

УДК: 691.16; 699.82  
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/69.3  
EDN: EZLCXS



## Долговечность битумполимерных вяжущих и особенности строительных работ с ними

Д.А. Аюпов<sup>1</sup>, В.С. Хабибуллина<sup>1</sup>, З.Ф. Хайруллина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет,  
Казань, Российская Федерация

**Аннотация:** Актуальность работы обусловлена возрастающими объёмами применения модифицированных битумов, а также подверженностью атмосферному старению наиболее популярных битумных модификаторов – дивинилстирольных термоэластопластов. Цель исследования – провести сравнительную оценку долговечности битумных вяжущих с различными полимерными модификаторами.

Задачи:

1. Экспериментально получить зависимости показателя пенетрации битумполимерных вяжущих от времени воздействия на них температуры и влажного воздуха.
2. Построить кривые прогноза старения разработанных композиций.
3. Определить особенности работ при устройстве покрытий с применением битумполимерных вяжущих.

Изучена долговечность составов битумполимерных вяжущих, где в качестве модификаторов выступали: поверхностно-активное вещество Амдор-20Т, термоэластопласт стирол-бутадиен-стирол, эпоксидная смола ЭД-20, однослойные углеродные нанотрубки Tuball, сополимер этилена с винилацетатом (сэвилен), эпоксидированный силан, полиизоцианат МДИ, Лапрол 3603 и дикумилпероксид. Долговечность вяжущих оценивалась по методике, разработанной для полимерных материалов. Температуры искусственного старения вяжущих – 95-125 °С – были подобраны таким образом, чтобы максимально интенсифицировать процесс, однако сохранить механизм естественного старения при эксплуатации. Поскольку гидроизоляционные материалы зачастую эксплуатируются во влажных условиях, изотермическую выдержку образцов при указанных температурах осуществляли над раствором нитрита натрия, что обеспечивало 65%-ную влажность воздуха. Аппроксимацией квадратичными полиномами получены кривые зависимости твёрдости композиций от времени старения при указанных факторах воздействия, что позволило определить энергию активации для изменения пенетрации. С учётом эквивалентной температуры определено время воздействия факторов, достаточное для достижения композицией необходимой твёрдости, построены кривые прогноза. Выявлено, что поимерно-битумные вяжущие на основе «сшивающих» модификаторов – эпоксисилановых или изоцианатных – значительно более стойки к старению, чем традиционно широко применяемые композиции со стирол-бутадиен-стиролом, действие которого основано не на химической реакции а на растворении в битуме.

**Ключевые слова:** битум, старение битума, долговечность битума, старение полимербитумных вяжущих, старение модифицированных битумов, модификация битумов, полимербитумные вяжущие

**Для цитирования:** Аюпов Д.А., Хабибуллина В.С., Хайруллина З.Ф. Долговечность битумполимерных вяжущих и особенности строительных работ с ними // Известия КГАСУ, 2024, № 3(69), с. 27-37, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/69.3, EDN: EZLCXS

# Durability of bitumen polymer binders and features of construction work with them

D.A. Ayupov<sup>1</sup>, V.S. Khabibullina<sup>1</sup>, Z.F. Khairullina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

**Abstract:** The aim of the study is to conduct a comparative durability assessment of the bitumen binders with various polymer modifiers.

The tasks are:

1. to experimentally obtain the dependence of the temperature and humid air exposure time on bitumen-polymer binders penetration index.
2. to construct aging prediction curves for the developed compositions.
3. to determine the work features when constructing coatings using bitumen-polymer binders.

The relevance of the work is due to the increasing volumes of modified bitumen application, as well as the susceptibility to atmospheric aging of the most popular bitumen modifiers – thermoplastic elastomers of the styrene-butadiene-styrene type. In the research seven different bitumen polymer binders have been developed, where the following modifiers were used: surfactant Amdor-20T, SBS thermoplastic elastomer, epoxy resin ED-20, single-walled carbon nanotubes Tuball, ethylene-vinyl acetate copolymer (Seviline), epoxidized silane, MDI polyisocyanate, Laprol 3603 and dicumyl peroxide. Binder durability was assessed by the method developed for polymeric materials. The tests were carried out at elevated temperatures: 95, 105, 115 and 125 °C and 65% air humidity. The temperatures for artificial aging of binders were selected in such a way as to maximally intensify the process and to preserve the mechanism of natural aging during operation. Approximation by quadratic polynomials was used to obtain dependences of penetration change on the duration of aging under the specified factors of influence, which allowed us to determine the activation energy for changing penetration. Taking into account the equivalent temperature, the time of exposure to factors sufficient for the composition to achieve the required hardness was determined, and prediction curves were constructed. It was discovered that the most resistant to aging are binders obtained by chemical modification: with sevilen and epoxysilane, as well as bitumen-urethane, while the widely used compositions with styrene-butadiene-styrene turned out to be the most susceptible to aging.

**Keywords:** bitumen, bitumen aging, bitumen durability, polymer-modified binder aging, polymer-modified binder durability, bitumen modification, polymer-modified binder.

**For citation:** Ayupov D.A., Khabibullina V.S., Khairullina Z.F. Durability of bitumen polymer binders and features of construction work with them // News of KSUAE, 2024, № 3(69), p. 27-37, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/69.3, EDN: EZLCXS

## 1. Введение

Битум – органический строительный материал нефтяного происхождения, широко применяемый в качестве вяжущего в одной из наиболее материалоемких отраслей – дорожном строительстве [1], а также в производстве кровельных, гидроизоляционных, антикоррозионных и герметизирующих материалов. При этом именно вяжущим главным образом определяются основные свойства покрытия [2-3]. Битум обладает несомненными достоинствами: термопластичностью, вязкоупругими и адгезионными свойствами. Однако сочетание времени, температуры, влаги, кислорода и других сложных внешних факторов, а также внутренних факторов, таких как теплопроводность, теплоемкость, энергия активации, активные формы кислорода, объемные свойства и т. д., приводят к старению битума, вызывая повреждения покрытий, такие как растрескивание, и серьезно влияют на его общие характеристики [4-6].

Как и любой другой строительный материал, битум со временем теряет свои свойства. При старении его прочность повышается, увеличивается хрупкость, и, как

следствие, снижается трещиностойкость в зимний период [7]. Актуальным вопросом остаётся способ продления долговечности битумных вяжущих. Для увеличения стойкости к старению применяют различные способы, один из них – введение в вяжущие модифицирующих добавок [8]. Отметим также, что модифицированные битумы способны повышать долговечность асфальтобетонов [9-10], однако наиболее популярные модификаторы – термоэластопласты типа стирол-бутадиен-стирол (СБС) – в пределах вводимых концентраций способны лишь ограниченно растворяться в битумах, что не позволяет получать седиментационно-устойчивые вяжущие, способные к длительному горячему хранению или транспортировке. Кроме того, охлаждение модифицированных вяжущих приводит к их фазовому разделению. Получить седиментационно и агрегативно-устойчивые полимерно-битумные дисперсии можно применением стабилизаторов. Наиболее известным типом такого рода агентов являются поверхностно-активные вещества (ПАВ), однако возможно также введение наностабилизаторов либо реакционноспособных модификаторов. Роль последних заключается в образовании химических связей между частицами дисперсионной среды (битума) и дисперсной фазы (полимера) либо в иницировании образования сетчатых структур – гель-фракции – в дисперсионной среде. Ключевым фактором при этом является увеличение доли дисперсной фазы, что при достижении высокой ее концентрации влечет появление стерических затруднений седиментационных процессов. Система при этом является термодинамически расслоившейся, т.е. гетерофазной, однако физического расслоения не наблюдается. Достичь высокой концентрации дисперсной фазы можно и прямым введением повышенных концентраций полимерного модификатора, однако следствием этого является удорожание вяжущего. С этой точки зрения целесообразно применение модификаторов из числа отходов.

Гипотеза об устойчивости полимерно-битумных вяжущих с высоким содержанием дисперсной фазы подтверждается седиментационной стабильностью битумных мастик, представляющих собой наполненные битумы.

Необходимо также отметить, что ввиду полидисперсной структуры битумов полимерно-битумные вяжущие, строго говоря, нельзя рассматривать как двухфазные системы, однако зачастую такие вяжущие для удобства считают именно квазибинарными, что существенно упрощает интерпретацию протекающих с ними явлений, например позволяет использовать для таких систем правило фаз Гиббса, строить фазовые диаграммы и т.д.

Таким образом, данная работа является частью исследования по разработке нерасслаивающихся битумполимерных вяжущих, в рамках которого были получены семь композиций с различной седиментационной устойчивостью.

Цель исследования – провести сравнительную оценку долговечности битумных вяжущих с различными полимерными модификаторами.

Задачи:

1. Экспериментально получить зависимости пенетрации от времени старения.
2. Построить кривые прогноза старения разработанных композиций.
3. Определить особенности работ при устройстве покрытий с применением битумполимерных вяжущих.

## 2. Материалы и методы

Изучалась долговечность битумных вяжущих, содержащих следующие модификаторы:

1. СБС.
2. СБС + ПАВ Амдор-20Т.
3. СБС + однослойные углеродные нанотрубки (ОУНТ).
4. СБС + дикумилпероксид.
5. Диановая неотвержденная эпоксидная смола ЭД-20.
6. Сополимер этилена с винилацетатом (СЭВ), эпоксицирированный силан (ЭС).
7. Полиизоцианат МДИ, Лапрол 3603.

Долговечность битумных и полимерно-битумных композиций кровельного и дорожного назначения может быть оценена различными способами [11]. Сегодня вошли

в моду экспресс-методы, основанные на различных вариациях старения битума в тонких плёнках: методики RTFOT [12] и TFOT [13]. Однако они не подходят для определения долговечности вяжущих гидроизоляционного назначения по нескольким причинам: вяжущее в гидроизоляционных покрытиях не эксплуатируется в виде тонких пленок; температура испытаний в данных методиках – 163,5 °С – подразумевает интенсивную термодистилляцию, чего не происходит при эксплуатации; длительность испытания – 85 мин – достаточна лишь для сравнительной оценки вяжущих, но не для построения прогнозов их старения. В данной работе долговечность полученных полимерно-битумных композиций определялась по методике ГОСТ 9.707-81 «Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные. Методы ускоренных испытаний на климатическое старение». Методика предусматривает старение материала в эксплуатируемом виде, а не в тонкой плёнке, что делает ее более универсальной. Несмотря на то, что данный стандарт разработан с целью определения долговечности полимерных материалов, предложенная в нём методика не имеет противопоказаний для применения к битумным композициям.

Старение оценивалось по изменению твёрдости композиций, характеризуемой величиной показателя пенетрации. По данной характеристике определяется марка всех типов битумных и полимерно-битумных вяжущих.

Необходимое количество образцов  $N$  для каждой рецептуры композиций, обеспечивающее попадание среднеарифметической величины показателя пенетрации в доверительный интервал с вероятностью 70% с заданной ошибкой, вычисляли по формуле (1)

$$N \geq t^2 * \frac{\bar{v}^2}{\beta^2} \quad (1)$$

где  $t$  - критерий распределения нормированных отклонений в малой выборке, определяемый по таблице приложения 3 вышеуказанного ГОСТ. Для трёх образцов и выбранной доверительной вероятности  $t=1,34$ ;

$\beta$  - относительная ошибка определения среднеарифметической величины показателя пенетрации. В данной работе относительную ошибку считали равной 5% ( $\beta=5$ ).

$\bar{v}$  - среднеарифметическое значение коэффициента вариации отдельных значений пенетрации. Определялось по формуле (2):

$$v = \frac{S}{\bar{x}} * 100 \quad (2)$$

где  $S$  – среднеквадратическое отклонение,

$\bar{x}$  – среднее значение пенетрации в выборке.

Доверительный интервал значений показателя пенетрации определялся после каждого съёма образцов и их испытаний таким образом, чтобы средняя величина попадала в него с заданной вероятностью.

Старение осуществлялось при температурах: 95-125 °С с интервалом в 10 °С. Эти значения обусловлены необходимостью максимальной интенсификации процесса с сохранением механизма естественного старения при эксплуатации. Согласно [14], кровельный ковёр может нагреваться выше 70 °С, поэтому минимальная температурная граница, при которой осуществлялось старение, была выбрана выше этого значения с некоторым запасом. Выбранная верхняя граница при этом на 10 градусов ниже температуры фазовых или релаксационных переходов, то есть температуры плавления битума. В [15] методом ДТГ было показано, что при 138 °С существует эндозффект, характеризующий этот процесс. Для оценки поведения разработанных гидроизоляционных вяжущих во влажных условиях старение осуществлялось при 65%-ной влажности воздуха. Перед испытаниями вяжущие термостатировали при температуре 23±2°С, не меняя влажности воздуха.

Отметим, что ультрафиолетовое старение не опасно для битумных вяжущих по следующим причинам:

1. Молекулярная масса битумов значительно ниже, чем у полимеров. Поэтому основной механизм старения, связанный с деструкцией макромолекул, в случае с битумами не столь опасен.

2. Известно, что многие полимеры, имеющие в структуре своей молекулы ароматическое ядро, являются УФ-стойкими. Например, алифатический полиэтилен УФ-нестоек, а ароматический ПЭТФ – стоек. В битуме же ароматических структур – более 75%.

3. Глубина проникания УФ лучей в битум – не более 50 мкм, что намного меньше толщины гидроизоляционных материалов и покрытий.

По этим причинам старение битумов оценивают по показателям пенетрации, температуры размягчения или массы после прогрева, однако ни в одном из ГОСТов на битумы нет методики старения, основанной на УФ-воздействии, хотя нормативная база по битумной тематике обновляется регулярно.

Определение пенетрации проводили ежедневно. Если показатель пенетрации менялся существенно, испытание продолжалось. Существенность определялась сравнением выборок с учетом критериев Фишера и Стьюдента.

### 3. Результаты и обсуждение

Для каждого из составов и выбранных температур были экспериментально получены кривые зависимости пенетрации от времени старения вяжущих. На рисунке 1 показаны такие зависимости для битумного вяжущего, модифицированного эпоксидной смолой.

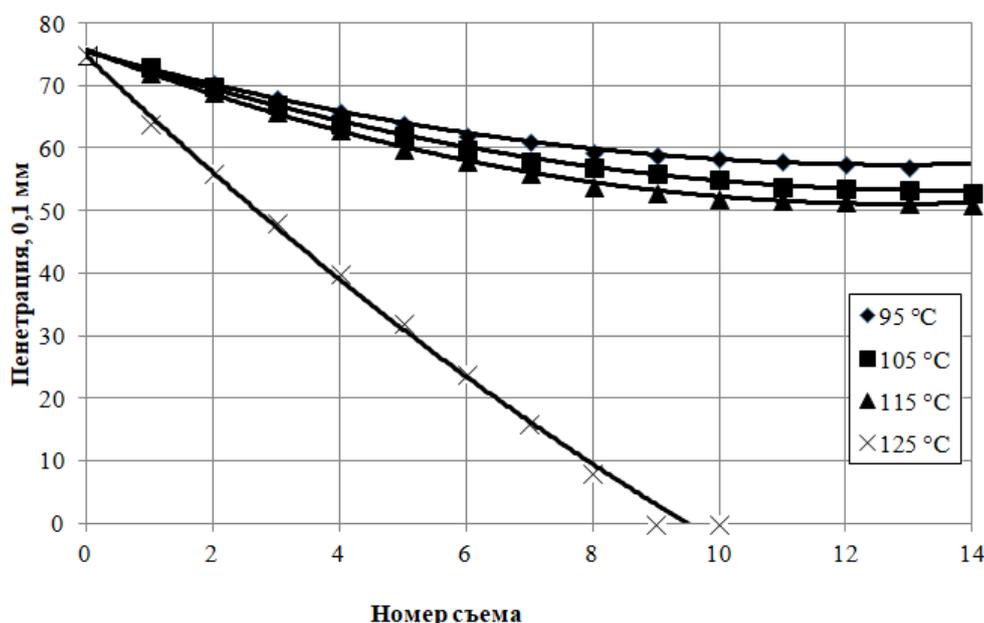


Рис.1 Изменение пенетрации от продолжительности старения состава Б+ЭД-20 (иллюстрация авторов)

Fig.1 Change in penetration from the duration of aging of the bitumen + Epoxy-diane resin ED-20 composition (illustration by the authors)

С увеличением продолжительности старения пенетрация вяжущих снижается, т.е. образцы становятся более твёрдыми. Очевидно, что интенсивность повышения твердости со временем падает, однако при 125 °C резко увеличивается скорость реакции эпоксигруппы с карбоксигруппой компонентов вяжущего, в связи с чем кривая резко падает.

Далее, по полученным зависимостям определяли продолжительность старения до пяти произвольных значений показателя пенетрации ( $X_1$ - $X_5$ ) (таблица 1).

Таблица 1  
Количество суток старения до достижения заданного значения пенетрации  
(состав Б+ЭД-20)

Пенетрация	Температура			
	95	105	115	125
X <sub>1</sub> = 69	2.5	2.2	1.8	0.6
X <sub>2</sub> = 66	3.9	3.2	2.8	0.9
X <sub>3</sub> = 63	5.6	4.6	3.9	1.2
X <sub>4</sub> = 60	7.9	6.1	5.1	1.6
X <sub>5</sub> = 57	13	8	6.5	1.9

Для каждого значения пенетрации из таблицы X<sub>i</sub> и каждой пары соответствующих температур определяли энергию активации E<sub>i</sub>, кДж/моль, по формуле (8)

$$E_i = R \frac{T_j * T_{j+1}}{T_{j+1} - T_j} \ln \frac{\tau_{T_j}}{\tau_{T_{j+1}}}, \quad (8)$$

где T<sub>j</sub> и T<sub>j+1</sub> - температуры испытаний, К; j=1-4;

τ<sub>T<sub>j</sub></sub>, τ<sub>T<sub>j+1</sub></sub> - количество дней до достижения заданного значения пенетрации при температурах T<sub>j</sub> и T<sub>j+1</sub> соответственно (таблица 2).

Таблица 2

Рассчитанные энергии активации (состав Б+ЭД 20)

Пенетрация		E, Дж/моль	Пара температур, °С
для X <sub>1</sub>	E1	14784.07	95-105
	E2	24469.07	105-115
	E3	141048.8	115-125
для X <sub>2</sub>	E1	22878.76	95-105
	E2	16282.34	105-115
	E3	145717.9	115-125
для X <sub>3</sub>	E1	22749.76	95-105
	E2	20129.24	105-115
	E3	151325.3	115-125
для X <sub>4</sub>	E1	29904.36	95-105
	E2	21832.51	105-115
	E3	148832.2	115-125
для X <sub>5</sub>	E1	56149.5	95-105
	E2	25318.81	105-115
	E3	157910.7	115-125

Затем строили зависимость lnτ = f(1/T) и аппроксимировали функцию уравнением прямой, после чего строили график (рисунок 2).

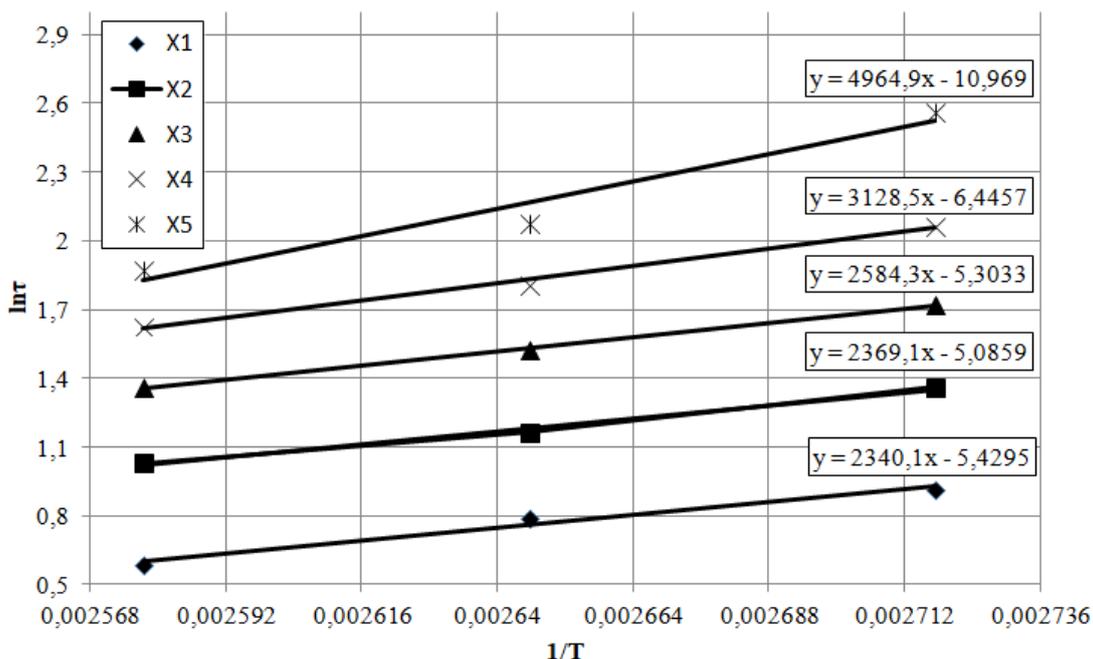


Рис.2 Зависимость вида  $\ln\tau = f(1/T)$  для определения  $tg\alpha$  (иллюстрация авторов)  
 Fig.2 Dependency type  $\ln\tau = f(1/T)$  for  $tg\alpha$  determination (illustration by the authors)

Далее определяли энергию активации  $E_j$  для каждой пенетрации по формуле (9)  
 $E_j = R * tg\alpha$  (9),

где за  $tg\alpha$  принимали коэффициент при  $x$  в уравнении прямой.

Затем определяли среднюю энергию активации  $E_{cp}$  и с учётом климатической зоны по приложению 5 ГОСТ 7.907 определяли эквивалентную температуру  $T_э$ . Реальное время старения вяжущего до заданной пенетрации вычисляли по уравнению Аррениуса (10).

$$\tau_{X_i T_э} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \tau_j T_j \exp \frac{E_{cp}}{R} \left( \frac{1}{T_э} - \frac{1}{T_j} \right) \quad (10)$$

Величину остаточной пенетрации  $\alpha_i$  определяли по формуле (11)

$$\alpha_i = \frac{X_i}{X_0}, \quad (11)$$

где  $X_0$  – начальная величина пенетрации;

$X_i$  – заданное значение пенетрации.

Для создания запаса времени старения рассчитанное время старения делили на 1,5.

Получившиеся результаты определения долговечности вяжущих приведены в таблице 3.

Таблица 3

Время старения вяжущего Б+ЭД-20 до заданной пенетрации

П <sub>нач</sub>	П <sub>1-П<sub>5</sub></sub>	дней до	$\tau$ , дней	$\tau$ , лет	$\alpha_i$	$\tau/1.5$
75	69	X1	16650.09	45.61669	0.92	30.41113
75	66	X2	25299.21	69.3129	0.88	46.2086
75	63	X3	35664.37	97.71059	0.84	65.14039
75	60	X4	47954.48	131.3821	0.8	87.58809
75	57	X5	66289.41	181.6148	0.76	121.0766

Далее строились кривые прогноза старения – функции вида  $\alpha_i=f(\tau/1.5)$  (рис. 3).

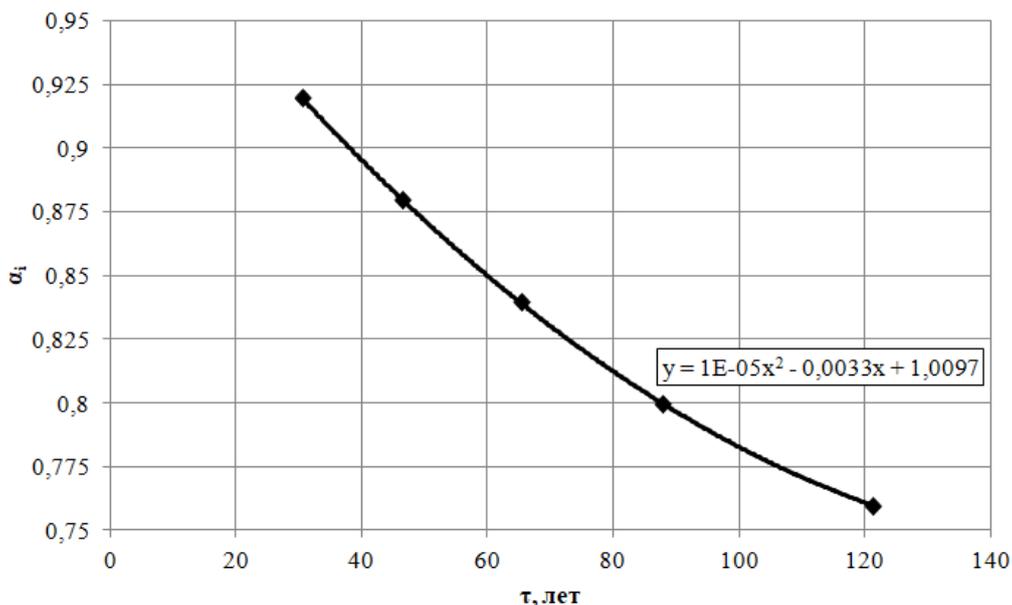


Рис.3 Кривая прогноза старения вяжущего Б+ЭД-20 (иллюстрация авторов)  
 Fig.3 Curve of aging forecast of binder bitumen + Epoxy-diane resin ED-20 (illustration by the authors)

Полученная кривая позволяет определить сохранность показателя пенетрации во времени. Например, через 30 лет пенетрация вяжущего сохранится на 92% (α<sub>i</sub> = 0,92), а через 60 лет

Аналогичные кривые строились для других вяжущих. Сравнительную оценку долговечности разработанных композиций можно провести по данным рисунка 4.

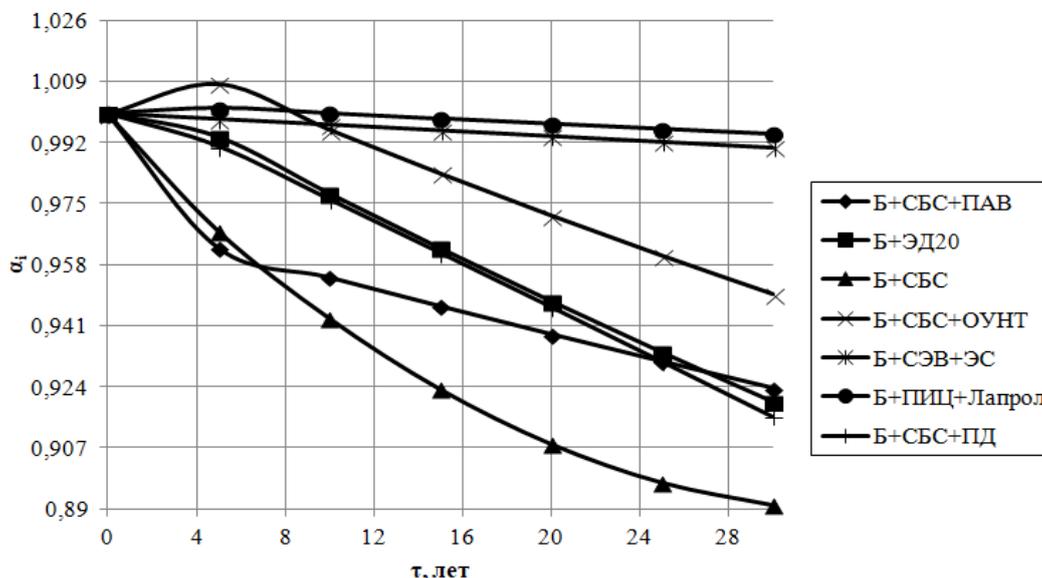


Рис.4 Кривые прогноза старения разработанных вяжущих (иллюстрация авторов)  
 Fig.4 Curves of the aging forecast of the developed binders (illustration by the authors)

Результаты исследования показали, что химические модификаторы – сополимер этилена с винилацетатом с эпоксицированным силаном, а также изоцианаты – эффективно повышают стойкость битумных вяжущих к старению. Битумы, модифицированные СБС, применяемые повсеместно, наиболее подвержены старению. Данные результаты коррелируют с результатами, полученными в [16-17], где СБС-модифицированные вяжущие интенсивно стареют даже при кратковременных нагрузках в аппаратах RTFOT и TFOT. Это объясняется наличием кратных связей в бутадиеновых звеньях основной цепи молекул СБС-модификатора. Результаты, полученные другими авторами, показывают при этом, что в сравнении с чистым битумом полимерно-битумные вяжущие на СБС являются существенно более стойкими к старению. Причём

это справедливо как на окисленных битумах, так и на вяжущих, полученных компаундированием сырья [18]. Эффективность «сшивающих» модификаторов подтверждается в [19], где реакции изоцианатов с карбоксильными и гидроксильными группами приводят к образованию сетчатых структур в битумном вяжущем и восстановлению состаренных композиций.

Технология выполнения работ по устройству гидроизоляционных покрытий на основе предложенных вяжущих имеет ряд особенностей по сравнению с применением материалов на основе немодифицированных битумов. Высокая вязкость и твердость битумполимерных вяжущих вынуждают производителей работ использовать более высокие температуры при укладке. При этом необходимо учитывать возрастающую интенсивность механизмов старения: термодистилляции и термоокисления. Кроме того, повышенные температуры способны привести к деструкции полимерных модификаторов. В особенности это касается вяжущих, содержащих сетчатые структуры. Поэтому необходимо максимально сокращать время горячего цикла. Идеальным вариантом является применение холодных технологий укладки, основанных на водных системах или вяжущих с растворителями.

#### 4. Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Экспериментально полученные зависимости пенетрации вяжущих от времени старения показали возрастание интенсивности снижения пенетрации при увеличении температуры старения. Для определения стойкости к старению вяжущих кровельного назначения подходит интервал температур 95-125 °С.

2. Построенные кривые прогноза старения разработанных композиций иллюстрируют более высокую долговечность битумов, модифицированных реакционноспособными полимерами, чем традиционных полимербитумных вяжущих.

3. При укладке гидроизоляционных материалов на основе модифицированных вяжущих в связи с необходимостью применения более высоких температур для предотвращения интенсивного старения важным является сокращение времени горячего цикла работ.

#### Список литературы:

1. Garipov A., Makarov D., Khozin V., Stepanov S., Ayupov D. Cement concrete modified by fine-dispersed anionactive bitumen emulsion for road construction // In collection: IOP CONFERENCE SERIES. Materials Science and Engineering 890. Kazan, Russia, 2020. 012107.
2. Буланов П.Е., Мавлиев Л.Ф., Вдовин Е.А., Баранов В.А. Влияние эластомера на динамическую вязкость полимерно-битумных вяжущих: сб. ст. Транспорт и логистика устойчивого развития территорий, бизнеса, государства (драйверы роста, тренды и барьеры). Материалы II Международной научно-практической конференции. Москва, 2023. С. 49-51 [Bulanov P.E., Mavliev L.F., Vdovin E.A., Baranov V.A. The influence of elastomer on the polymer-bitumen binders dynamic viscosity // In collection: Transport and logistics of sustainable development of territories, business, state (growth drivers, trends and barriers). Materials of the II International Scientific and Practical Conference. Moscow, 2023. P. 49-51].
3. Брызгалов Н.И., Кемалов А.Ф. Особенности системы объемного проектирования асфальтобетонной смеси по технологии Superpave и определение марки PG битумного вяжущего // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2023. Т. 20. № 2 (90). С. 278-290. [Bryzgalov N.I., Kemalov A.F. Features of the volumetric design system for asphalt concrete mixture using Superpave technology and determination of the PG grade of bitumen binder // Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway University. 2023. Vol. 20. No. 2 (90). P. 278-290].
4. Alae M., Zhao Y., Leng Z. Effects of ageing, temperature and frequency-dependent properties of asphalt concrete on top-down cracking // Road Mater Pav Design, 22 (10) (2021), P. 2289-2309.

5. Omairey E.L., Zhang Y., Soenen H., Carbonneau X. Parametric analysis and field validations of oxidative ageing in asphalt pavements using multiphysics modelling approaches // *Int J Pavement Eng* (2022), P. 1-24.
6. Omairey E.L., Gu F., Zhang Y. An equation-based multiphysics modelling framework for oxidative ageing of asphalt pavements // *J Cleaner Prod*, 280 (2021), Article 124401.
7. Yongping Hu, Wei Si, Xingxiang Kang, Yu Xue, Haopeng Wang, Tony Parry, Gordon Dan Airey. Multiscale evaluation of bitumen ageing behavior // *Fuel*, Volume 326 (2022), 125045.
8. Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д., Мокшин Р.И. Применение электронного парамагнитного резонанса для исследования процессов старения органического вяжущего в дисперсно-армированных основаниях дорожных одежд // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2021. Т. 23. № 6. С. 179-189. [Lukashevich V.N., Lukashevich O.D., Mokshin R.I. Application of electron paramagnetic resonance to study the aging processes of organic binder in dispersed-reinforced road pavement bases // *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2021. Vol. 23. No 6. P. 179-189].
9. Ji T, Hao P, She H, Yang K, Li H, Wang D, Kang R and Liu J (2023), Durability behavior of asphalt mixtures in regard to material properties and gradation type. *Front. Mater.* 10:1151479.
10. Onishchenko A., Stolyarova L., Bieliatynskiy A. Evaluation of the durability of asphalt concrete on polymer modified bitumen // *E3S Web of Conferences* 157. 2020. 06005.
11. Симчук Е.Н., Харпаев А.В., Рожков И.М. Современные подходы к моделированию старения битумных вяжущих материалов в лабораторных условиях // *Дороги и мосты*. 2022. № 2 (48). С. 274-306. [Simchuk E.N., Kharpaev A.V., Rozhkov I.M. Modern approaches to modeling the aging of bitumen binders in laboratory conditions // *Roads and Bridges*. 2022. No. 2 (48). P. 274-306].
12. Abele, A., Merijs-Meri, R., Berzina, R. Effect of bio-oil on rheological and calorimetric properties of RTFOT aged bituminous compositions // *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2021. Vol. 14. P. 537–542.
13. Mansour A.S., Ghaly N.F., Eldidamony A.M., Nessim M.I., Mohamed M.G. Improving the aging effect of bitumen and SBS-modified bitumen by using newly prepared antioxidants // *Egyptian Journal of Chemistry*. 2020. Vol. 63. № 6. P. 2213-2233.
14. Воронин, А.М. Орлов Ю.Н. Факторы, влияющие на температуру поверхности плоских кровель. // *Стройпрофиль*, 2008. №5. [Voronin, A.M. Orlov Y.N. Factors affecting the surface temperature of flat roofs. // *Stroyprofil*, 2008. No. 5.]
15. Кеменев, Н.В. Изучение термостабильности модифицированных отходами растительных полимеров нефтебитумов методом комплексного термического анализа // *Молодёжь и наука: Сборник материалов VI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных*. Красноярск, Сибирский федеральный ун-т, 2011. [Kemenev, N.V. Study of the thermal stability of petroleum bitumen modified by plant polymer waste using the method of complex thermal analysis // *Youth and science: Collection of materials of the VI All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2011].
16. Глазунов И.И., Кошкарев К.С., Курасов А.Н. Восстановление свойств полимерно-битумных вяжущих : сб. трудов Международной научно-практической конференции: в 2 ч - Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса / Волгоградский государственный технический университет. Волгоград, 2021. С. 166-173. [Glazunov I.I., Koshkarev K.S., Kurasov A.N. Restoration of the properties of polymer-bitumen binders: collection of works of the International scientific and practical conference: in 2 parts - Actual problems and prospects for the development of the construction complex / *Volgograd State Technical University*. Volgograd, 2021. P. 166-173.]
17. Ядыкина В.В., Денисов В.П., Акимов А.Е. Старение битума, модифицированного полимерно-битумным концентратом // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2022. № 1 (757). С. 22-30. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-757-1-22-

30. [Yadykina V.V., Denisov V.P., Akimov A.E. Aging of bitumen modified with polymer-bitumen concentrate // News of higher educational institutions. Construction. 2022. No. 1 (757). P. 22-30. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-757-1-22-30.]
18. Высоцкая М.А., Шеховцова С.Ю., Обухов А.Г., Есипова Ю.Ю. Устойчивость модифицированных вяжущих на основе окисленных и остаточных битумов к термодеструкции // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2017. № 6 (58). С. 140-147. [Vysotskaya M.A., Shekhovtsova S.Yu., Obukhov A.G., Esipova Yu.Yu. Resistance of modified binders based on oxidized and residual bitumen to thermal degradation // Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway University. 2017. No. 6 (58). P. 140-147.]
19. Cao Z., Huang X., Yu J., Han X., Wang R., Li Y. Study on all-components regeneration of ultraviolet aged SBS modified asphalt for high-performance recycling // Journal of Cleaner Production. 2020. 276. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123376.

#### Информация об авторах

**Аюпов Дамир Алиевич**, доцент, кандидат технических наук, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: Ayupov\_Damir@rambler.ru, ORCID: 0000-0002-4145-5250

**Хабибуллина Вера Сергеевна**, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: khabibullina.vera.2003@mail.ru

**Хайруллина Зарина Фанисовна**, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: zarinakhairullina@mail.ru

#### Information about the authors

**Damir A. Ayupov**, associate professor, candidate of technical sciences, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: Ayupov\_Damir@rambler.ru, ORCID: 0000-0002-4145-5250

**Vera S. Khabibullina**, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: khabibullina.vera.2003@mail.ru

**Zarina F. Khairullina**, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: zarinakhairullina@mail.ru