ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ДОБАВОК ДЛЯ ТЕПЛОГО АСФАЛЬТОБЕТОНА

С.Ю. ШЕХОВЦОВА,
к.т.н., доцент каф. «Строительные материалы и материаловедение» НИУ МГСУ
Е.В. КОРОЛЕВ,
д.т.н., профессор, проректор Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета
О.А. МИХАЙЛОВА,
инженер химических технологий тугоплавких неметаллических и силикатных материалов

ДАННАЯ СТАТЬЯ ОПИСЫВАЕТ НОВОЕ ТЕХНОЛОГИЧНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ПРИГОТОВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ, КОТОРЫЕ СНИЖАЮТ НЕГАТИВНЫЙ ПРЕССИНГ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ – ТЕПЛЫЕ АСФАЛЬТОБЕТОННЫЕ СМЕСИ. В ЧАСТНОСТИ, ПОДРОБНО ИЗУЧЕНО ВЛИЯНИЕ РЯДА ХИМИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ДОБАВОК РОССИЙСКОГО И ЗАРУБЕЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ НА РОССИЙСКОМ РЫНКЕ И ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ТЕПЛЫХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ.

ВВЕДЕНИЕ

Применение технологий теплого асфальтобетона, основанных на изначально более низкой температуре приготовления, позволяет обеспечить как достижение экономического эффекта, так и уменьшение экологического прессинга на окружающую среду в процессе изготовления дорожного покрытия. Кроме этого, при применении теплых асфальтобетонных смесей возможна транспортировка на более длительные расстояния ввиду того, что смесь при более низкой температуре сохраняет свою технологичность более длительный срок. При этом современная технология получения теплых асфальтобетонов основывается на применении технологических, физических и химических методов, обеспечивающих достижение требуемой вязкости битума при пониженных температурах изготовления дорожного асфальтобетонного покрытия.

Различают несколько возможных вариантов получения теплых асфальтобетонных смесей: вспенивание битума посредством вспенивающих добавок (цеолиты) или системы механического вспенивания; органические пластифицирующие добавки, содержащие воск и/или парафин; химические добавки (поверхностно-активные вещества (ПАВ)), комбинированные технологии, включающие одновременное использование нескольких из перечисленных выше методов.

Технологии вспенивания битума, в которых в качестве вспенивающего компонента используется вода, в настоящее время, считаются экономически эффективными. Однако они связаны с высокими первоначальными затратами на оборудование, ограничены нижней границей температурного режима работы, обусловленной температурой конденсации водяного пара. Кроме этого, возможно попадание остаточной влаги в укладываемый асфальтобетон, что будет способствовать разрушению дорожного покрытия.

Использование органических добавок или восков приводит к снижению температуры плавления битумов, что позволяет производить смеси при более низких температурах. Однако, использование воска в составе битума, снижает трещиностойкость как вяжущего, так и асфальтобетона на его основе, и может быть неэффективным в районах с высокими отрицательными температурами.

Использование химических добавок не требует дополнительных затрат на модернизацию оборудования. Как правило, добавки смешиваются с битумом в резервуарах смесительной установки или вводятся посредством уже имеющегося автоматического оборудования для ввода обычных адгезионных добавок. Это предопределяет распространенность такого технологического решения в строительной мировой индустрии, что подтверждается зарубежными научно-исследовательскими работами. Так, авторы провели исследование, в результате которого было установлено, что для приготовления образов теплого асфальтобетона больше подходит гираторный уплотнитель. В исследовании было изучено влияние химических добавок на коэффициент прочности на растяжение (TSR) — показатель, характеризующий влияние влаги на свойства асфальтобетона. Было изучены типы асфальтобетонных смесей, которые подходят для приготовления теплых асфальтобетонных смесей. Было установлено, что асфальтобетонные смеси с большим содержанием вяжущего, например, AR-AC-13, не походят для приготовления теплых асфальтобетонных смесей. В исследовании было изучено влияние температуры уплотнения на объемные свойства асфальтобетона. Установлено, что в диапазоне температур 122–135 °С наблюдается улучшение объемных свойств асфальтобетона. Авторами было исследовано влияние химических добавок на физико-механические свойства асфальтобетона, содержащего RAP и установлено, что добавки для теплых асфальтобетонов, содержащих RAP, не позволяют улучшить влагостойкость (TSR).

Анализ существующей в открытом доступе научной литературы позволил сделать вывод о том, что работы, в основном, направлены на изучение влияния химических добавок на свойства теплых асфальтобетонных смесей. При этом отсутствуют работы, направленные на изучение их влияния на свойства и структуру битума, основного структурообразующего компонента битума, предопределяющего его свойства. В этой связи данная работа, направленная на некоторое уменьшение этого пробела и посвященная оценке влияния различных химических добавок зарубежного и российского производства на свойства и структур вязкого дорожного битума БНД 70/100, установления принципа их действия и влияния, представляется весьма актуальной.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

Изучение действия химических добавок на битум производилось на добавках, представленных на российском рынке и рекомендованных для производства теплых асфальтобетонных смесей: Адгезол 3-ТД — органическая композиция, полученная на основе продуктов взаимодействия талового масла с полиалкилполиаминными соединениями, производства ООО «Базис», Азол 1007 — поверхностно-активное вещество амфолитного типа с комплексом пластифицирующих добавок, производства ООО «Котласский химический завод», Cecabase RT 945 — информация о составе отсутствует в открытом доступе, производство Arkema (Франция), ДАД-ТА — высокоактивная жидкая композиция поверхностно-активных веществ на основе полиаминов и ДАД-ТА2 — специально модифицированное поверхностно-активное вещество амфотерного типа, производства ООО «Селена», Дорос-Т — информация о составе отсутствует в открытом доступе, производство ООО «Дорос», Амдор ТС-1 — смесь катионактивных поверхностно-активных веществ, производства ООО «Уралхимпласт-Амдор».

В качестве битумного вяжущего был рассмотрен битум нефтяной дорожный БНД 70/100, производства Московского НПЗ, свойства которого представлены в таблице 1.

Таблица 1
Физико-механические свойства битумного вяжущего БНД 70/100

Наименование показателя	Требование ГОСТ 33133	Фактическое значение
Глубина проникания иглы, при температуре 25 °С, мм$^{-1}$	71–100	72
Глубина проникания иглы, при температуре 0 °С, мм$^{-1}$, не менее	21	24
Температура размягчения по кольцу и шару, °С, не ниже	+ 47	+ 50
Температура хрупкости по Фраасу, °С, не выше	– 18	– 19

В качестве минеральных материалов для приготовления асфальтобетона типа Б использовался минеральный порошок МП-1, представляющий собой неактивированную карбонатную горную породу доломит, щебень гранитный фракции 5–20 мм и отсевы дробления гранитного щебня фракции 0–5 мм.

Основным свойством, характеризующим технологичность теплой асфальтобетонной смеси при пониженных температурах является ее способность с минимальными усилиями достигать необходимой плотности в процессе уплотнения. Максимально смоделировать процесс уплотнения асфальтобетонных смесей в покрытии автомобильной дороги в лабораторных условиях позволяет методика уплотнения образцов асфальтобетонной смеси (АБС) с применением прибора вращательного (гиратаци-

онного) уплотнения, которое достигается за счет сочетания усилия сдвига при вращении и вертикальной результирующей силы. Прибор «Laboratory gyratory compactor Cooper CRT-GYR» (далее — гиратор) обеспечивает фиксацию количества вращений (оборотов), необходимых для достижения заданной плотности асфальтобетона.

В исследованиях рассмотрен асфальтобетон типа Б с заданной плотностью — 2380 ± 10 кг/м^3, при этом расход химических добавок соответствовал рекомендациям производителей. Приготовление асфальтобетонной смеси осуществлялось при температуре 150 °С, после чего смесь выдерживали в сушильном шкафу при температуре 110 °С в течение двух часов для стабилизации температуры смеси по объему. Уплотнение смесей с различными химическими добавками производили при температуре 110 °С до достижения заданной плотности асфальтобетона. При этом для АБС, содержащих исследуемую химическую добавку, фиксировали количество оборотов гиратора, необходимых для достижения заданной плотности асфальтобетона при высоте образца 115 мм.

При оценке эффективности применяемых химических добавок изучалось также их влияние на физико-механические и технологические свойства битумного вяжущего, как основного структурообразующего компонента асфальтобетона. Оценку производили по следующим свойствам:

- глубина проникания иглы, мм$^{-1}$, при температуре 0 и 25 °С (по методу ГОСТ 33136);
- температура размягчения по кольцу и шару, °С (по методу ГОСТ 33142);
- температура хрупкости по Фраасу, °С (по методу ГОСТ 33143);
- динамическая вязкость при скорости сдвига 100 с$^{-1}$ (по методу ГОСТ 33137), при скорости сдвига 100 с$^{-1}$, на приборе Anton Paar Modular Compact Rheometer Physica MCR 101.

Эффективность добавки оценивали по обобщенному критерию технико-экономической эффективности (F_k), учитывающему как совокупность эксплуатационных свойств, так и экономические показатели, вычисляемому по формуле:

$$F_k = K_q \cdot K_{ec}$$

Коэффициент экономической эффективности (K_{ec}) определяли по формуле:

$$K_{ec} = \frac{1}{1 + P_{cd}\dfrac{C_{hd}}{C_b}},$$

где P_{cd} и C_{hd} — расход, кг/т, и стоимость, руб./т, химической добавки, соответственно; C_b — стоимость нефтяного битума, руб./т.

Эксплуатационные свойства оценивали по обобщенному коэффициенту качества (K_q), учитывающего комплекс физико-механических и технологических свойств битума и асфальтобетонной смеси:

$$K_q = \sqrt[6]{k_{\text{упл}} k_{P25} k_{P0} k_{Txp} k_{Tp} k_\eta},$$

где $k_{\text{упл}} = \dfrac{N_{\text{упл}}}{N'_{\text{упл}}}$ — критерий, учитывающий влияние химической добавки на уплотняемость асфальтобетонной смеси, равный отношению количества оборотов, необходимых для уплотнения асфальтобетонной смеси без химической добавки к количеству оборотов, необходимых для уплотнения асфальтобетонной смеси с химической добавкой; $k_{P25} = \dfrac{P_{25}}{P'_{25}}$ — критерий, учитывающий влияние химической добавки на условную вязкость, равный отношению глубины проникания иглы при 25 °С в битум без химической добавки к глубине проникания иглы при 25°С в битум с химической добавкой; $k_{P0} = \dfrac{P'_0}{P_0}$ — критерий, учитывающий влияние химической добавки на условную вязкость, равный отношению глубины проникания иглы при 0 °С в битум с химической добавкой к глубине проникания иглы при 0 °С в битум без химической добавкой; $k_{Txp} = \dfrac{T'_{xp}}{T_{xp}}$ — критерий, учитывающий влияние химической добавки на трещиностойкость битума, равный отношению температуры хрупкости битума с химической добавкой к температуре хрупкости битума без химической добавки; $k_\eta = \dfrac{\eta'}{\eta}$ — критерий, учитывающий влияние химической добавки на начальную динамическую вязкость битума при температуре 70 °С, при скорости сдвига 100 с$^{-1}$, равный отношению динамической вязкости битума с химической добавкой к динамической вязкости битума без химической добавки.

На этапе изучения влияния химических добавок на свойства битума и уплотняемость асфальтобетонной смеси отбираются наиболее рациональные добавки, для дальнейшего изучения их влияния на свойства асфальтобетона, которые оценивались по следующим свойствам:

- средняя плотность, кг/м^3;
- водонасыщение, % (ГОСТ 9128);
- предел прочности при сжатии, МПа, при 20 и 50 °С (ГОСТ 9128);
- водостойкость (ГОСТ 9128);
- водостойкость при длительном водонасыщении (ГОСТ 9128).

Оценку влияния температуры на вязкость исследуемых материалов проводили по параметрам и зависимости , описываемой функцией:

$$\eta = a \cdot e^{-U/(RT)},$$

где η — вязкость битума, Па·с; a — константа, единица измерения которой аналогична единице измерения вязкости; U — энергия активации процесса течения, Дж/моль; R — универсальная газовая постоянная (R = 8,314 Дж/(моль·К)); T — абсолютная температура, К.

Энергия активации — важный параметр, равный количеству энергии, которую необходимо подвести извне для начала течения, то есть для преодоления физического барьера, который для рассматриваемых систем характеризует параметры структуры расплава. Таким образом, характеризует избыток энергии по отношению к средней энергии частиц при данной температуре. Очевидно, что изменение при введении добавок будет характеризовать структурные изменения, которые произошли вследствие их введения.

Физический смысл параметра становится очевидным только при:

$$e^{-U/(RT)} = 1.$$

Это равенство выполняется при $T \to \infty$:

$$\eta(\infty) = \lim_{T\to\infty} a \cdot e^{-U/(RT)} = a.$$

Таким образом, параметр также является структурным параметром, характеризующим влияние добавок при отсутствии влияния температуры.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для установления эффективности химических добавок на первом этапе изучалось их влияние на технологичность теплой асфальтобетонной смеси (ТАБС), уплотняемой при пониженной температуре — 110 °С, полученные результаты представлены в таблице 2.

Анализ результатов, представленных в таблице 2, позволил установить, что все рассматриваемые добавки снижают необходимое количество оборотов гиратора на 38 -55 % для достижения заданной плотности асфальтобетона при пониженной температуре. Применение добавки Cecabase RT 945 и ДАД-ТА позволяет снизить температуру уплотнения асфальтобетонной смеси на 40 °С без ухудшения ее технологичности, полученной при стандартных условиях — температура уплотнения 150 °С.

Таблица 2
Влияние различных добавок на гиратационное уплотнение ТАБС

Наименование добавки	Расход добавки, % от массы битума	Температура уплотнения ТАБС, °С	Количество оборотов ращательного уплотнителя, ед.
Без добавки	—	150	53
		110	110
Адгезол 3-ТД	1.0	110	65
ДАД-ТА2	1.0	110	66
Азол 1007	1.0	110	65
Cecabase RT 945	0.3	110	50
ДАД-ТА	0.3	110	50
Дорос - Т	0.6	110	69
Амдор ТС-1	0.3	110	62

На втором этапе оценки эффективности исследуемых химических добавок изучалось их влияние на физико-механические и технологические свойства битума. Основными показателями, отражающими его поведение в эксплуатационных условиях, являются: условная вязкостная характеристика — глубина проникновения иглы (пенетрация при 25 и 0°С) и интервал пластичности (температура размягчения и температура хрупкости). К показателю, определяющему технологические характеристики вяжущего, относится динамическая вязкость. Результаты определения физико-механических и технологических свойств представлены в таблице 3 и на рисунках 1 и 2.

Таблица 3
Влияние различных добавок на пенетрацию битума БНД 70/100

Наименование добавки	Расход добавки, % от массы битума	Глубина проникания иглы, мм$^{-1}$, при температуре, °С	
		0	25
Без добавки	—	24	72
Адгезол 3-ТД	1.0	26	82
ДАД-ТА2	1.0	28	80
Азол 1007	1.0	28	89
Cecabase RT 945	0.3	29	76
ДАД-ТА	0.3	28	76
Дорос - Т	0.6	28	81
Амдор ТС-1	0.3	28	73

Как видно из таблицы 3, все исследуемые добавки оказывают пластифицирующее воздействие на битум, но не изменяют его марку, в соответствии с ГОСТ 33133. Модифицированный битум находится в диапазоне условной вязкости 70/100 мм$^{-1}$. Необходимо отметить, что наибольший пластифицирующий — разжижающий эффект наблюдается у добавок с рекомендованной концентрацией 0,6–1% — в среднем 20%, тогда как у добавок с концентрацией с 0,3% пластифицирующий эффект находится на уровне 0,3%— 6%.

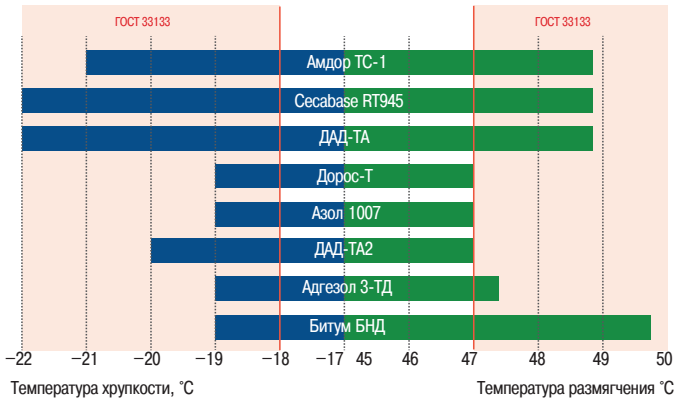

Рис. 1. Влияние добавок на температуру хрупкости и размягчения битума

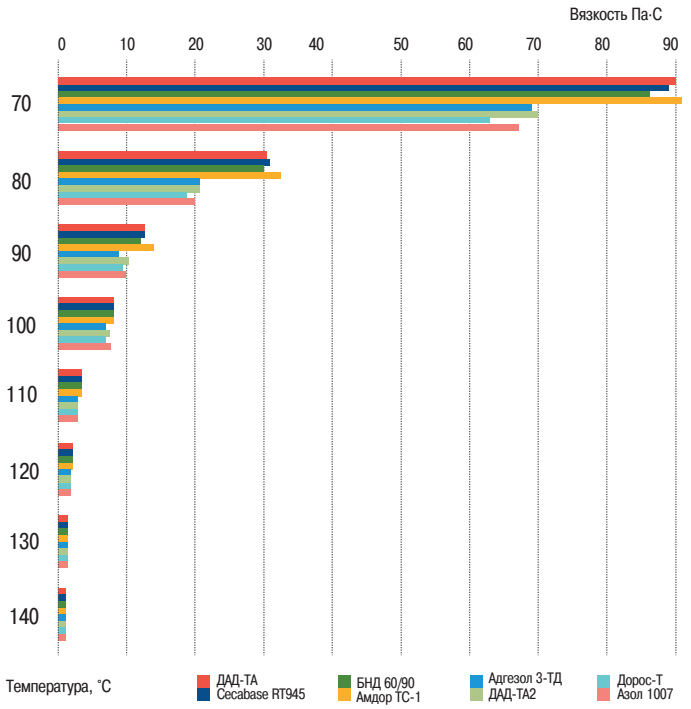

Рис. 2. Динамическая вязкость битума с ПАВ, при скорости сдвига 100 с$^{-1}$

При изучении влияния добавок на интервал пластичности битума (совокупность температуры размягчения и хрупкости) (рис.1), было установлено, что добавки Дорос ТС-1, Азол 1007 и ДАД-ТА2 с концентрацией 0,6–1% не прошли испытания по температуре размягчения вяжущих, полученные показатели находятся на границе допуска. Также важно отметить, что добавки Азол 1007 и Адгезол 3-ТД не оказали влияния на температуру хрупкости. При этом все добавки с рекомендованным расходом 0,3% — Cecabase RT 945, ДАД-ТА и Амдор ТС-1 по температуре размягчения показали результаты близкие к битуму, что свидетельствует об отсутствии разжижающего эффекта в битуме в диапазоне эксплуатационных температур. Вместе с этим, у битумов с добавками наблюдается улучшение низкотемпературных характеристик, здесь, лучше проявили добавки Cecabase RT945 и ДАД-ТА, улучшение составило до 16%.

Анализ результатов динамической вязкости модифицированных битумов (рис. 2), свидетельствует о том, что Адгезол 3-ТД, ДАД-ТА2, Дорос-Т и Азол 1007 снижают вязкость битума до 30% во всем измеряемом температурном диапазоне (Т = 70–140 °С), что коррелирует с данными по температуре размягчения (рис.1), и оказывает негативное влияние на деформативные показатели асфальтобетона, приготовленного с их использованием. Добавки ДАД-ТА, Cecabase RT 945 и Амдор ТС-1 незначительно влияют на начальную вязкость битума, сохраняя во всем температурном диапазоне технологичность вяжущего в процессе приготовления асфальтобетонной смеси и, в соответствии с таблицей 1, в процессе ее уплотнения.

Для определения обобщенного критерия технико-экономической эффективности (F_k) рассматриваемых добавок для теплых асфальтобетонных смесей были рассчитаны по формуле (2) коэффициенты экономической эффективности и коэффициенты эксплуатационной эффективности по формуле (3), результаты расчета представлены в таблице 4.

Коэффициент K_{ec} показывает, насколько увеличилась стоимость битума при введении в него химической добавки с учетом ее расхода, коэффициент K_q показывает вклад химической добавки в улучшение комплекса физико-механических и технологических свойств битума и асфальтобетонной смеси.

На основании полученных результатов по расчетам коэффициентов экономической и эксплуатационной эффективности (таблица 4) был рассчитан обобщенный критерий технико-экономической эффективности применения рассматриваемых химических добавок (рис. 3).

Таблица 4

Критерии и коэффициент экономической и эксплуатационной эффективности химических добавок

Наименование добавки	Коэффициент экономической эффективности K_{ec}	Частные критерии качества						Обобщенный коэффициент качества K_q
		$k_{упл}$	k_{P25}	k_{P0}	$k_{Tхр}$	k_{Tp}	$k_{л}$	
Адгезол 3-ТД	0.88	1.69	0.85	1.08	1.00	1.05	0.8	1.04
ДАД-ТА2	0.93	1.67	0.90	1.17	1.05	1.06	0.8	1.08
Азол 1007	0.93	1.69	0.79	1.17	1.00	1.06	0.8	1.04
Cecabase RT945	0.92	2.20	0.90	1.21	1.16	0.98	1.0	1.19
ДАД-ТА	0.94	2.08	0.92	1.17	1.16	0.98	1.1	1.19
Дорос - Т	0.92	1.59	0.86	1.17	1.00	0.94	0.7	1.02
Амдор ТС-1	0.94	1.77	0.96	1.17	1.11	0.98	0.7	1.08

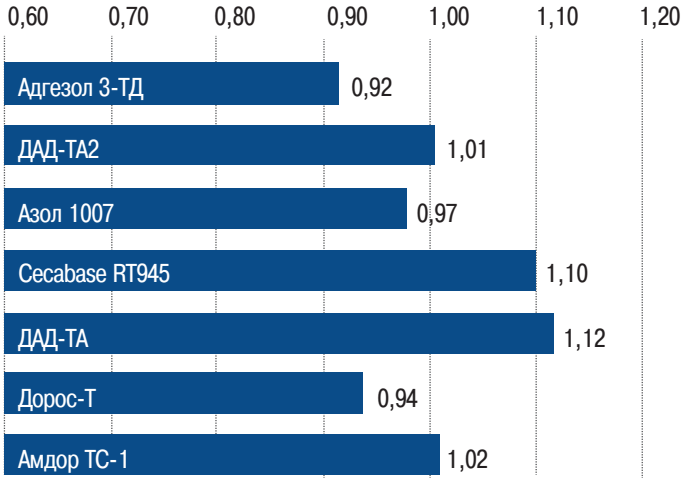

Рис. 3. Обобщенный критерий технико-экономической эффективности применения химических добавок, F_k

Анализ величин критерия рациональности применения химических добавок (рис.3) позволяет предложить разделение добавок на две группы: добавки, которые улучшают эффективность битума на 5% (F_k≥1,05) и более, а также добавки, которые не позволяют улучшить эффективность битума более чем на 5% (F_k≤1,05), то есть не вносят значимого эффекта в изменение свойств.

Для установления влияния добавок поверхностно-активных веществ в составе битума на свойства асфальтобетона были отобраны добавки из двух различных групп по эффективности. Из первой группы — ДАД-ТА и Cecabase RT945, из второй группы — Азол 1007 и Адгезол 3-ТД. Полученные результаты свойств представлены в таблице 5.

Изучение физико-механических свойств асфальтобетонов, приготовленных на битумах, модифициро-

Таблица 5

Физико-механические свойства асфальтобетона типа Б, уплотненных при температуре 110°С

Наименование показателя	Требования ГОСТ 9128-2013	Фактические показатели асфальтобетона, приготовленного с использованием				
		—	ДАД-ТА	Cecabase RT945	Азол 1007	Адгезол 3-ТД
Средняя плотность, г/см^3	—	2.31	2.38	2.38	2.34	2.33
Водонасыщение, %	1.5…4.0	3.46	1.68	1.72	2.53	2.55
Предел прочности при сжатии, МПа при температуре –20 °С – 50 °С	 не менее 2.5 не менее 1.2	 3.18 1.18	 4.83 1.75	 4.62 1.63	 4.28 1.15	 4.30 1.15
Водостойкость	не менее 0.9	0.80	0.98	0.97	0.80	0.80
Водостойкость при длительном водонасыщении	не менее 0.85	0.78	0.97	0.95	0.78	0.78

ванных добавками с рекомендованной концентрацией 0,3%, показало, что негативного влияния на его свойства они не оказывают. Образцы асфальтобетонов, уплотненные при температуре 110 °С, соответствуют требованиям ГОСТ 9128-2013 для традиционных горячих асфальтобетонных смесей (таблица 5).

Асфальтобетон, приготовленный без добавок и с использованием добавок Азол 1007 и Адгезол 3ТД с рекомендованной концентрацией 1% недостаточно уплотнился, о чем свидетельствует более низкий показатель средней плотности. Это закономерно способствовало увеличению водонасыщения и не удовлетворительному значению показателя водостойкости образцов <12% от требований ГОСТ, и предел прочности при сжатии при 50°С < 5% от требований ГОСТ. Это негативно отразится на работе дорожного покрытия, выполненного с его использованием. Асфальтобетоны, приготовленные с использованием добавок — ДАД-ТА и Cecabase RT945 превышают требования ГОСТ. Так, предел прочности при сжатии при 20°С > 93% от требований ГОСТ, предел прочности при сжатии при 50°С > 45% от требований ГОСТ, водостойкость > 9% от требований ГОСТ.

Для объяснения полученных результатов, по изучению влияния различных добавок ПАВ на структуру битума, используя уравнение Аррениуса, рассчитывалось изменение энергии активации, необходимой для преодоления потенциального (кинетического) барьера битумного вяжущего с исследуемыми поверхностно-активными добавками (формула 4) относительно битума (таблица 6).

Данные, представленные в таблице 6, демонстрируют, что все используемые добавки вносят изменение в структуру расплава битума. Однако исследуемые добавки можно классифицировать на две группы:

Группа добавок, введение которых приводит к незначительному изменению параметров структуры расплава битума. Для таких добавок потенциальный барьер увеличивается незначительно, а после прекращения структурирующего фактора – температуры – снижение вязкости не превышает двукратности.

Группа добавок, введение которых приводит к существенному росту энергии активации (до 40%) и существенному снижению вязкости после прекращения влияния температуры (до 10^{+7} раз).

Оценка влияния структурирующего фактора на поведение битумов, модифицированных представленными добавками, требует дополнительных исследований и установления зависимостей вязкости расплавов от скорости сдвига. При получении данных, подтверждающих представленную классификацию добавок, при

Таблица 6
Влияние поверхностно-активных добавок на энергию активации и константу вязкости
Примечание: индекс «b» указывает на битум.

Наименование добавки	Содержание добавки	Параметр U		Параметр a	
		U/R	$U/R/(U/R)_b$	a	a/a_b
Битум	—	11736	1,00	$9{,}39\cdot10^{-14}$	1,00
Адгезол 3-ТД	1.0	15272	1,30	$3{,}14\cdot10^{-18}$	$3{,}3\cdot10^{-5}$
ДАД-ТА2	1.0	15452	1,32	$1{,}89\cdot10^{-18}$	$2{,}0\cdot10^{-5}$
Азол 1007	1.0	15745	1,34	$7{,}8\cdot10^{-19}$	$8{,}3\cdot10^{-6}$
Cecabase RT945	0.3	12143	1,03	$3{,}13\cdot10^{-14}$	0,33
ДАД-ТА	0.3	12146	1,03	$3{,}08\cdot10^{-14}$	0,33
Дорос-Т	0.6	16609	1,42	$6{,}01\cdot10^{-20}$	$6{,}4\cdot10^{-7}$
Амдор ТС-1	0.3	12098	1,03	$3{,}58\cdot10^{-14}$	0,38

исследовании влияния скорости сдвига на вязкость расплавов битумов можно построить структурную модель влияния добавок на реологические свойства расплавов.

ВЫВОДЫ

Установлено, что рассматриваемые добавки позволяют снизить необходимое количество оборотов гиратора на 38–55%, для достижения заданной плотности асфальтобетона при высоте образца 115 мм и пониженной температуре, равной 110 °С. Это позволяет снизить температуру производства и укладки асфальтобетонной смеси на 40 °С. Указанное имеет благоприятное влияние на затраты и экологию региона, в котором проводится производство асфальтобетона и строительство автомобильной дороги.

Установлено, что все исследуемые добавки оказывают пластифицирующее воздействие на битум, но не изменяют его марку, в соответствии с ГОСТ 33133. Битум с ПАВ находится в диапазоне условной вязкости 70/100 мм$^{-1}$. Показано, что наибольший пластифицирующий — разжижающий эффект наблюдается у добавок с рекомендованной концентрацией 0,6–1% — в среднем 20%, тогда как у добавок с концентрацией 0,3% пластифицирующий эффект находится на уровне — 6%.

Установлено, что Адгезол 3-ТД, ДАД-ТА2, Дорос-Т и Азол 1007 снижают динамическую вязкость битума до 30% во всем измеряемом температурном диапазоне (Т = 70–140 °С), что коррелирует с данными по тем-

пературе размягчения. Добавки ДАД-ТА, Cecabase RT 945 и Амдор ТС-1, незначительно влияют на начальную вязкость битума, сохраняя во всем температурном диапазоне технологичность вяжущего в процессе приготовления асфальтобетонной смеси, а также улучшают температуру хрупкости битума до 16%.

Для определения комплексного технико-экономического критерия эффективности Fk исследованных добавок для теплых асфальтобетонных смесей были разработаны и предложены коэффициенты: экономической эффективности Kec, показывающий на сколько увеличилась стоимость битумного вяжущего при введении в него химической добавки с учетом ее расхода; коэффициент качества Kq, показывающий вклад химической добавки в улучшение комплекса физико-механических и технологических свойств битума и асфальтобетонной смеси.

На основании полученных результатов по расчетам критерия Fk, предложено разделение добавок на две группы: первая группа — добавки Cecabase RT945, ДАД-ТА и Амдор ТС-1, улучшающие эффективность битума на 5% — $F_k \geq 1{,}05$ и более; вторая группа — добавки Адгезол 3-ТД, ДАД-ТА2, Азол 1007, Дорос-Т, которые не позволяют улучшить эффективность битума более чем на 5% — $F_k \leq 1{,}05$, то есть не вносят значимого эффекта в изменение свойств.

Установлено, что применение добавок второй группы в составе асфальтобетона, уплотненного при пониженной температуре 110 °С, приводит к увеличенному значению водонасыщения и неудовлетворительному значению по водостойкости и длительной водостойкости образцов асфальтобетона — ниже на 12% от требований ГОСТ и по пределу прочности при сжатии при 50 °С — ниже на 5% от требований ГОСТ. Применение добавок первой группы в составе асфальтобетона, уплотненного при пониженной температуре 110 °С, позволяет обеспечить увеличение предела прочности при сжатии при 20 °С на 93% от требований ГОСТ, предела прочности при сжатии при 50 °С на 45% от требований ГОСТ, водостойкость на 9% от требований ГОСТ.■