

ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИКАТОРОВ СУХОГО ВВОДА

Повышение требований к качеству, долговечности дорог и развитие нормативной базы ведет к необходимости применения различных модификаторов. По технологическому признаку модификаторы можно разделить на два вида в зависимости от способа введения. «Мокрый» ввод предусматривает дозировку и модификацию битума, «сухой» ввод осуществляется дозированием модификатора непосредственно в смеситель асфальтобетонного завода при производстве асфальтобетонной смеси.

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

В.Е. Ефименко, ведущий инженер группы исследования строительных материалов АО «ВАД»

ПЕРВАЯ ЧАСТЬ

ПНСТ 662–2022 в зависимости от способа введения подразделяет модификаторы на классы: А — вводимые в асфальтобетонную смесь, Б — вводимые в битум. В случае применения модификаторов класса А оцениваются свойства асфальтобетона без учета изменений свойств битумного вяжущего, и если стандарт на асфальтобетонную смесь ГОСТ Р 58406 позволяет это сделать, то в случае с применением асфальтобетонов по ГОСТ Р 58401 с PG-вяжущими такую оценку провести достаточно сложно. Во-первых, нет ясности, каким образом влияет модификатор на марку вяжущего, а во-вторых, ГОСТ Р 58401 не предусматривает испытание на низкотемпературную трещиностойкость. Таким образом, сейчас работоспособность и эффективность модификатора можно доказать, только показав его влияние на битумное вяжущее.

При введении модификатора в смеситель асфальтобетонного завода время на взаимодействие с битумом существенно ограничено, что может приводить к повышению расхода модификатора и необходимости увеличения времени перемешивания. К тому же, применение модификаторов сухого ввода может влиять на повышение или понижение оптимального содержания битумного вяжущего. Поэтому при производстве необходимо учитывать эти факторы, понимать и помнить, что при введении модификатора сухим методом часть его будет работать как наполнитель и не успеет вступить в реакцию с битумом

и полностью в нем раствориться. Самый простой и быстрый способ проверки работы модификатора сухого ввода с учетом вышеуказанных факторов по дозировке — через испытание битумного вяжущего. Снижение по дозировке в битум может составлять до 50%. В зависимости от задачи осуществляем подбор дозировки модификатора в битум. Цели и задачи модификации могут быть следующие: улучшение физико-механических свойств без изменения марки вяжущего, например, улучшение колееустойчивости асфальтобетона, повышение марки битумного вяжущего, улучшение технологических свойств и т.д. При первоначальном подборе через вяжущее рекомендуется снижать дозировку примерно в 2 раза от рекомендуемой производителем. Например, при рекомендуемой дозировке 5 кг на тонну смеси и дозировки битума 50 кг на тонну получаем, что у нас в составе битумного вяжущего будет 10% модификатора. При проверке работоспособности модификатора рекомендуется первоначальную дозировку брать в 2 раза меньше, т.е. 5% модификатора на битум. Далее, в зависимости от получаемых результатов, регулировать количество применяемого модификатора. На что следует обратить внимание при работе с модификаторами сухого ввода и анализе их эффективности через битумное вяжущее. В первую очередь это вязкость и изменение верхней границы PG-вяжущего. При приготовлении и дозировке модификатора в битум необходимо

соблюдать технику безопасности, так как работа ведется с горячими материалами и применение модификаторов сухого ввода может потребовать повышенных температур 180–190 °С. Также в подобных модификаторах может содержаться остаточная влага, что может привести к резкому вспениванию битумного вяжущего. Дозировку следует осуществлять постепенно, наблюдая за процессом смешивания. Вязкость может увеличиваться достаточно сильно, поскольку модификаторы могут структурировать вяжущее и в некоторых случаях можно получить гелеобразный или пастообразный продукт, который в последствии сложно будет испытать. При работе с такими битумными вяжущими нужно помнить, что они могут быть подвержены процессу расслоения, часть может оседать или, наоборот, всплывать на поверхность. Знание, насколько сильно меняются свойства вяжущего при модификации добавкой сухого ввода, позволяет понять, насколько сильно она влияет на получаемое асфальтовяжущее и как могут измениться физико-механические характеристики асфальтобетона. Например, когда мы используем стабилизирующую добавку для производства щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей, мы не задумываемся, насколько сильно она влияет на свойства асфальтовяжущего, улучшает или ухудшает его параметры. Рассмотрим некоторые параметры, получаемые при испытании вяжущих, и как их следует интерпретировать. В таблицах 1 и 2 приведены

Таблица 1. Пример результатов испытаний битумного вяжущего БНД 70/100 с модификаторами сухого ввода (класс А по ПНСТ 662)

Наименование показателя	Фактические значения определяемых характеристик					
	БНД 70/100	БНД 70/100+3% Доб.№1	БНД 70/100+5% Доб.№1	БНД 70/100+3% Доб.№2	БНД 70/100+3% Доб.№3	
Динамическая вязкость, Па·с,	При 135 °С	0,394	1,176	3,878	0,866	1,689
	При 165 °С	0,088	0,504	1,860	0,311	0,371
Фазовый угол сдвига исходного вяжущего δ , °	82,3	81,2	78,2	73,4	72,8	
Критическая высокая температура (исходное вяжущее), °С	65,4	68,4	71,0	76,1	76,8	
Изменение массы после старения, %	0	0	0	0	0	
Фазовый угол сдвига битумного вяжущего, состаренного по методу RTFOT δ , °	78,8	77,8	75,2	73,1	73,2	
Критическая высокая температура (RTFOT-вяжущее), °С	65,3	68,9	69,2	74,1	75,2	
Критическая средняя температура битумного вяжущего, подготовленного по методу PAV при температуре 100 °С, °С	14,6	15,4	15,7	14,3	15,8	
Показатель усталостной характеристики (LAS-тест) при ожидаемой деформации при заданной температуре 25 °С	при 2,5%	78287	132983	126947	144360	60753
	при 5,0%	4252	7220	7035	7108	3008
Критическая низкая температура, °С, по жесткости S	-31,7	-31,2	-31,6	-32,7	-32,0	
Критическая низкая температура, °С, по параметру m	-25,2	-28,0	-28,0	-19,0	-24,5	
Марка	PG 64-22	PG 64-28	PG 64-28	PG 70-16	PG 70-22	
Фактическая марка PG	65,3-25,2	68,4-28,0	69,2-28,0	74,1-19,0	75,2-24,5	

Таблица 2. Пример результатов испытаний битумного вяжущего БНД 50/70 с модификаторами сухого ввода (класс А по ПНСТ 662)

Наименование показателя	Фактические значения определяемых характеристик					
	БНД 70/100	БНД 70/100+3% Доб.№1	БНД 70/100+5% Доб.№1	БНД 70/100+3% Доб.№2	БНД 70/100+3% Доб.№3	
Динамическая вязкость, Па·с,	При 135 °С	0,394	1,176	3,878	0,866	1,689
	При 165 °С	0,088	0,504	1,860	0,311	0,371
Фазовый угол сдвига исходного вяжущего δ , °	82,3	81,2	78,2	73,4	72,8	
Критическая высокая температура (исходное вяжущее), °С	65,4	68,4	71,0	76,1	76,8	
Изменение массы после старения, %	0	0	0	0	0	
Фазовый угол сдвига битумного вяжущего, состаренного по методу RTFOT δ , °	78,8	77,8	75,2	73,1	73,2	
Критическая высокая температура (RTFOT-вяжущее), °С	65,3	68,9	69,2	74,1	75,2	
Критическая средняя температура битумного вяжущего, подготовленного по методу PAV при температуре 100 °С, °С	14,6	15,4	15,7	14,3	15,8	
Показатель усталостной характеристики (LAS-тест) при ожидаемой деформации при заданной температуре 25 °С	при 2,5%	78287	132983	126947	144360	60753
	при 5,0%	4252	7220	7035	7108	3008
Критическая низкая температура, °С, по жесткости S	-31,7	-31,2	-31,6	-32,7	-32,0	
Критическая низкая температура, °С, по параметру m	-25,2	-28,0	-28,0	-19,0	-24,5	
Марка	PG 64-22	PG 64-28	PG 64-28	PG 70-16	PG 70-22	
Фактическая марка PG	65,3-25,2	68,4-28,0	69,2-28,0	74,1-19,0	75,2-24,5	

результаты испытаний битумных вяжущих с модификаторами сухого ввода. В испытании использовались добавки разных производителей, замаркированы они как Добавка № 1, № 2, № 3 и т.д.

Динамическая вязкость при 135 градусах

— это технологический показатель, в ГОСТ Р 58400.1 (2) он носит рекомендательный характер. При введении модификатора обычно вязкость увеличивается, это происходит как за счет модификации, так и за счет структурирования, так как многие добавки сухого ввода содержат в своем составе минеральную часть, волокна и прочие наполнители. Если ГОСТ Р 58400.1 рекомендует динамическую вязкость не выше 3 Па·с, но при работе с модификаторами сухого ввода вязкость может

увеличиваться существенно выше этой рекомендации.

В нашем случае увеличение вязкости выше 3 Па·с не влияет на перекачку вяжущего, но в случае превышения значений вязкости в 2 раза и более 3 Па·с это может привести к проблемам при укладке и уплотнении асфальтобетонной смеси, существенно ухудшаются технологические свойства — удобоукладываемость и уплотняемость. Такая жесткая, тяжелая смесь будет быстро застывать и подвисать в перегружателе и асфальтоукладчике, ее будет трудно качественно уложить и уплотнить. Кроме того, вяжущее с высокой динамической вязкостью выше 4,5–9 Па·с очень сложно испытать, поскольку даже при высокой температуре оно может сохранять пастообразное состояние.

Критическая высокая температура.

Одна из самых важных характеристик, определяемая на динамическом сдвиговом реометре DSR (рисунки 1). Ее можно использовать при выборе, подборе дозировки модификатора. В случае если вам необходимо повысить марку битумного вяжущего, предварительно можно быстро осуществить проверку критической верхней температуры с разным содержанием модификатора.

При проверке верхней критической температуры мы испытываем битум в исходном состоянии и после старения в печи RTFO. При этом у нас в ГОСТе заложен коэффициент старения 2,2, что считается оптимальным, т.е. на технологическом этапе битум должен набрать нужную вязкость, он должен «состариться». Далее анализируем, как изменяются

фактические критические высокие температуры до и после старения. Если они очень близки — значит, вяжущее состарилось с коэффициентом 2,2, что в принципе нормально, а вот если температуры имеют разницу более 4–6 градусов, то тут следует разобраться, почему такое может происходить. Если температура увеличилась от исходного значения — значит, вяжущее склонно к старению, если температура понизилась, то вяжущее не набрало достаточной вязкости. Таким образом мы можем оценить интенсивность старения и влияние модификатора на процесс старения.

Фазовый угол сдвига. Этот показатель фактически представляет соотношение вязкой и упругой составляющих. Чем меньше угол, тем более упругое вяжущее. Косвенно можно даже определить, содержит вяжущее полимер или нет, чистый битум это или ПБВ. Ориентиром здесь является угол в 75 градусов, в США в некоторых штатах это принято как одно из требований. В случае, если фазовый угол менее 75 градусов, то с высокой вероятностью вяжущее содержит полимер. В нашем случае это и позволяет оценить, за счет чего происходит повышение критической верхней температуры PG. В случае понижения фазового угла можно говорить о работе полимеров и росте упругой составляющей. Когда фазовый угол остается неизменным или меняется незначительно, это свидетельствует о повышении вязкости за счет структурирования битума.

Усталостные характеристики. Чтобы проверить вяжущее, модифицированное добавкой сухого ввода, на усталость, можно провести испытание LAS-тест по ГОСТ Р 58400.7–2019. Это испытание несложное, хотя в стандарте много разных формул, но эти все вычисления делает компьютер и предустановленная программа. Единственное, что требуется, это перенести данные с программы прибора в табличку Excel для дальнейшего расчета. В итоге вы получите количество циклов до разрушения образца при разных уровнях деформации. Если испытать вяжущее при одинаковой температуре,



Рисунок 1. Динамический сдвиговой реометр DSR (критическая высокая температура, фазовый угол, усталостные характеристики)

то можно получить конкретное количественное сравнение по усталостной долговечности. Т.е. мы можем сравнить влияние модификаторов на асфальтовяжущее.

Критическая нижняя фактическая температура. На данный момент испытание по определению нижней границы является тестом, определяющим и гарантирующим трещиностойкость асфальтобетона. Проверка влияния модификатора необходима, поскольку в стандарте на асфальтобетон отсутствует метод испытания на низкотемпературную трещиностойкость. Стандарт позволяет определять критическую нижнюю температуру тремя способами. В случае любых сравнительных испытаний необходимо проводить тестирование на одинаковых приборах. В целом, при проведении испытаний довольно сложно работать с битумными вяжущими, модифицированными добавками сухого ввода. В идеале необходимо проверять асфальтобетон, к тому же он является нашим конечным продуктом. Но если с определением эксплуатационных свойств при положительных температурах испытание на колебательную усталость уже хорошо зарекомендовало себя, то к определению низкотемпературной трещиностойкости есть ряд вопросов.

ВТОРАЯ ЧАСТЬ

В РФ есть стандарт на испытание балочек асфальтобетона на изгиб ГОСТ Р 58406.6, который по большому счету повторяет метод испытания по ГОСТ 12801. Практика показывает, что результаты испытаний по этой методике имеют низкую взаимосвязь со свойствами битума и могут противоречить логике. Даже если сравнить требования к асфальтобетону по ГОСТ Р 58406.2 и щебеночно-мастичному асфальтобетону по ГОСТ Р 58406.1, то они отличаются только по показателю «предельная прочность при изгибе» всего на 7%. Мы неоднократно проводили испытания для того, чтобы понять, как влияют различные вяжущие на эти показатели. К сожалению, мы не увидели отличия между асфальтобетоном на битуме и ПБВ, на вяжущем PG 70–34 и PG 76–22, между ЩМА и обычным асфальтобетоном. Мы провели анализ литературы, использовали свой опыт работы с асфальтобетоном по определению его устойчивости к трещинообразованию [1, 2]. В результате пришли к выводу, что самым простым испытанием сейчас является определение трещиностойкости через прочность при непрямом растяжении. Аналогичная методика используется в США при определении индекса трещиностойкости STindex при положительных температурах

20–25 °С и учитывает энергию разрушения (площадь под кривой нагрузка-деформация), пост-пик наклон и величину вертикальной деформации. Более подробно об этом индексе можно прочитать в статье [1].

Взяв за основу метод непрямого растяжения ГОСТ Р 58401.18, мы решили провести разработку метода испытания на трещиностойкость при отрицательной температуре минус 18 градусов с оценкой по энергии разрушения как наиболее чувствительному элементу индекса трещиностойкости — СТindex. На рисунке 2 приведены характерные кривые, получаемые при испытании асфальтобетона на прочность при непрямом растяжении с различными битумными вяжущими.

Как видно из графика зависимости нагрузки от деформации, восприятие нагрузки асфальтобетона существенно зависит от применяемого вяжущего. В асфальтобетоне на битуме БНД быстро возрастает напряжение и происходит резкий спад после достижения максимального пика, т.е. происходит хрупкое разрушение. Кривая нагрузка-деформация асфальтобетона на ПБВ и в особенности РG-вяжущих выглядит более плавно как при достижении пиковой нагрузки, так и при спаде нагрузки в процессе разрушения образцов. Важным является момент или точка разрушения, т.е. то, что мы принимаем за разрушение образца или образование трещины и ее полное раскрытие, поскольку достижение пика нагрузки еще не является разрушением асфальтобетона. Разрушение образца и образование (раскрытие) трещины происходит уже на стадии пост-пик нагрузки, после достижения и прохождения пика. Если придерживаться общих принципов, то моментом разрушения можно считать 50% потерю прочности или падение нагрузки на 50%. В нашем случае мы приняли, что асфальтобетон разрушился при падении прочности до 50% от максимальной пиковой нагрузки. Для оценки трещиностойкости асфальтобетона при отрицательной температуре мы предлагаем использовать индекс трещиностойкости ИТР, рассчитываемый по формуле 3:

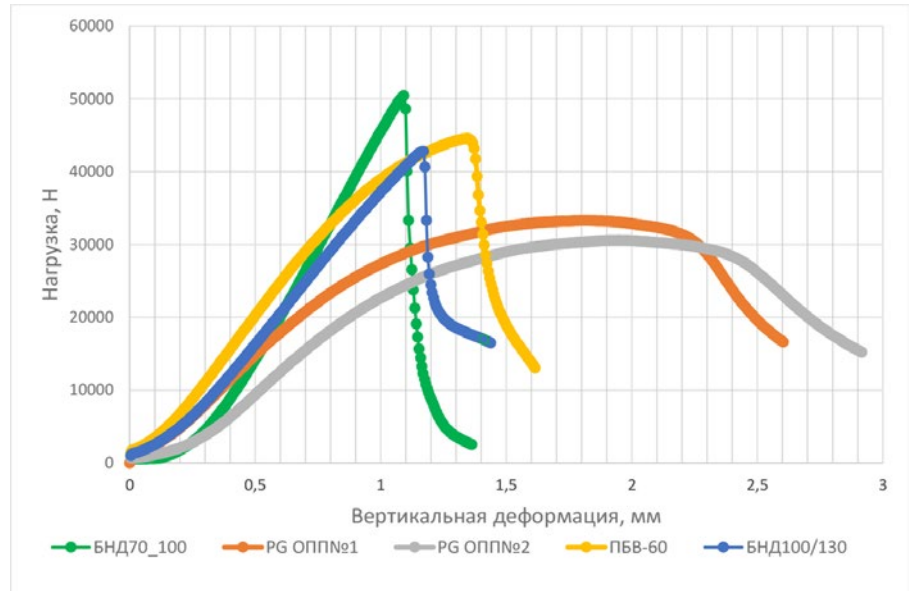


Рисунок 2. График зависимости нагрузки от вертикальной деформации (вяжущие предоставлены «Газпромнефть — Битумные Материалы»)

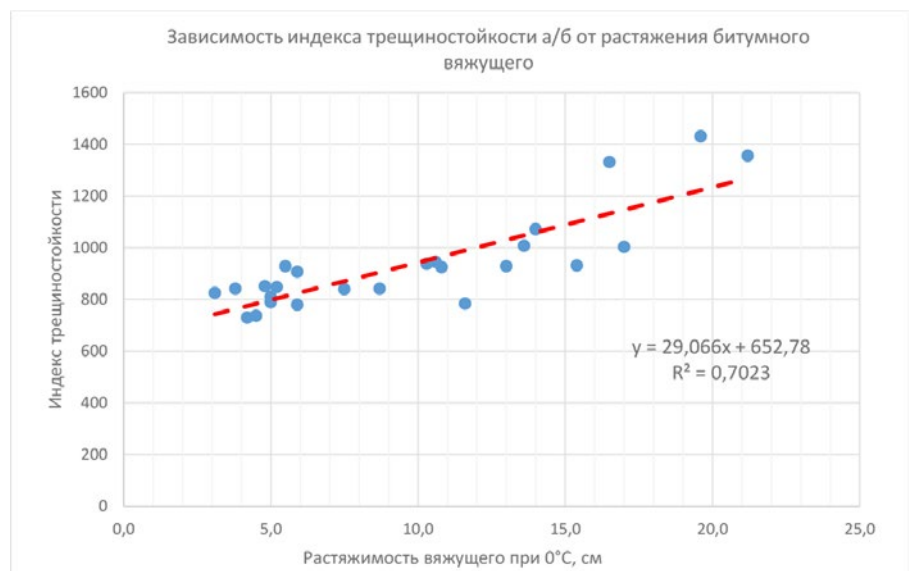


Рисунок 3. График зависимости индекса трещиностойкости (ИТР) асфальтобетона при минус 18°C от растяжимости вяжущего при 0°C без вяжущих РG с низкой маркой

$$\text{ИТР} = 1000 \times \frac{G_f}{S}$$

Где ИТР — Индекс трещиностойкости;
 G_f — энергия разрушения (трещинообразования), Дж;
 S — прочность при непрямом растяжении, кПа;
 1000 — масштабирующий коэффициент для удобства расчета.

На рисунке 3 приведен график зависимости индекса трещиностойкости песчаного асфальтобетона и растяжимости битумного вяжущего при температуре 0 градусов. Индекс трещиностойкости увеличивается линейно при увеличении растяжимости битумного

вяжущего. Значение индекса трещиностойкости для песчаного асфальтобетона на чистых битумах концентрируется в районе 800, а для модифицированных и полимер-битумных вяжущих характерны более высокие значения в районе от 900 до 1350, но в целом, как показано на рисунке 3, значения зависят от растяжимости. Есть ли у индекса трещиностойкости взаимосвязь с другими характеристиками битумного вяжущего? На рисунке 4 приведен график зависимости индекса трещиностойкости с нижней границей марки РG. Как видно из графика, чем ниже фактическая марка вяжущего, тем выше индекс трещиностойкости, т.е. работает обратная взаимосвязь.

На пяти битумных вяжущих была определена нижняя фактическая марка PG на приборе ABCD, в результате была возможность посмотреть, есть ли связь между границей PG по ABCD и индексом трещиностойкости. На рисунке 5 показана эта зависимость.

Результаты испытаний на ABCD были предоставлены коллегами из лаборатории «Газпромнефть БМ». Из представленных данных видно, что «индекс трещиностойкости ИТР» имеет хорошую чувствительность к низкотемпературным характеристикам битумного вяжущего.

Таким образом, для оценки трещиностойкости можно использовать индекс ИТР, у которого есть хорошая взаимосвязь со свойствами битумного вяжущего. Возможности использования индекса трещиностойкости позволяют провести полноценную оценку воздействия модификаторов сухого ввода на низкотемпературную трещиностойкость. В совокупности с проведением испытания на колееустойчивость по Гамбургской методике на металлическом колесе в воде мы можем полноценно провести анализ свойств получаемого асфальтобетона.

Нами был проведен эксперимент с использованием различных модификаторов сухого ввода для определения возможности их применения в качестве альтернативы PG-вяжущим в щебеночно-мастичном асфальтобетоне SMA-16. Для этого определяли низкотемпературные свойства через индекс трещиностойкости и высокотемпературные свойства щебеночно-мастичного асфальтобетона через колееустойчивость при испытании в воде на металлическом колесе (Гамбургский метод).

На рисунке 6 представлена диаграмма «индекс трещиностойкости» по испытанию щебеночно-мастичного асфальтобетона SMA-16 с использованием различных модификаторов сухого ввода. Как видно из диаграммы, значения индекса (ИТР), полученного при испытании на низкотемпературную трещиностойкость SMA-16 с модификаторами сухого ввода, превышает минимальное значение индекса, полученного на чистом битуме

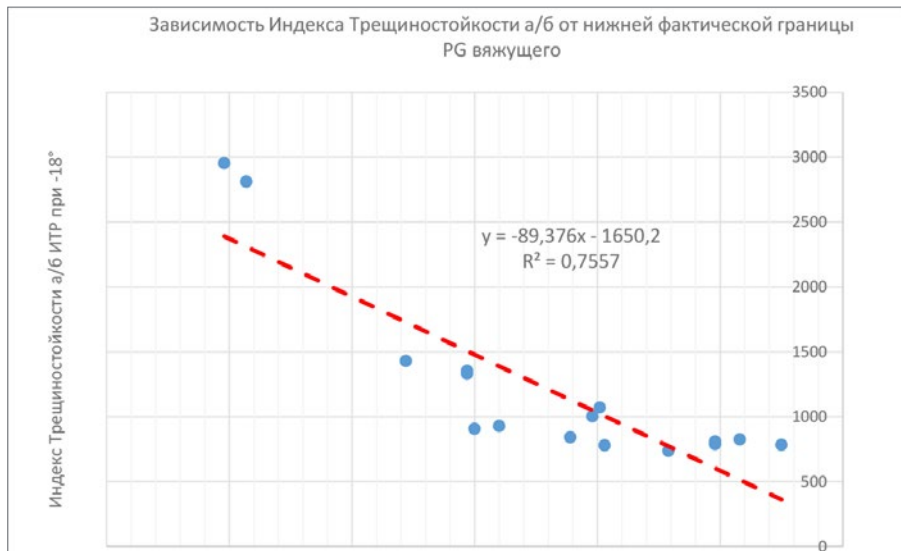


Рисунок 4. График зависимости индекса трещиностойкости (ИТР) асфальтобетона при минус 18°C от фактической нижней границы PG

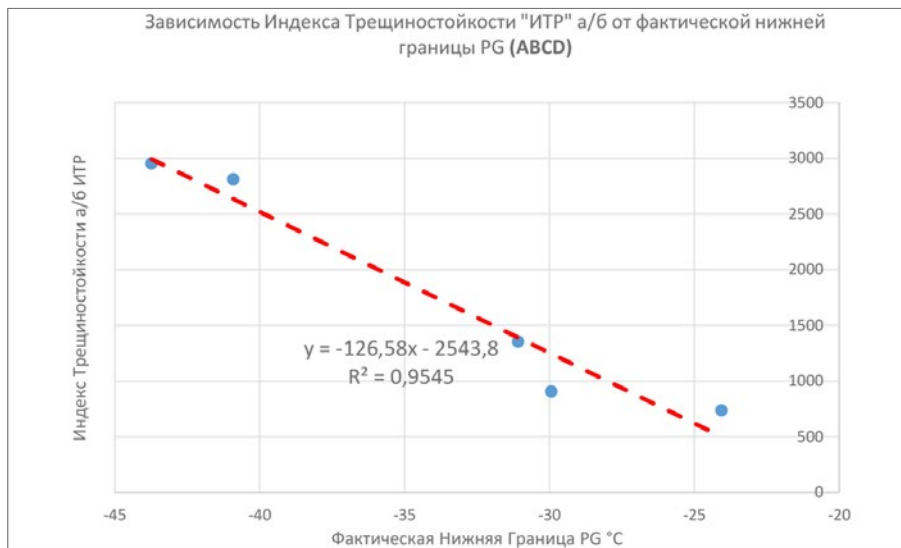


Рисунок 5. График зависимости индекса трещиностойкости (ИТР) асфальтобетона при минус 18°C от фактической нижней границы PG, измеренной на приборе ABCD

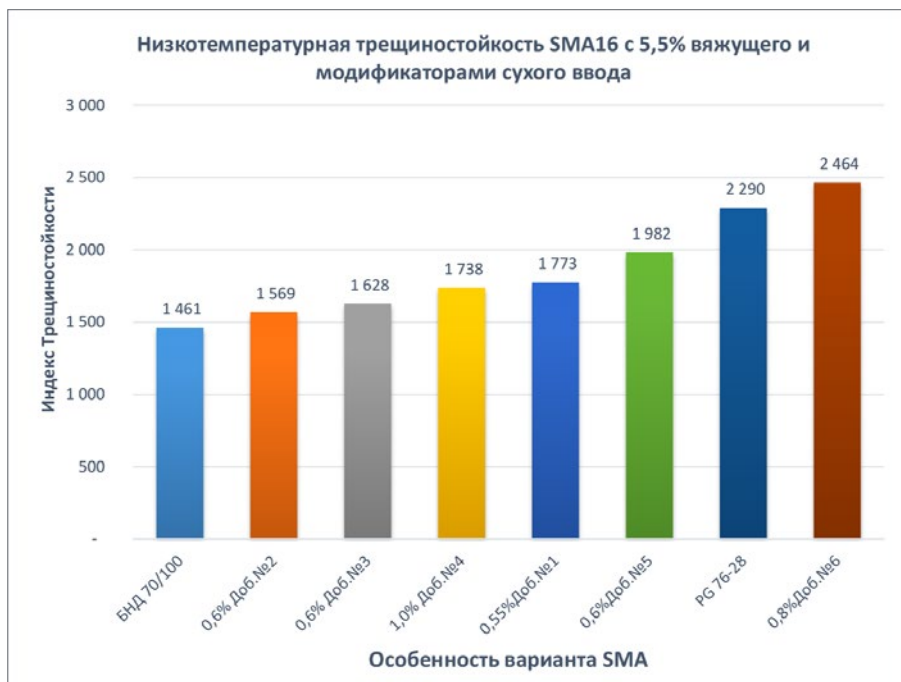


Рисунок 6. Диаграмма «индекс трещиностойкости» с различными модификаторами.

БНД 70/100. Таким образом, можно сделать вывод, что все используемые в эксперименте модификаторы сухого ввода не ухудшили низкотемпературную трещиностойкость, а даже повысили ее в разной степени. При этом практически все модификаторы не достигли уровня значения индекса трещиностойкости, получаемого на SMA-16 на PG 76–28 (ПБВ с СБС полимером).

На рисунках 7 и 8 приведены диаграммы с данными по определению колеустойчивости асфальтобетон с модификаторами сухого ввода. Как видно из приведенных результатов, не все модификаторы в таких условиях испытания и выбранных дозировках способны обеспечить колеустойчивость на уровне PG-вяжущего. Варианты оптимизации в данном эксперименте не рассматривались, дальнейшая работа по дозировкам может существенно изменить картину в сторону улучшения.

Одним из самых важных элементов анализа является определение лучшего варианта решения или рецептуры, наиболее оптимального для ваших условий. Каким образом на основе полученных функциональных показателей определить наиболее эффективный и оптимальный вариант? При условии, что у вас есть эталон, а в нашем случае это щебеночно-мастичный асфальтобетон на вяжущем PG 76–28 на основе полимера СБС, и его свойства можно принять за 100%, мы можем получить следующую картину (рисунк 9). В нашем конкретном случае мы разделили влияние свойств на итоговую эксплуатационную оценку асфальтобетона следующим образом: 40% — низкотемпературная трещиностойкость, 60% — колеустойчивость.

Таким образом, мы получаем итоговый результат, где есть четкое понимание, насколько лучше или хуже применение модификатора сухого ввода в сравнении с эталонным асфальтобетоном на PG-вяжущем. На этом основании мы можем осуществить подбор содержания модификатора, регулировать свойства асфальтобетона как конечного продукта и принять решение о замене PG-вяжущего или ПБВ на модификатор сухого ввода и чистый битум БНД. ■

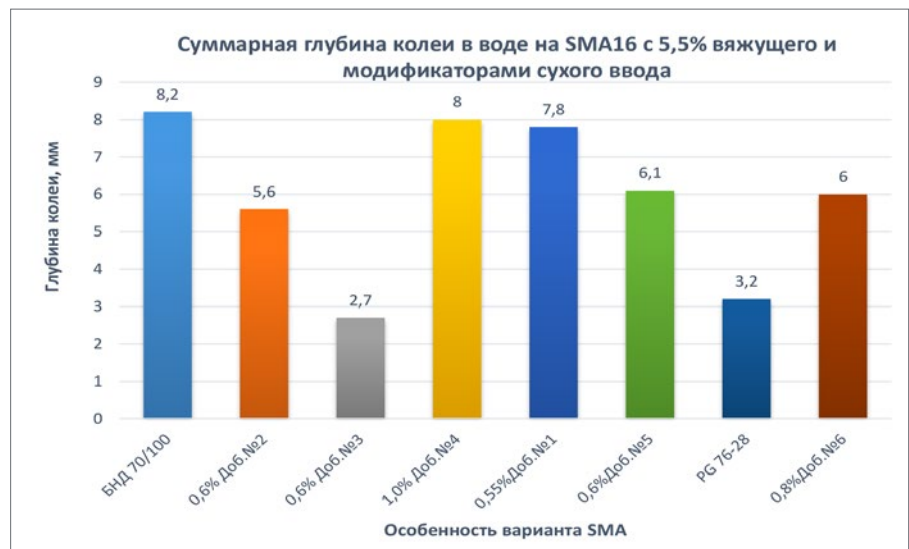


Рисунок 7. Диаграмма «Глубина колеи» SMA 16 с модификаторами сухого ввода



Рисунок 8. Диаграмма «Угол наклона кривой колееобразования»

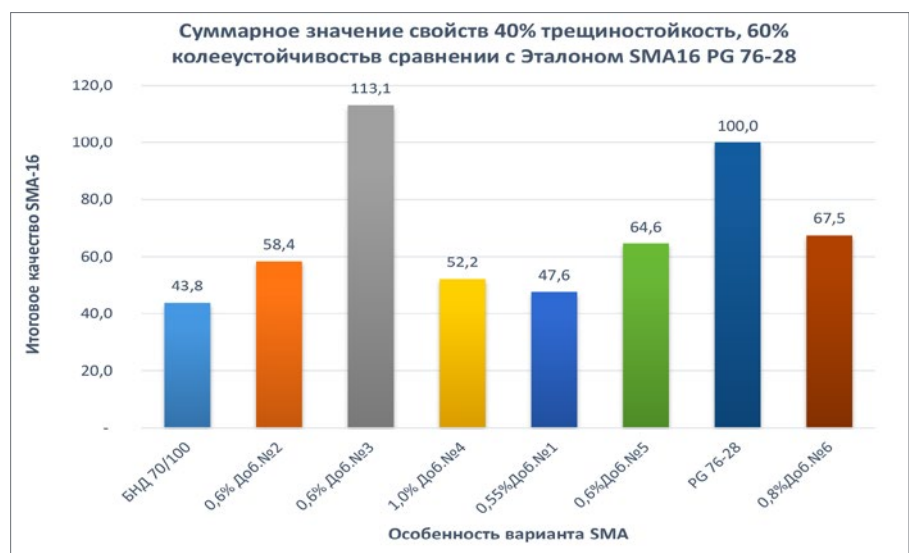


Рисунок 9. Сравнение асфальтобетонов по суммарному значению функциональных свойств

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Колесник Д.А., Шапченко Д.В. Новые тенденции в области испытаний асфальтобетона // Мир дорог. 2018. №115. С. 44-46.
- Пахаренко Д.В., Колесник Д.А. Опыт-экспериментальные работы ЗАО «ВАД» // Дорожная техника. 2016. №1. С. 28-35.