИЗАЦИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА SMA

SMA-19, запроектированное по объемно-функциональному методу, только активно начинается внедряться в России, поэтому состав SMA можно рассматривать с точки зрения оптимизации для улучшения характеристик износостойкости. Таким образом, была поставлена еще одна цель: сделать щебеночно-мастичную асфальтобетонную смесь с максимальной плотной компоновкой, упаковкой щебня в асфальтобетоне. Т.е. найти максимально возможно плотную компоновку, упаковку щебеночного материала. Максимальная упаковка щебня в асфальтобетоне обеспечит нам как высокую колеестойкость, так и трещиностойкость асфальтобетона. За счет большого числа контактов крупного минерального

Таблица 5. Значение проходов для линий максимальной плотности

НМРЗ, мм	МРЗ, D _{max} , мм	Размер сита d _i , мм, проход в % для линий максимальной плотности (ЛМП)													
		45,0	31,5	22,4	16,0	11,2	8,0	4,0	2,0	1,0	0,5	0,25	0,125	0,063	
11,2	16				100	85,2	73,2	53,6	39,2	28,7	21,0	15,4	11,3	8,3	
16	22,4			100	85,9	73,2	62,9	46,1	33,7	24,7	18,1	13,2	9,7	7,1	
22,4	31,5		100	85,8	73,7	62,8	54,0	39,5	28,9	21,2	15,5	11,3	8,3	6,1	
31,5	45	100	85,2	73,1	62,8	53,5	46,0	33,6	24,6	18,0	13,2	9,7	7,1	5,2	

Примечание: НМРЗ — номинальный максимальный размер зерна; МРЗ — максимальный размер зерна.

заполнителя у такого асфальтобетона будет высокая сдвигоустойчивость и равномерность передачи нагрузки, а при понижении температуры в высококонтактном асфальтобетоне на растяжение-сжатие будет работать щебеночный каркас, который обладает гораздо меньшим коэффициентом температурного расширения в сравнении с битумом, что повысит трещиностойкость.

Метод объемно-функционального проектирования, помимо стандартного способа проектирования, дал много разных полезных инструментов, с помощью которых можно осуществлять оптимизацию составов, задавать и управлять объемными характеристиками асфальтобетона, проводить анализ внутренней структуры, щебеночного каркаса и выбирать наилучшие соотношения материалов.

Максимальная упаковка щебня достигается через определение объема пустот в минеральном заполнителе (МЗ). Идеальная упаковка материала — это когда пустоты отсутствуют или стремятся к нулю (МЗ=0%), а плотность

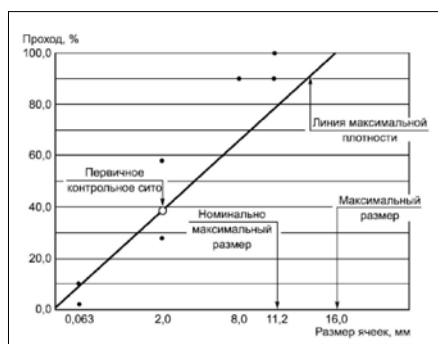


Рисунок 3. Пример построения линии максимальной плотности ГОСТ Р 58401.1 [4]

Таблица 6. Расчет содержания каркасообразующих фракций

Наименование фракции, мм	Содержание по таблице для ЛМП	Содержание в 100% для смеси этих фракций, p _i , %	Объемная плотность фракции, ρ _i
11,2 – 16,0	14,8	32,0	2,993
8,0 – 11,2	12,0	25,8	2,990
4,0 – 8,0	19,6	42,2	2,986
ИТОГО	46,4	100	2,989

Примечание: для данного примера были рассеяны и подготовлены чистые фракции щебня.

минерального заполнителя равна истинной плотности щебня, т.е. в природе это монолитный камень. Получается, чем меньше пустот в каркасообразующей составляющей, тем ближе будет минеральная часть к монолиту и, следовательно, больше будет контактов между зернами щебня, которые воспринимают и передают нагрузку от транспорта. Поскольку у нас фракционированный материал, возникает вопрос: при каком соотношении фракций щебня будут достигаться его максимальная упаковка и минимальное содержание пустот в крупном заполнителе? Первым решением этой задачи может быть использование линий максимальной плотности, которые применяются в Суперпейв, или в объемно-функциональном проектировании, и рассчитываются по формуле 1:

$$P_i = \left(\frac{d_i}{D_{max}} \right)^{0,45} \times 100\% \quad (1)$$

где, P_i — значение прохода на i-м сите;
d_i — размер i-го сита в мм;
D — максимальный размер заполнителя в данной смеси, мм.

В таблице 5 приведены значения проходов для линий максимальной плотности для смесей Sp с различным максимальным размером зерна. В ГОСТ Р58401.1 [4] рисунок 3 принята классификация смесей от номинального максимального размера зерна (НМРЗ), которое отличается на один размер вниз от максимального размера зерна

(МРЗ), используемого для расчета в формуле 1.

Для создания максимально плотного щебеночного каркаса можно воспользоваться данными таблицы 5 для щебеночной составляющей (крупного заполнителя, больше 4,0 мм). Т.е. следует определить количество каждой фракции щебня, и при таком соотношении фракций будет обеспечиваться максимально возможная упаковка зерен, пространство между которыми впоследствии будет заполнено песчаной частью и наполнителем без раздвижки каркаса.

Рассмотрим пример для D_{max} = 16,0 мм 1. По данным таблицы 5, по линии максимальной плотности определяем количество фракций для создания каркаса из щебня и проводим пересчет на 100% для смеси из этих фракций, результаты приведены в таблице 6.

Для полученного соотношения рассчитываем общую объемную плотность крупного заполнителя по формуле 2:

$$G_{ca} = \frac{100\%}{\sum \frac{p_i}{G^i}} \quad (2)$$

где, Gⁱ — объемная плотность i-ой фракции, г/см³;
p_i — содержание каждой фракции в % (таблица 6);
G_{ca} — общая объемная плотность крупного заполнителя, г/см³.

$$G_{ca} = \frac{100\%}{\frac{32}{2,993} + \frac{25,8}{2,990} + \frac{42,2}{2,986}} = 2,989 \text{ / см}^3$$

2. Так же, как и при расчете максимального количества крупного заполнителя в минерально-мастичной смеси ММС-20, определяем плотность смеси крупного заполнителя на гираторе. Для этого подготавливаем несколько проб смеси сухого щебня в соотношении с приведенным в таблице 6 составом. Для данного случая масса одной пробы составила 4000 г. Перед уплотнением в гираторе смесь крупного заполнителя следует увлажнить для снижения внутреннего трения и тщательно перемешать для повышения однородности. Две пробы были уплотнены на гираторе до 100 оборотов, в результате была определена гираторная плотность крупного заполнителя.

$$G_{gyr} = 1,973 / \text{см}^3$$

3. Рассчитываем количество пустот в уплотненном крупном заполнителе по формуле 3.

$$\text{ПКЗ}_{gyr} = \frac{G_{ca} - G_{gyr}}{G_{ca}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{ПКЗ}_{gyr} = \frac{2,989 - 1,973}{2,989} \times 100 = 34,0\%$$

Таким образом, содержание пустот в уплотненном на гираторе крупном заполнителе составляет 34%, исходя из нашего опыта, можно сказать, что это достаточно низкое значение для смеси фракций щебня. При этом объем крупного заполнителя составит: $100 - 34 = 66\%$, т.е. крупный заполнитель у нас занимает 66% объема.

4. Назначаем пустоты в минеральном заполнителе (ПМЗ) для щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси SMA, согласно ГОСТ Р 58401.2 [2] содержание пустот должно быть не менее 17,0%, поэтому принимаем ПМЗ=17,5%. Таким образом мы осуществляем управление одной из самых важных объемных характеристик асфальтобетона на начальном этапе проектирования. В итоге асфальтобетонная смесь будет состоять из следующих объемных частей:

- Щебень, макроструктура — 66%;
- Песчаная часть, мезо- и микроструктура, куда входят песок из отсева дробления, минеральный порошок и пыль уноса — 16,5% (ПКЗ_{gyr} — ПМЗ);

Таблица 7. Содержание фракций для асфальтобетона с максимальной упаковкой крупного заполнителя

№	Наименование материала	Масса, каждой фракции в 100см ³ , г	Содержание в % по массе	Итого после округления, содержание в % по массе
1	Диабаз фр. 11,2 - 16,0 мм	63,15	25,7	26
2	Диабаз фр. 8,0 - 11,2 мм	50,83	20,7	20
3	Диабаз фр. 4,0 - 8,0 мм	83,31	33,9	34
4	Отсев диабаз фр. 0 - 4,0 мм	19,37	7,9	8
5	Пыль	11,84	4,8	5
6	Минеральный порошок	17,16	7,0	7
7	Целлюлозная добавка	-	0,4	0,4

• Пустоты в минеральном заполнителе ПМЗ — 17,5%.

5. Песчаную часть (16,5%), исходя из инженерного опыта работы с материалами и с учетом производительности дозирующих устройств асфальтосмесительной установки, разделяем на следующие объемные части:

- Песок из отсева дробления — 6,5%;
 - Пыль — 4,0%;
 - Мин. порошок — 6,0%.
- Крупный заполнитель, щебень 66% распределяем в соответствии с соотношением (составом), приведенным в таблице 6. В итоге зерновой состав асфальтобетонной смеси по объему будет:

$$21,1 + 17,0 + 27,9 + 6,5 + 4 + 6 + 17,5 = 100\%$$

6. От объемов переходим к массовым частям, для этого делаем пересчет на 100 см³, умножая полученный объем каждого материала на плотность:

$$21,1 \times 2,993 + 17 \times 2,99 + 27,9 \times 2,986 + 6,5 \times 2,980 + 4 \times 2,960 + 6 \times 2,86 + 17,5 \times 0 = 245,66 \text{ г.}$$

7. Рассчитываем содержание каждой фракции по массе. В таблице 7 приведен расчет от объема к содержанию в процентах по массе для каждой фракции.

8. Определяем содержание битумного вяжущего, необходимого для заполнения ПМЗ и получения содержания воздушных пустот 4%. ПМЗ=17,5%, т.е. содержание битумного вяжущего в смеси по объему должно составлять $17,5 - 4,0 = 13,5\%$, а содержание минеральной части в асфальтобетонной смеси составляет $100 - 17,5 = 82,5\%$. Ниже приведен состав смеси по объему: $82,5 + 13,5 + 4,0 = 100\%$

9. От объема, через плотности материалов переходим к массовым частям. Объемную плотность минеральной части асфальтобетонной смеси рассчитываем аналогично объемной плотности крупного заполнителя G_{ca} по формуле 2.

$$G_{sb} = (100\%) / (26/2,993 + 20/2,99 + 34/2,986 + 8/2,980 + 5/2,960 + 7/2,86) = 2,978 \text{ г/см}^3$$

Плотность битумного вяжущего принимаем равной приблизительно 1,00 г/см³

Тогда состав смеси с вяжущем в 100 см³ будет:

$$82,5 \times 2,978 + 13,5 \times 1,00 + 4,0 \times 0 = 259,185 \text{ г.}$$

Вычисляем содержание битумного вяжущего по массе:

В 100%:

$$13,5 / 259,185 \times 100\% = 5,2\%$$

Сверх 100%:

$$13,5 / (82,5 \times 2,978) \times 100\% = 5,5\%$$

10. В соответствии с полученными данными, на подготовленных, специально рассеянных идеальных фракциях замешиваем асфальтобетонную смесь и изготавливаем образцы на гираторе, уплотняем до проектного числа оборотов $N_{np} = 100$, определяем фактическую максимальную плотность смеси и объемную плотность образцов. В нашем примере:

- средняя объемная плотность гираторных образцов составила $G_{sb} = 2,595 \text{ г/см}^3$;
- максимальная плотность щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси $G_{mm} = 2,727 \text{ г/см}^3$;
- содержание воздушных пустот:

$$V_a = \left(1 - \frac{2,595}{2,727}\right) \times 100\% = 4,8\%$$

• фактические пустоты в минеральном заполнителе, ПМЗ

$$\text{ПМЗ} = \left(1 - \frac{2,595 \times 0,948}{2,978}\right) \times 100\% = 17,4\%$$

Содержание воздушных пустот незначительно отличается от расчетного, в связи с чем требуется небольшая корректировка смеси по увеличению содержания вяжущего на 0,2–0,3%.

На рисунке 4 представлена полученная компоновка асфальтобетонной смеси, показана внутренняя структура щебеночного каркаса, полученного по описанной выше методике пересчета значений проходов крупнозернистого материала по линии максимальной плотности.

Используя такой подход, можно получить смеси с большим количеством контактов, но анализ получаемых составов свидетельствует о том, что соотношение фракций распределено примерно равномерно, что по факту снижает средневзвешенный размер зерен крупного заполнителя и может привести к снижению износостойкости асфальтобетона даже несмотря на максимально плотную упаковку.

Поэтому на основе вышеприведенной методики, а также основываясь на положительных результатах опытно-экспериментальных работ с минерально-мастичной смесью, мы начали работу по нахождению соотношения двух самых крупных фракций, используемых в щебеночно-мастичном асфальтобетоне, для достижения максимальной плотности их упаковки в объеме.

Если проводить аналогию, то это как в грунтах найти оптимальную влажность, при которой достигается максимальная плотность скелета, а здесь нам надо найти оптимальное соотношение двух фракций, которые уплотняются в гираторе до достижения максимальной гираторной плотности.

Для примера приведем результаты оптимизации и улучшения таким

Таблица 8. Состав асфальтобетонов ЩМА-15У и ВАД-15

№	Наименование материала	Содержание, %	
		ЩМА-15У	ВАД-15
1	Щебень габбро-диабаз фр. 10-15мм	63	60
2	Щебень габбро-диабаз фр. 5-10мм	16	15
3	Песок из отсева габбро-диабаз фр. 0-5мм	9	13
4	Минеральный порошок	7	8
5	Пыль уноса	5	4
6	Вяжущие ПБВ-60 (аналог PG76-28)	5,6	4,2
7	Целлюлозная добавка	0,4	-

способом щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси ЩМА-15У с использованием фракций щебня, классифицируемого по круглым ситам. Это сделано для того, чтобы показать, что вне зависимости от применяемого материала и его классификации мы можем достичь одинаково высоких результатов эксплуатационных характеристик. При проведении оптимизации был использован щебень габбро-диабаз фракции 10–15 и 5–10 мм. Используя разное соотношение этих фракций (100/0%; 90/10%; 80/20% и 70/30%), в гираторе осуществлялось уплотнение вышеописанным способом. На рисунке 5 на графике показано изменение плотности каменного каркаса при увеличении содержания мелкого щебня фракции 5–10 мм. Максимальная плотность, пик на графике четко определяется при соотношении фракций 80% фр. 10–15 мм и 20% фр. 5–10 мм. Т.е. такое соотношение фракций в нашем случае будет оптимальным, таким образом мы получим высококонтактную структуру с большим содержанием крупного щебня. Далее проводим аналогичный расчет, описанный выше, последовательно заполняя полученную структуру без раздвижки каркаса. На рисунке 6 приведена внутренняя структура полученного щебеночно-мастичного асфальтобетона ЩМА-15У, подобранного объемным способом, с нахождением максимальной плотности каркаса из крупных фракций. Подобный подход по оптимизации и укрупнению асфальтобетона подходит как для круглых фракций, так и для еврофракций по квадратным ситам. Вне зависимости от зернового состава каждой фракции, мы находим такое оптимальное их соотношение, которое дает нам максимальную упаковку зерен каменного материала.



Рисунок 4. Пример упаковки зерен щебня асфальтобетона SMA-16, рассчитанного с использованием линии максимальной плотности

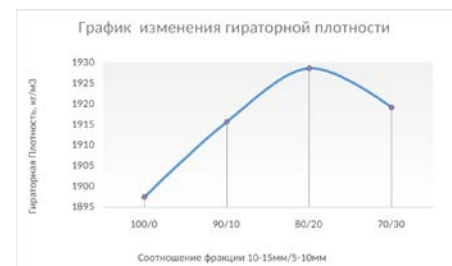


Рисунок 5. График изменения гираторной плотности при различном соотношении фракций



Рисунок 6. Внутренняя структура ЩМА-15У

Таким образом, используя определения гираторной плотности, мы можем оптимизировать асфальтобетонные смеси, получая максимально крупную и плотную, высококонтактную структуру.

ВЫСОКОКОНТАКТНЫЙ АСФАЛЬТОБЕТОН ДОРОЖНЫЙ (ВАД)

Итак, мы научились оптимизировать составы асфальтобетонных смесей для достижения максимальной устойчивости к абразивному износу, но есть еще один немаловажный вопрос — это стоимость асфальтобетонной смеси. Как сделать износостойкий асфальтобетон более дешевым? Используя наш подход по оптимизации и управлению объемными характеристиками, снизив пустоты в минеральном заполнителе (ПМЗ) до требования, аналогичного для смесей SP или плотных смесей, до 14%, мы можем создать высококонтактный асфальтобетон, который будет содержать такое же количество щебня по объему, как и ЩМА, но меньше вяжущего, при этом оставаясь плотным. В таблице 8 приведен состав высококонтактного асфальтобетона дорожного — ВАД-15, рассчитанного для круглых фракций, в сравнении с составом ЩМА-15У из вышеприведенного примера. При подборе, расчете использовались те же самые фракции материала. На рисунке 7 показана плотная внутренняя структура высококонтактного асфальтобетона.

Для сравнения этих составов нами был проведен комплекс испытаний, результаты которых приведены в таблице 9.

Анализируя результаты испытаний, можно сделать следующие выводы: Колееустойчивость у ВАД-15 асфальтобетона одинаково высокая с ЩМА-15У. Трециностойкость по американскому показателю STindex у ЩМА закономерно выше, ВАД асфальтобетон показывает результат, аналогичный традиционным плотным асфальтобетонам. Модуль жесткости у ВАД асфальтобетона выше, чем у ЩМА на 25%. Морозостойкость находится на одинаковом уровне, выше среднего и выше требования 0,8.



Рисунок 7. Внутренняя, плотная структура высококонтактного асфальтобетона ВАД-15 с содержанием вяжущего 4,2%

Таблица 9. Результаты сравнительных испытаний асфальтобетонов ЩМА-15У и ВАД-15

Наименование показателей	ЩМА-15У 5,6% PG76-28	ВАД-15 4,2% PG76-28
Средняя плотность асфальтобетонных образцов, г/см ³	2,626	2,670
Содержание воздушных пустот, %	3,8	4,1
Средняя глубина колеи, мм, метод испытания в воде, 50°С	1,9	1,8
Угол наклона кривой колееобразования, мм/1000 циклов	0,04	0,05
Коэффициент трециностойкости STindex при 0°С, ск.нагр. 50мм/мин	60,60	20,58
Модуль жесткости при 20°С, МПа	1772	2227
Коэффициент морозостойкости, 1 цикл	0,96	0,95
Испытание на износ, на установке Прал в лаборатории ФКУ Упрдор «Северо-Запад», мл	27	30

Износостойкость определялась на установке Прал, испытания проводились в лаборатории ФКУ Упрдор «Северо-Запад», ЩМА асфальтобетон показал незначительно лучший результат, но в целом это сравнимые значения для такой крупности щебня. В итоге можно сделать основной вывод, что высококонтактный асфальтобетон ВАД-15 по всем основным свойствам не уступает качеству ЩМА-15У, показывает высокие эксплуатационные свойства и при этом обладает более низкой себестоимостью за счет уменьшенного содержания вяжущего. Таким образом, мы рассмотрели

долгий путь оптимизации составов асфальтобетонных смесей, получения износостойких материалов для покрытий дорог с высокой интенсивностью. Считаем, что сегодня есть потребность и достаточно возможностей для проектирования и укладки высококонтактных асфальтобетонов, которые могут показать себя на уровне традиционных щебеночно-мастичных асфальтобетонов, но при этом будут обладать более низкой себестоимостью.

В строительном сезоне 2021 года мы планируем строительство нескольких опытных секций из смесей SMA, ММС и ВАД. ■

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирюхин Г.Н. Моделирование работоспособности и долговечности асфальтобетона в дорожных покрытиях: монография/Г.Н.Кирюхин — М: Техполиграфцентр, 2018–330 с.
2. ГОСТ Р 58401.2–2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Смесей асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон щебеночно-мастичные. Система объемно-функционального проектирования. Правила проектирования».
3. СТО 34390716.042–2012 «Дороги автомобильные общего пользования. Смесей асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон щебеночно-мастичные для грузонапряженных автодорог в Северо-Западном регионе. Технические условия».
4. ГОСТ Р 58401.1–2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Смесей асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Система объемно-функционального проектирования. Технические требования».