

УДК 665.7

Сергей Егорович КРАВЧЕНКО,
кандидат технических наук,
доцент,
директор республиканского
дочернего унитарного
предприятия
"Белорусский дорожный научно-
исследовательский институт
"БелдорНИИ"

Жанна Владимировна РЕУТ,
старший преподаватель кафедры
"Строительство
и эксплуатация дорог"
Белорусского национального
технического университета

**Владимир Петрович
ПРОКОПОВИЧ,**
кандидат химических наук,
заведующий сектором
стабилизации полимеров
НИИ ФХП Белорусского
государственного университета

**Ираида Аркадьевна
КЛИМОВЦОВА,**
старший научный сотрудник
сектора стабилизации полимеров
НИИ ФХП Белорусского
государственного университета

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ К ТЕРМООКСИДЛИТЕЛЬНОЙ ДЕСТРУКЦИИ РЕЗИНОБИТУМНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

STUDY OF THE STABILITY TO THERMO-OXIDATIVE DESTRUCTION OF RUBBER BITUMEN COMPOSITIONS

Изложены результаты термогравиметрического анализа нефтяного дорожного битума БНД 90/130, резиновых крошек ОАО "Беларусрезинотехника" и СООО НПГ "Экологическая альтернатива" и резинобитумных смесей на их основе.

Исследовано влияние стабилизаторов (диафен ФП, ТС-66, ЛН-1) и пластификаторов (рапсовое, вазелиновое, индустриальное масло) на процессы термоокислительной деструкции резинобитумных смесей.

Рассчитаны энергии активации термоокислительной деструкции и коэффициенты эффективности в качестве критерия оценки влияния стабилизаторов и пластификаторов на термоокислительную деструкцию резинобитумных смесей.

This article presents the results of the thermogravimetric analysis of petroleum road bitumen BND 90/130, rubber powder OAO "Belarusrezinotekhnika" and SOOO NPG "Ecological Alternative" and rubber bitumen compositions on their basis.

The effects of stabilizers (diafen FP, TC-66, LN-1) and plasticizers (rape, vaseline and industrial oils) on the thermo-oxidative destruction processes of rubber bitumen compositions have been studied.

The energy of activation of thermo-oxidative destruction and efficiency coefficients have been calculated as criteria for estimating the effects of stabilizers and plasticizers on the thermo-oxidative destruction of rubber bitumen compositions.

ВВЕДЕНИЕ

К числу важнейших свойств, которыми должны обладать органо-минеральные материалы в дорожном покрытии, относятся: прочность, теплоустойчивость, водо- и морозостойкость, озоностойкость и др. Наличие в составе дорожного покрытия нефтяного битума, изменяющего под воздействием различных факторов свое реологическое состояние — от вязко-текучего до упруго-пластичного и упруго-хрупкого, — придает покрытию специфические свойства. Физико-механические показатели (прочность, долговечность) дорожных асфальтобетонных покрытий непосредственно определяются рядом специфических свойств нефтяных битумов и функциональных добавок. В первую очередь, их устойчивостью к термической и термоокислительной деструкции, происходящей под воздействием повышенных температур, кислорода воздуха, озона, перепадов температур, влаги.

Исследования, проводимые в течение многих лет с целью установления связи между свойствами битумов и их химическим составом, не позволили сделать однозначного вывода. Трудность решения этой проблемы объясняется не только сложностью химического состава битумов, но и отсутствием прямого однозначного

влияния состава на прочность и долговечность дорожного покрытия. При этом свойства битумов необходимо рассматривать в сочетании со свойствами минеральных материалов, на поверхности которых битумы распределены.

В ранее проведенных исследованиях стабилизации полиолефинов, поликапроамида и резиновых смесей для оценки эффективности стабилизаторов успешно применялся метод термогравиметрического анализа (ТГА) [1–3]. В отличие от полимеров с известным химическим строением и составом, стабильными физико-химическими показателями и прогнозируемой деструкцией, нефтяные битумы и их композиции представляют собой сложную смесь олигомерных продуктов переработки нефти: органических масел, нефтяных смол, асфальтенов и т. д. [4]. Поэтому метод ТГА расширяет возможность оценки долговечности нефтяных битумов различного состава традиционными методами [5–8].

Метод ТГА был успешно применен для оценки устойчивости нефтяных битумов различного группового состава (Shell 70/100; Total 70/100; Total 160/220; Esso 70/100; Nynas 70/100; Compound; производства Венесуэлы, Новополоцкого и Мозырского битума), в том числе с добавками стабилизаторов, препятствующих термоокислительной деструкции [9–11].

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕСТРУКЦИИ РЕЗИНОБИТУМНЫХ СМЕСЕЙ

В статье приведены исследования процессов термоокислительной деструкции резинобитумных смесевых композиционных составов, включающих пластификаторы и термостабилизаторы.

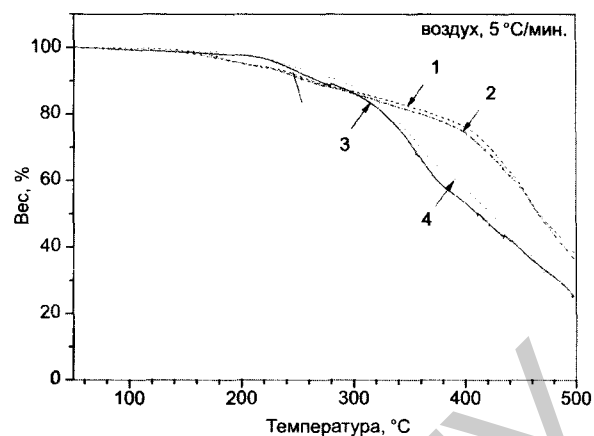
Для опытных испытаний использовали нефтяной дорожный битум БНД 90/130, резинобитумные смеси на основе данного битума с резиновой крошкой ОАО "Беларусьрезинотехника" (г. Бобруйск), СООО НПГ "Экологическая альтернатива" (г. Гродно); резинобитумные композиции с промышленным стабилизатором диафен ФП и стабилизаторами, синтезированными в НИИ ФХП БГУ (ТС-66, ЛН-1); резинобитумные композиции с пластификаторами (индустриальное, вазелиновое, рапсовое масло). Состав резинобитумных смесей и композиций представлен в таблице 1.

Резинобитумные смеси и композиции приготавливали в лабораторном смесителе при температуре 180 °С в течение 2 ч. Тепловое старение битума, резинобитумных смесей и композиций со стабилизаторами и пластификаторами проводили в термическом шкафу в воздушной среде при температуре 180 °С в течение 2 ч.

Для оценки термоокислительной деструкции битума БНД 90/130 и резинобитумных смесевых композиционных составов был выполнен ТГА образцов, который проводили с помощью термоанализатора "Mettler" TA-3000 с подключенной ячейкой ТГ. Исследовали навески образцов по 9–11 мг, разложение которых осуществлялось в проточной воздушной атмосфере в интервале температур 50 °С–500 °С при скорости нагрева 5 °С/мин.

Таблица 1. Состав резинобитумных смесей и композиций

Номер состава	Содержание в смеси, %			Содержание стабилизатора, %			Содержание пластификатора, %		
	битума БНД 90/130	резиновой крошки ОАО "Беларусьрезинотехника"	резиновой крошки СООО НПГ "Экологическая альтернатива"	Диафен ФП	ТС-66	ЛН-1	Индустриальное масло	Вазелиновое масло	Рапсовое масло
1	60,0	40,0	–	–	–	–	–	–	–
2	60,0	40,0	–	0,5	–	–	–	–	–
3	60,0	40,0	–	1,0	–	–	–	–	–
4	60,0	40,0	–	–	0,5	–	–	–	–
5	60,0	40,0	–	–	1,0	–	–	–	–
6	60,0	40,0	–	–	–	0,5	–	–	–
7	60,0	40,0	–	–	–	1,0	–	–	–
8	70,0	–	30,0	–	–	–	–	–	–
9	70,0	–	30,0	0,5	–	–	–	–	–
10	70,0	–	30,0	1,0	–	–	–	–	–
11	70,0	–	30,0	–	0,5	–	–	–	–
12	70,0	–	30,0	–	1,0	–	–	–	–
13	70,0	–	30,0	–	–	0,5	–	–	–
14	70,0	–	30,0	–	–	1,0	–	–	–
15	55,0	40,0	–	–	–	–	5,0	–	–
16	55,0	40,0	–	–	–	–	–	5,0	–
17	55,0	40,0	–	–	–	–	–	–	5,0
18	65,0	–	30,0	–	–	–	5,0	–	–
19	65,0	–	30,0	–	–	–	–	5,0	–
20	65,0	–	30,0	–	–	–	–	–	5,0



1, 2 — резиновая крошка ОАО "Беларусьрезинотехника" до и после термообработки
3, 4 — резиновая крошка СООО НПГ "Экологическая альтернатива" до и после термообработки

Рис. 1. Термогравиметрия резиновых крошек. Ток воздуха. Скорость 5 °С/мин

Кривые потери массы (ТГ) резиновых крошек ОАО "Беларусьрезинотехника" и СООО НПГ "Экологическая альтернатива" представлены на рис. 1. Как видно из рис. 1, резиновая крошка СООО НПГ "Экологическая альтернатива" устойчива до температуры 230 °С, тогда как для резиновой крошки ОАО "Беларусьрезинотехника" в интервале температур 160 °С–230 °С наблюдается незначительная потеря веса (5 %–6 %). Однако в интервале температур 300 °С–500 °С наблюдалась более высокая термостойкость резиновой крошки ОАО "Беларусьрезинотехника".

Для определения влияния температурного фактора на термостойкость исследуемого битума, резиновых крошек и резинобитумных смесей было проведено термостарение образцов. Из рис. 1 видно, что термостойкость резиновой крошки ОАО "Беларусьрезинотехника" понижается после термостарения, тогда как термостойкость резиновой крошки СООО НПГ "Экологическая альтернатива" повышается. Однако, как и в случае исходных крошек, в температурном интервале 160 °С–300 °С термостойкость старенной резиновой крошки СООО НПГ "Экологическая альтернатива" несколько выше этого же показателя для резиновой крошки ОАО "Беларусьрезинотехника". Тем не менее, при дальнейшем повышении температуры установлена более высокая термостойкость резиновой крошки ОАО "Беларусьрезинотехника".

Сравнительный анализ кривых термического разложения (рис. 2) исходного битума БНД 90/130 и резинобитумных смесей на его основе показал, что введение резиновой крошки не повлияло на термостойкость битума в температурном интервале 50 °С–260 °С. При дальнейшем повышении температуры до 320 °С термостойкость резинобитумных смесей существенно выше по сравнению с исходным битумом и не зависит от введенной резиновой крошки. Однако наиболее термостойкой в температурном интервале 320 °С–500 °С является резинобитумная смесь, наполненная резиновой крошкой ОАО "Беларусьрезинотехника".

ТГА термообработанного битума показал (см. рис. 2), что исследуемый битум является достаточно термостабильным. Как исходный битум, так и термообработанный при температуре 180 °С в течение 2 или 4 ч начинают разлагаться при температуре 250 °С. Установлено, что термостойкость битума падает с увеличением времени термообработки. Однако существенных различий в потере веса отмечено не было.

Согласно ТГ-кривым (см. рис. 2), резинобитумные смеси после старения, как и битум, термически стабильны до температуры 250 °С. Причем термостойкость старенных образцов сохраняется на уровне исходных. С повышением температуры введение резиновой крошки увеличивает термостойкость битума после старения. Причем в температурном интервале 250 °С–330 °С кривые потери массы термообработанных смесей с исследуемыми резиновыми крошками практически совпадают. При дальнейшем повышении температуры наиболее термостабильной после старения является резинобитумная смесь с резиновой крошкой ОАО "Беларусьрезинотехника".

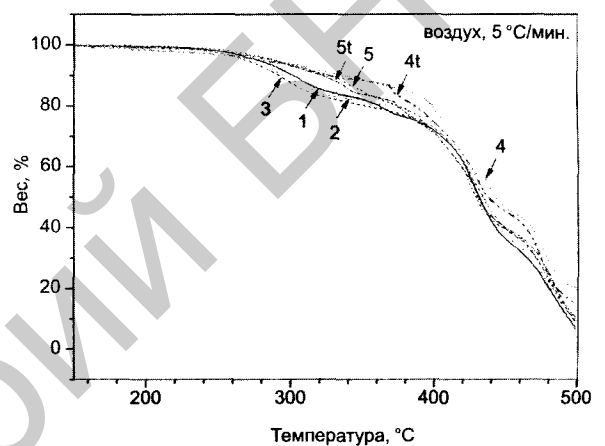
ВЛИЯНИЕ СТАБИЛИЗАТОРОВ И ПЛАСТИФИКАТОРОВ НА ПРОЦЕССЫ ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНОЙ ДЕСТРУКЦИИ РЕЗИНОБИТУМНЫХ СМЕСЕЙ

Для увеличения срока эксплуатации исследуемых резинобитумных смесей в них были введены промышленный стабилизатор диафен ФП и стабилизаторы, синтезированные в НИИ ФХП БГУ (ТС-66, ЛН-1). В резинобитумную смесь (битум + резиновая крошка) вводили стабилизаторы в количестве 0,5 % и 1,0 % от ее массы.

Для определения влияния стабилизаторов на процессы термоокислительной деструкции резинобитумных смесей на основе нефтяного дорожного битума БНД 90/130 был проведен ТГА старенных резинобитумных композиций. Тепловое старение композиций про-

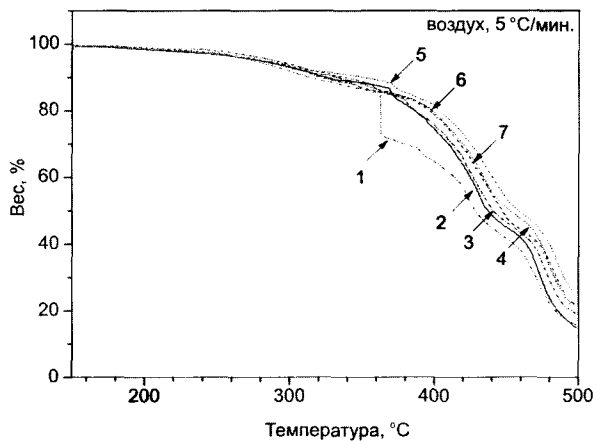
водили в воздушной среде при температуре 180 °С в течение 2 ч. ТГА показал (рис. 3), что введение диафена ФП в резинобитумную смесь (битум + резиновая крошка ОАО "Беларусьрезинотехника") повышает термостойкость смеси, причем в большей степени при меньшей концентрации (0,5 %). Увеличение термической стабильности данной резинобитумной смеси установлено также при введении 0,5 % стабилизатора ТС-66. Следует отметить, что увеличение концентрации ТС-66 до 1,0 % не изменило термостойкости композиции. Кривые потери массы резинобитумных композиций с 0,5 % и 1,0 % ТС-66 практически совпадают.

Согласно ТГ-кривым (см. рис. 3), введение 0,5 % стабилизатора ЛН-1 незначительно повышает термостойкость резинобитумной смеси (битум + резиновая крошка ОАО "Беларусьрезинотехника"). Увеличение концентрации стабилизатора до 1,0 % несущественно дестабилизирует композицию в температурном интер-



1 — исходный битум; 2 — битум, термообработанный при температуре 180 °С, 2 ч;
3 — битум, термообработанный при температуре 180 °С, 4 ч;
4, 4t — резинобитумная смесь с резиновой крошкой ОАО "Беларусьрезинотехника" до и после термообработки;
5, 5t — резинобитумная смесь с резиновой крошкой СООО НПГ "Экологическая альтернатива" до и после термообработки

Рис. 2. Термогравиметрия битума и резинобитумных смесей до и после термообработки. Ток воздуха. Скорость 5 °С/мин



1 — 1,0 % ЛН-1;
2 — Битум + резиновая крошка ОАО "Беларусьрезинотехника" после термообработки;
3 — 0,5 % ЛН-1; 4 — 1,0 % диафен ФП; 5 — 0,5 % диафен ФП;
6 — 0,5 % ТС-66; 7 — 1,0 % ТС-66

Рис. 3. Термогравиметрия резинобитумной смеси с резиновой крошкой ОАО "Беларусьрезинотехника" и резинобитумных композиций на ее основе после термообработки

вале 260 °С–360 °С и резко понижает термостойкость при температуре 360 °С.

Следовательно, увеличение термостойкости резинобитумной смеси с резиновой крошкой ОАО "Беларусьрезинотехника" установлено при введении диафена ФП и ТС-66, причем наиболее термостабильной является композиция с 0,5 % диафена ФП. Следует отметить, что кривые потери массы композиций с 0,5 % ТС-66, 1,0 % ТС-66 и 1,0 % диафена ФП практически совпадают.

Сравнительный анализ кривых термического разложения резинобитумной смеси (битум + резиновая крошка СООО НПГ "Экологическая альтернатива") и композиций на ее основе со стабилизаторами (диафен ФП, ТС-66, ЛН-1) после термостарения представлен на рис. 4.

Установлено, что введение 0,5 % диафена ФП в данную резинобитумную смесь повышает ее термостойкость в интервале температур 320 °С–400 °С, тогда как увеличение концентрации стабилизатора до 1,0 % практически не влияет на термостойкость смеси.

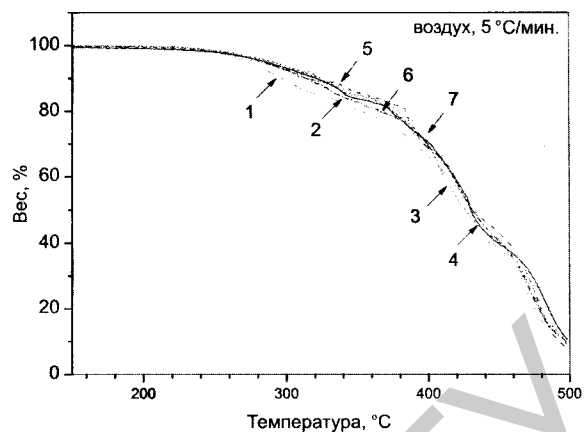
Согласно ТГ-кривым (см. рис. 4), 0,5 % ТС-66 незначительно дестабилизирует резинобитумную смесь с резиновой крошкой СООО НПГ "Экологическая альтернатива" в интервале температур 280 °С–400 °С, а увеличение концентрации ТС-66 до 1,0 % привело к усилению дестабилизации в более широком температурном интервале 260 °С–500 °С.

Как следует из кривых потери массы на рис. 4, введение 0,5 % ЛН-1 практически не влияет на термостойкость резинобитумной смеси (битум + резиновая крошка СООО НПГ "Экологическая альтернатива") до температуры 400 °С и дестабилизирует данную смесь в интервале температур 400 °С–440 °С, тогда как увеличение концентрации до 1,0 % повышает термостабильность.

Следовательно, по данным ТГА установлено повышение термостойкости резинобитумных композиций с резиновой крошкой СООО НПГ "Экологическая альтернатива" и следующими стабилизаторами: 0,5 % диафена ФП и 1,0 % ЛН-1.

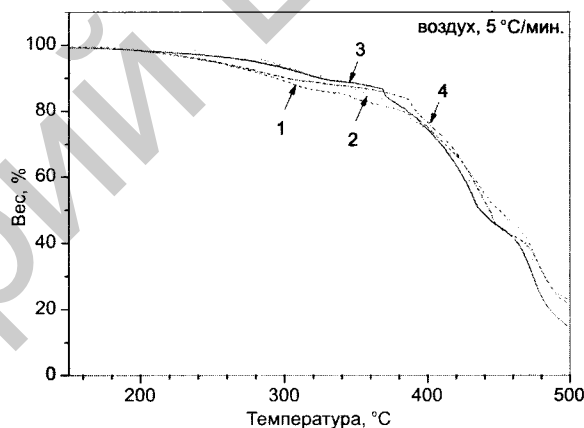
Влияние пластификаторов на термоокислительную деструкцию резинобитумных смесей на основе битума БНД 90/130 и резиновых крошек (ОАО "Беларусьрезинотехника", СООО НПГ "Экологическая альтернатива") представлено на рис. 5, 6.

Как следует из кривых потери массы (см. рис. 5), незначительное повышение термостойкости стареной резинобитумной композиции с резиновой крошкой ОАО "Беларусьрезинотехника" наблюдается при введении рапсового масла (5,0 %). Однако необходимо отметить слабую дестабилизацию данной композиции в узком температурном интервале 340 °С–400 °С. Установлено, что индустриальное и вазелиновое масло в одинаковой степени понижают термостойкость резинобитумной композиции с резиновой крошкой ОАО "Беларусьрезинотехника" до температуры 260 °С, тогда как с повышением температуры (260 °С–400 °С) индустриальное масло значительно сильнее дестабилизирует исследуемую смесь. В то же время, повышение термостойкости наблюдается в интервале температур 400 °С–500 °С при введении как вазелинового, так и индустриального масла.



- 1 — 1,0 % ТС-66; 2 — 0,5 % ТС-66; 3 — 0,5 % ЛН-1;
4 — битум + резиновая крошка СООО НПГ "Экологическая альтернатива" после термообработки;
5 — 0,5 % диафен ФП; 6 — 1,0 % диафен ФП;
7 — 1,0 % ЛН-1

Рис. 4. Термогравиметрия резинобитумной смеси с резиновой крошкой СООО НПГ "Экологическая альтернатива" и резинобитумных композиций на ее основе после термообработки

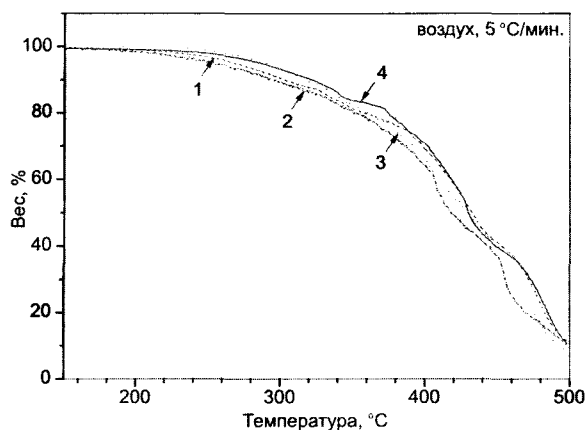


- 1 — индустриальное масло (5,0 %);
2 — рапсовое масло (5,0 %);
3 — битум + резиновая крошка ОАО "Беларусьрезинотехника" после термообработки;
4 — вазелиновое масло (5,0 %)

Рис. 5. Термогравиметрия резинобитумной смеси с резиновой крошкой ОАО "Беларусьрезинотехника" и резинобитумных композиций на ее основе после термообработки

Из сравнения данных термограмм (см. рис. 6) следует незначительное повышение термостойкости в интервале температур 50 °С–300 °С резинобитумной смеси с резиновой крошкой СООО НПГ "Экологическая альтернатива" и рапсовым маслом (5,0 %). При повышении температуры (300 °С–500 °С) термостойкость данной композиции понижается. Дестабилизация резинобитумной композиции с резиновой крошкой СООО НПГ "Экологическая альтернатива" в интервале температур 200 °С–500 °С отмечена при введении как индустриального, так и вазелинового масла, причем влияние последнего сильнее.

Для сравнения активности исследуемых стабилизаторов и пластификаторов в резинобитумных смесях была проведена оценка энергии активации термоокислительной деструкции композиций после старения (E_d) и коэффициентов эффективности ($K_{эф}$) стабилизаторов (пластификаторов). Значения энергии активации тер-



1 — индустриальное масло (5,0 %);
2 — вазелиновое масло (5,0 %);
3 — рапсовое масло (5,0 %); 4 — битум + резиновая крошка
СООО НПГ "Экологическая альтернатива"
после термообработки

Рис. 6. Термогравиметрия резинобитумной смеси с резиновой крошкой СООО НПГ "Экологическая альтернатива" и резинобитумных композиций на ее основе после термообработки

моокислительной деструкции были рассчитаны по кривым потери массы путем их математической обработки методом Бройдо. Коэффициент $K_{эф}$ представляет собой отношение E_d стабилизированной старенной композиции к E_d старенной резинобитумной смеси без стабилизатора или пластификатора. Полученные данные представлены в таблицах 2, 3.

Как видно из таблицы 2, введение в резинобитумную смесь (битум + резиновая крошка ОАО "Беларусьрезинотехника") 0,5 % диафена ФП повышает E_d на 10,0 %, тогда как введение 0,5 % ТС-66 — на 13,0 %. Увеличение концентрации ТС-66 до 1,0 % позволяет стабилизировать композицию в большей степени (на 20,0 %). Показано, что введение в резинобитумную смесь рапсового масла понижает E_d только на 5,0 %, тогда как введение вазелинового и индустриального масла — на 40,0 % и 42,0 %, соответственно.

Таблица 2. Значения E_d и $K_{эф}$ композиций на основе резинобитумной смеси (битум + резиновая крошка ОАО "Беларусьрезинотехника") после 2 ч старения при температуре 180 °C

Стабилизатор, пластификатор	E_d , кДж/моль	$K_{эф}$ стабилизатора (пластификатора)
Без стабилизатора (пластификатора)	254,1	1,00
Диафен ФП (0,5 %)	280,0	1,10
Диафен ФП (1,0 %)	265,1	1,04
ТС-66 (0,5 %)	286,0	1,13
ТС-66 (1,0 %)	305,8	1,20
ЛН-1 (0,5 %)	260,0	1,02
ЛН-1 (1,0 %)	239,7	0,94
Рапсовое масло (5,0 %)	242,2	0,95
Вазелиновое масло (5,0 %)	152,1	0,60
Индустриальное масло (5,0 %)	146,5	0,58

Как видно из таблицы 3, введение 0,5 % диафена ФП повышает значение E_d смеси на 8,0 %. Однако наибольшей энергией активации термоокислительной деструкции обладает резинобитумная смесь с резиновой крошкой СООО НПГ "Экологическая альтернатива", стабилизированная ЛН-1 (1,0 %), который повышает термостабильность смеси на 26,0 %. Введение масел понижает E_d исходной резинобитумной смеси: наименьшее влияние на термостабильность оказывает рапсовое масло, наибольшее — вазелиновое.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1 Авторами с помощью метода термогравиметрического анализа проведено исследование процессов термоокислительной деструкции нефтяного дорожного битума БНД 90/130, резиновых крошек ОАО "Беларусьрезинотехника" и СООО НПГ "Экологическая альтернатива", используемых в качестве связующих в асфальтобетонных смесях, и резинобитумных смесевых композиционных составов, включающих стабилизаторы и пластификаторы. По результатам исследований наиболее термостойкой оказалась резиновая крошка ОАО "Беларусьрезинотехника", так как было установлено значительное повышение термостабильности битума при введении в него данной резиновой крошки. Показано, что как битум, так и резинобитумные композиции после старения (180 °C, 2 ч) термически стабильны до 250 °C. Существенное различие потери веса наблюдается в температурном интервале 250 °C–380 °C, где битум имеет самую низкую термическую стабильность, тогда как наиболее термостабильной является резинобитумная композиция с резиновой крошкой ОАО "Беларусьрезинотехника".
- 3 Проведенный термогравиметрический анализ и расчет энергий активации термоокислительной деструкции показали стабилизирующий эффект диафена ФП (0,5 %) и ТС-66 (0,5 %; 1,0 %) на резинобитумную смесь с резиновой крошкой ОАО "Беларусьрезинотехника", диафена ФП (0,5 %) и ЛН-1 (1,0 %) на резино-

Таблица 3. Значения E_d и $K_{эф}$ композиций на основе резинобитумной смеси (битум + резиновая крошка СООО НПГ "Экологическая альтернатива") после 2 ч старения при температуре 180 °C

Стабилизатор, пластификатор	E_d , кДж/моль	$K_{эф}$ стабилизатора (пластификатора)
Без стабилизатора (пластификатора)	175,4	1,00
Диафен ФП (0,5 %)	175,6	1,08
Диафен ФП (1,0 %)	137,0	0,78
ТС-66 (0,5 %)	189,3	1,00
ТС-66 (1,0 %)	146,2	0,83
ЛН-1 (0,5 %)	140,8	0,80
ЛН-1 (1,0 %)	221,2	1,26
Рапсовое масло (5,0 %)	153,1	0,87
Вазелиновое масло (5,0 %)	126,2	0,72
Индустриальное масло (5,0 %)	138,8	0,79

битумную смесь с резиновой крошкой ООО НПП "Экологическая альтернатива".

- 4 Установлено, что из исследуемых пластификаторов введение 5 % рапсового масла оказывает наименьшее влияние на изменение термостойкости резинобитум-

ных смесей как с резиновой крошкой ОАО "Беларусь-резинотехника", так и с резиновой крошкой ООО НПП "Экологическая альтернатива", тогда как индустриальное и вазелиновое масло дестабилизируют исследуемые резинобитумные смеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прокопович, В. П. Стабилизация эластомерных композиций пространственно-затрудненными аминами / В. П. Прокопович, Н. Р. Прокопчук, И. Н. Свиблович, И. А. Климовцова // Химические проблемы создания новых материалов и технологий: сб. статей. Минск: БГУ, 2003. Вып. 2. — С. 323–343.
2. Прокопович, В. П. Стабилизация полимеров различных классов пространственно-затрудненными аминами / В. П. Прокопович, И. А. Климовцова, Н. Р. Прокопчук // Выбранные научные работы БДУ. — Минск, 2001. — Т. 5. — С. 487–498.
3. Толкач, О. Я. Изменение энергии активации термоокислительной деструкции и структуры ПЭВД под действием УФ-света / О. Я. Толкач, Н. Р. Прокопчук, Л. М. Шостак // Химия и химическая технология: труды Белор. госуд. технологич. ун-та. Минск, 1998. — Вып. 6., сер. 3. — С. 41–47.
4. Печеный, Б. Г. Битумы и битумные композиции / Б. Г. Печеный. М.: Химия, 1990. С. 7, 8.
5. Sonibare, O. O. Thermo-oxidative reactions of Nigerian oil sand bitumen / O. O. Sonibare, R. Egashira, T. A. Adedosu // J. Thermochim. Acta-2003. — Vol. 405/2. — P. 195–205.
6. Yoshiki Karen, S. Kinetics of the thermo-oxidative and thermal cracking reactions of athabasca bitumen / S. Yoshiki Karen, R. Philips Colin // J. Fuel. — 1985. — Vol. 64/11. — P. 1591–1598.
7. Уэндланд, У. Термические методы анализа / У. Уэндланд. — М.: Мир, 1978. — С. 54–70.
8. Broido, A. A. Simple. Sensitive graphical method of treating thermogravimetric analysis data / A. A. Broido // J. Polym. Sci. — 1969. — Pt A-2. — Vol. 7. — № 10. — P. 1761–1773.
9. Кравченко, С. Е. Исследование устойчивости к термической и термоокислительной деструкции нефтяных битумов / С. Е. Кравченко, Н. В. Радьков, В. П. Прокопович, И. А. Климовцова // Строительная наука и техника. — 2007. — № 3(12). — С. 86–90.
10. Прокопович, В. П. Исследование долговечности исходных и стабилизированных нефтяных битумов различного группового состава / В. П. Прокопович [и др.] // Химические проблемы создания новых материалов и технологий: сб. статей. — 2008. — Вып. 3. — С. 467–483.
11. Прокопович, В. П. Исследование процессов стабилизации композиционных составов на основе нефтяных битумов / В. П. Прокопович, И. А. Климовцова, С. Е. Кравченко, Н. В. Радьков // Современные технологии, машины и материалы для зимнего содержания автомобильных дорог: тезисы докл. Междунар. науч.-технич. конф., г. Могилев, 13–15 февраля 2008 г. — Могилев, 2008. — С. 46, 47.

Статья поступила в редакцию 22.07.2009.