

ВЛИЯНИЕ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПРИ ПЕНЕТРАЦИИ БИТУМНЫХ КОМПОЗИТОВ

В. П. Ярцев, В. М. Данилов✉

*Кафедра «Конструкции зданий и сооружений», vt.danilov1997@gmail.com,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: битум; долговечность; композит; пенетрация; термофлуктуационные константы.

Аннотация: Представлены результаты экспериментальных исследований на прочность и долговечность при пенетрации битумных композитов, полученных путем введения в битум марки БН 90/10 отходов керамзита и отходов деревообрабатывающей промышленности. Доказано, что для повышения долговечности битума возможно создание битумных композиций, путем введения утилизируемых техногенных отходов, в частности, отходов керамзита и древесной промышленности.

Введение

В связи с суровым и переменчивым климатом России крайне важно использовать строительные материалы, способные противостоять агрессивным природным факторам. Внедрение климатически устойчивых материалов помогает существенно экономить на обслуживании сооружений, делает их более энергоэффективными и экологичными [1].

Среди строительных материалов битум прочно удерживает первые позиции благодаря своим уникальным свойствам. Главная функция этого материала – создание надежного влагозащитного слоя. После его нанесения образуется прочный барьер, который эффективно защищает конструкции от проникновения влаги. Битум широко применяется на всех этапах строительства: от закладки фундамента до устройства кровли, а также при строительстве дорог [2, 3].

Ученые активно исследуют свойства битума и пытаются улучшить его характеристики [4, 5]. Российские специалисты добились значительных успехов в использовании нового сырья для производства битума и создании добавок, которые оптимизируют его свойства [6 – 10].

Традиционно используемый для гидроизоляции крыш битум имеет ограниченный срок службы из-за воздействия различных природных и механических факторов. Чтобы улучшить его характеристики, предлагается технология создания композитных битумных материалов с добавлением промышленных отходов. В частности, исследуется возможность использования керамзитовых и древесных отходов местного производства. Этот подход не только улучшает качество битума, но и помогает решить проблему утилизации производственных отходов.

Для оценки долговременной прочности и износостойкости материалов исследование опирается на термофлуктуационную концепцию, позволяющую комплексно учитывать влияние температуры, временных факторов, нагрузок и атмосферных воздействий.

Методология проведения исследования

Рассматривался битумный композит на основе строительного битума БН 90/10, соответствующего ГОСТ 6617–76. В рамках работы изучались различные наполнители для композита:

- керамзитовые отходы разных фракций (от 0 до 2,5 мм) в количестве 20, 30 и 50 массовых частей (масс. ч.);
- древесная стружка размером 5...10 мм (10 масс. ч.);
- древесная мука в объеме 10 и 20 масс. ч.

Для подготовки образцов сначала осуществляли обезвоживание битума. Для этого пробу помещали в чашу, расположенную на песчаной бане в сушильном шкафу. Материал нагревали до текучего состояния в температурном диапазоне 120...180 °С, причем конкретная температура зависела от исходной вязкости битума. После расплавления битум пропускали через мелкое сито с ячейками 0,6...0,8 мм и тщательно перемешивали для удаления воздушных пузырьков. На следующем этапе в расплавленную массу постепенно добавляли наполнитель в требуемой пропорции. Смесь тщательно перемешивали до получения однородной консистенции. Готовая смесь заливалась в формы, предварительно смазанные глицерином. Образцы оставляли затвердевать на 24 ч, что позволяло избежать усадочных деформаций.

Для испытаний использовали образцы в виде полос размерами 60×30×10 мм. Для определения температуры размягчения брали стандартный прибор «кольцо и шар» в соответствии с ГОСТ 11506–73. В процессе испытаний проводили два измерения, после чего рассчитывали среднее арифметическое полученных значений, которое и принимали за окончательную температуру размягчения материала.

Наиболее опасным видом механического нагружения, приводящего к разрушению битумного покрытия, является пенетрация. Исследование пенетрации (глубины проникновения твердого тела) проводили на пенетрометре с соблюдением норм ГОСТ 11501–78. В ходе испытаний измеряли глубину, на которую проникала игла в битумную массу под действием силы в 1 Н за 5 с при комнатной температуре (25 °С). Затем полученные данные конвертировали в градусы пенетрации, где каждый градус равнялся 0,1 мл проникновения иглы. Для комплексной оценки свойств вязких битумов применяли особый показатель – индекс пенетрации (**ИП**), который отражал коллоидные свойства материала и его отклонение от идеального вязкого состояния. Расчет данного параметра выполняли по установленной эмпирической формуле

$$0,02 \frac{20 - \text{ИП}}{10 + \text{ИП}} = \frac{\lg 800 - \lg \Pi}{t_p - 25}, \quad (1)$$

где Π – пенетрация по Ричардсону при 25 °С; t_p – температура размягчения по КиШ, °С.

Известно, что для полимеров и других композитных материалов резко проявляется температурно-временная зависимость прочности, то есть действие трех параметров – температуры, нагрузки и времени – качественно одинаково. В ходе испытаний на пенетрацию построены кинетические кривые, отражающие зависи-

мость деформации (глубины погружения индентора) от времени. Полученные данные подчиняются уравнению Аррениуса

$$v = v_0 \exp\left(-\frac{U}{RT}\right), \quad (2)$$

где U – температурно-силовой фактор; v_0 – начальная скорость.

При проведении исследований для каждой температурной величины использовали минимум три различных уровня нагрузки. В процессе испытаний, при неизменных показателях температуры и нагрузки, анализировали от трех до шести образцов для получения одной контрольной точки в соответствии с методикой, представленной в [11].

Результаты проведенного исследования

Среди основных параметров, определяющих марку битума, особое место занимает показатель пенетрации – глубина проникновения иглы в материал. Полученные в ходе исследования данные демонстрирует следующую закономерность: в композициях с керамзитовым наполнителем, где размер частиц составляет менее 0,315 мм и от 0,315 до 0,63 мм, отмечается снижение показателя пенетрации (табл. 1). Однако при возрастании дисперсности наполнителя происходит противоположный процесс – увеличивается глубина проникновения стандартной иглы в битумную массу. При введении древесных отходов наблюдается уменьшение значения пенетрации, что объясняется наличием крупных структурных включений.

Индекс пенетрации, рассчитываемый на основании ее показателей, служит индикатором коллоидной структуры битума и позволяет определить, насколько его свойства отклоняются от типичного вязкого поведения материала.

Рассматриваемый битум марки БН 90/10 представляет собой окисленный битум с повышенной растяжимостью. Материалы данной категории (с ИП более + 2) отличаются высокой эластичностью и отчетливо выраженными коллоидными характеристиками, свойственными гелеобразным системам. Характеристики битумных композитов приведены в табл. 2.

При анализе влияния добавления наполнителей в битумные композиции можно отметить положительную динамику: с ростом концентрации добавок увеличивается ИП, что указывает на улучшение свойств материала.

Таблица 1

Показатели пенетрации для битумных композитов

Количество наполнителя, масс. ч.	Пенетрация					
	Виды наполнителя					
	Древесные отходы		Отходы керамзита, мм			
	Стружка	Мука	<0,315	0,315...0,63	0,63...1,25	1,25...2,5
0	12,3					
10	4,3	5,3	–			
20	–	5,7	11	15,7	16,4	16
30	–				13,0	14,0
50	–	–	7,22	9,25	13	14,3

Таблица 2

Характеристики битумных композитов

Вид наполнителя	Количество, масс.ч.	T , (по КиШ), °С	Пенетрация, 0,1 мм	ИП	$t_{х.р}$, °С
Без наполнителя	0	90	10	2,1	-34,7
Керамзитовая крошка (0...2,5 мм)	20	88	16	3,5	-42,5
	30	90	14	3,4	-43,8
	50	95	14,3	3,8	-51,6
Древесная мука	10	87	5,3	1,5	-27,5
	20	92	5,7	2,0	-36,0
Древесная стружка	10	85	4,3	1,0	-22,0

Однако стоит учитывать, что использование индекса пенетрации для оценки композиций имеет определенные ограничения, так как данный показатель в первую очередь предназначен для характеристики чистых битумных составов.

Среди ключевых параметров качества битумов особое место занимает интервал пластичности ($t_p - t_{х.р}$), определяющий температурный диапазон, в котором материал сохраняет пластичные свойства. Количественная взаимосвязь между этим интервалом и индексом пенетрации может быть представлена соответствующей формулой:

$$t_p - t_{х.р} = 7(10 - \text{ИП}), \quad (3)$$

где $t_{х.р}$ – температура хрупкого размягчения.

Экспериментальные результаты длительной пенетрации приведены на рис. 1, 2.

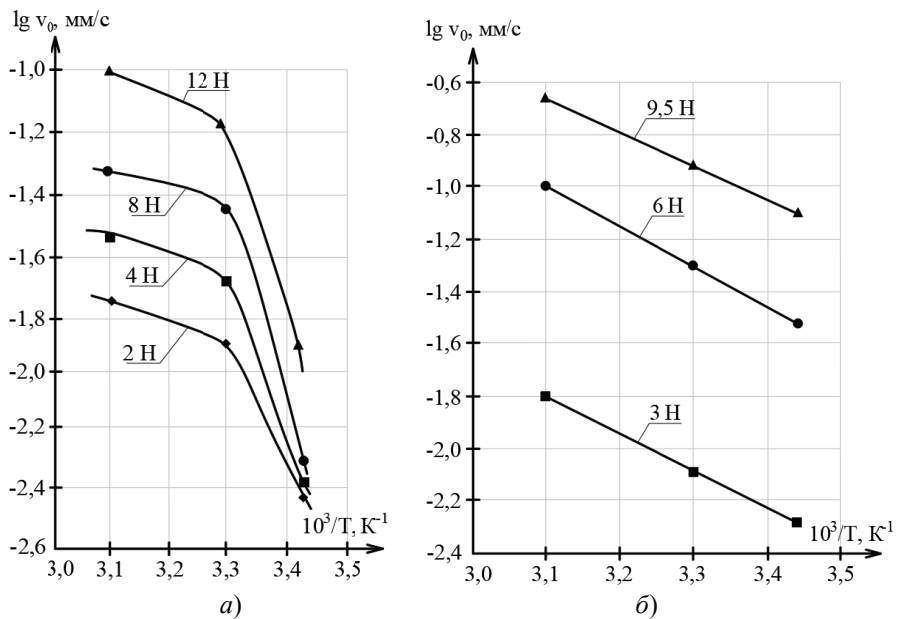


Рис. 1. Зависимости логарифма начальной скорости от обратной температуры при пенетрации битума БН 90/10:

a – без наполнителей; *б* – наполненного 10 масс. ч. древесной муки

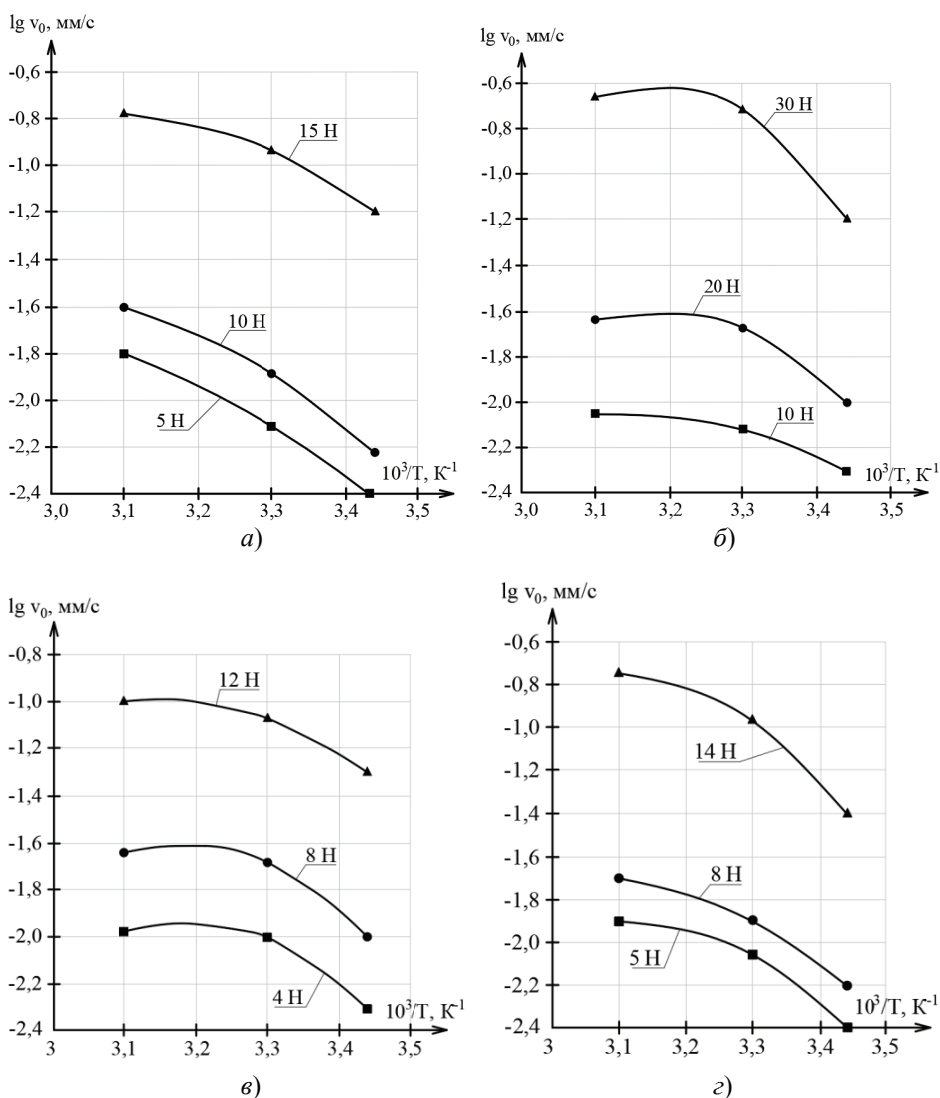


Рис. 2. Зависимости логарифма начальной скорости от обратной температуры при пенетрации битума БН 90/10, наполненного отходами керамзита с размерами частиц $a, б - 0...0,315$ и $в, з - 1,25...2,5$ в количестве: $a, в - 20$ масс. ч.; $б, з - 50$ масс. ч.

Анализ графиков показывает, что зависимости в координатах $\lg v_0 - 10^3/T$ демонстрируют сложную природу. Для чистого битума наблюдается нелинейный характер кривых с тенденцией к сходимости в температурном диапазоне $20...30^\circ C$. Модифицированные композиции также характеризуются нелинейными зависимостями в указанных координатах, но проявляют тенденцию к параллельному расположению кривых.

На рисунке 3 приведены энергии активации для всех исследуемых композиций. В таблице 3 показаны значения констант при пенетрации. Согласно данным наблюдается тенденция к росту энергии активации при введении и увеличении содержания наполнителей в обоих температурных интервалах: $20...30^\circ C$ и $30...50^\circ C$.

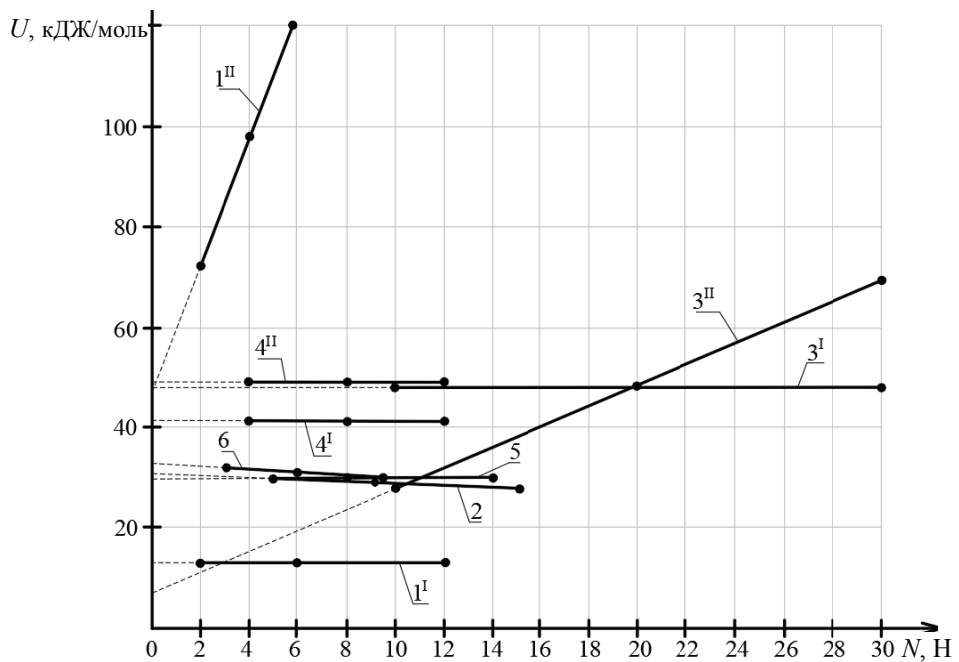


Рис. 3. Зависимости энергии активации от нагрузки при пенетрации битума БН 90/10: I^I, I^{II} – без наполнителей соответственно для участков I и II; 2 – наполненного 20 масс. ч. отходов керамзита (0...0,315); $3^I, 3^{II}$ – наполненного 50 масс. ч. отходов керамзита (0...0,315) соответственно для участков I и II; $4^I, 4^{II}$ – наполненного 20 масс. ч. отходов керамзита (1,25...2,5) соответственно для участков I и II; 5 – наполненного 50 масс. ч. отходов керамзита (1,25...2,5); 6 – наполненного 10 масс. ч. древесной муки

Таблица 3

Значение констант при пенетрации

Вид наполнителя		Количество, масс. ч.	Термофлуктуационные константы				
			$V_{m(ТВ)},$ мм/с	T_m, K	$U_0,$ кДж/моль	$\gamma, \text{кДж} \cdot$ $(\text{моль} \cdot \text{Н})^{-1}$	β
Без наполнителя		0	$-/10^{-2,72}$	$-/283$	13/47	12,17	$10^{-1,7}/-$
Отходы керамзита, мм	0...0,315	20	-		31	-	$10^{-1,7}$
		50			48/7		$10^{-1,7}/10^{-0,8}$
	1,25...2,5	20			42/49		$10^{-1,15}/10^{0,1}$
		50			29		$10^{-1,7}$
Древесная мука		10			33		$10^{-1,7}$

В графах числитель/знаменатель: числитель – участок I (30...50 °С), знаменатель – участок II (20...30 °С).

Экспериментальные данные демонстрируют, что ключевым процессом при проникновении иглы в битум и его композитов является деформация. Такое поведение объясняется тем, что в условиях эксплуатации при положительных температурах эти составы находятся в пластичном состоянии.

Заключение

Исследования показали, что добавление модифицирующих компонентов приводит к существенному росту температуры хрупкости битумных композиций. Расширение интервала пластичности в результате модификации обеспечивает битумам улучшенные эксплуатационные характеристики: они становятся более устойчивыми к образованию трещин в холодное время и лучше сопротивляются сдвиговым деформациям при высоких температурах, что значительно повышает их надежность в различных температурных условиях. Длительные эксперименты на пенетрацию показали, что в сравнении с термофлуктуационными закономерностями для чистого битума БН 90/10, для битумных композитов они претерпели изменения. Так, если для чистого битума ранее не наблюдалась линейная зависимость графика, то для битумных композитов данные зависимости стали более линейными.

В результате проведенного исследования доказано, что для повышения долговечности битума возможно создание битумных композиций, путем введения утилизируемых техногенных отходов, в частности, отходов керамзита и древесной промышленности.

Список литературы

1. Барабанщиков, Ю. Г. Строительные материалы и изделия: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / Ю. Г. Барабанщиков. – 5-е изд., стер. – М. : Академия, 2014. – 416 с.
2. Горшенина, Г. И. Полимербитумные изоляционные материалы / Г. И. Горшенина, Н. В. Михайлов. – М.: Недра, 1967. – 210 с.
3. Гун, Р. Б. Нефтяные битумы / Р. Б. Гун. – М.: Химия, 1973. – 343 с.
4. Bitumen and Bitumen Modification: A Review on Latest Advances / M. Porto, P. Caputo, V. Loise, S. Eskandarsefat, B. Teltayev, C. O. Rossi // MDPI. – 2019. – Vol. 9(4).
5. Zhu, J. Polymer modification of bitumen: Advances and challenges / J. Zhu, V. Birgisson, N. Kringos // European Polymer Journal. – 2014. – Vol. 58. – P. 18 – 38.
6. Абдуллин, А. И. Использование технического углерода в качестве добавки к дорожным битумам / А. И. Абдуллин, Е. А. Емельянычева // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, № 2. – С. 275 – 278.
7. Гурова, Е. В. Долговечность композиций на основе битума марки БН-90/10 / Е. В. Гурова, В. П. Ярцев // Композиционные строительные материалы. Теория и практика : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза, 2002. – С. 106 – 109.
8. Влияние дробленной резиновой крошки на свойства битума / Г. Н. Нурмадов, Р. Х. Сайрахмонов, М. С. Пирумшохи, Х. К. Бобоев // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2019. – № 2 (46). – С. 135 – 138.
9. Оценка влияния добавки к гудрону на свойства битума / М. Р. Попов, Е. А. Чернышева, А. В. Зуйков, Ю. В. Кожевникова // Мир нефтепродуктов. – 2024. – № 3. – С. 42 – 47.
10. Опыт модификации битумного вяжущего кожевенными отходами / В. П. Ярцев, С. А. Мамонтов, К. О. Сучков, И. Г. Сучкова // Эксперт: теория и практика. – 2023. – № 1(20). – С. 163 – 166.
11. Ярцев, В. П. Прогнозирование поведения строительных материалов при неблагоприятных условиях эксплуатации : учеб. пособие / В. П. Ярцев, О. А. Киселева. – Тамбов : Изд-во Тамбовского государственного технического университета, 2009. – 124 с.

The Effect of Fillers on the Strength and Durability of Penetration of Bituminous Composites

V. P. Yartsev, V. M. Danilov✉

Department of Construction of Buildings and Structures,
vm.danilov1997@gmail.com, TSTU, Tambov, Russia

Keywords: bitumen; durability; composite; penetration; thermal fluctuation constants.

Abstract: The article presents the results of experimental studies on the strength and durability of penetration of bituminous composites obtained by incorporating expanded clay and wood industry waste into BN 90/10 bitumen. It has been demonstrated that bitumen composites can be created by incorporating recycled man-made waste, specifically expanded clay and wood industry waste, to increase the durability of bitumen.

References

1. Barabanshnikov Yu.G. *Stroitel'nyye materialy i izdeliya: uchebnik dlya stud. uchrezhdeniy sred. prof. obrazovaniya* [Building materials and products: a textbook for the studio. institutions. Prof. education], Moscow: Akademiya, 2014, 416 p. (In Russ.)
2. Gorshenina G.I., Mixajlov N.V. *Polimerbitumnyye izolyatsionnyye materialy* [Polymer-Bitumen Insulating Materials], Moscow: Nedra, 1967, 210 p. (In Russ.)
3. Gun R.B. *Neftyanyye bitumy* [Petroleum Bitumens], Moscow: Himiya, 1973, 343 p. (In Russ.)
4. Porto M., Caputo P., Loise V., Eskandarsefat S., Teltayev B., Rossi C.O. Bitumen and Bitumen Modification: A Review on Latest Advances, *MDPI*, 2019, vol. 9(4).
5. Zhu J., Birgisson B., Kringos N. Polymer modification of bitumen: Advances and challenges, *European Polymer Journal*, 2014, vol.58, pp. 18-38.
6. Abdullin A.I., Yemel'yanycheva Ye.A. [Use of carbon black as an additive to road bitumen], *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2014, vol. 17, no. 2, pp. 275-278. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Gurova Ye.V., Yartsev V.P. *Kompozitsionnyye stroitel'nyye materialy. Teoriya i praktika: sb. nauch. tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Composite building materials. Theory and practice: Coll. of scientific papers of the Int. scientific and practical conf], Penza, 2002, pp. 106-109. (In Russ.)
8. Nurmadv G.N., Sayrakhmonov R.Kh., Pirumshokhi M.S., Boboyev Kh.K. [The influence of crushed rubber crumb on the properties of bitumen], *Politekhnicheskii vestnik. Seriya: Inzhenernyye issledovaniya* [Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research], 2019, no. 2(46), pp. 135-138. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Popov M.R., Chernysheva Ye.A., Zuykov A.V., Kozhevnikova Yu.V. [Evaluation of the influence of a tar additive on the properties of bitumen], *Mir nefteproduktov* [World of Oil Products], 2024, no. 3, pp. 42-47. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Yartsev V.P., Mamontov S.A., Suchkov K.O., Suchkova I.G. [Experience in Modifying Bitumen Binder with Tannery Waste], *Ekspert: teoriya i praktika* [Expert: Theory and Practice], 2023, no. 1(20), pp. 163-166. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Yartsev V.P., Kiseleva O.A. *Prognozirovaniye povedeniya stroitel'nykh materialov pri neblagopriyatnykh usloviyakh ekspluatatsii: uchebnoye posobiye*

[Predicting the Behavior of Building Materials under Adverse Operating Conditions: A Tutorial], Tambov: Izdatel'stvo Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2009, 124 p. (In Russ.)

Einfluss von Füllstoffen auf die Festigkeit und Haltbarkeit von Penetrationsbitumenverbundwerkstoffen

Zusammenfassung: Es sind die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zur Festigkeit und Haltbarkeit bei der Penetration von Bitumenkompositen vorgestellt, die durch die Zugabe von Abfällen aus Blähton und der Holzverarbeitungsindustrie in Bitumen der Marke BN 90/10 hergestellt worden sind. Es ist nachgewiesen, dass zur Verbesserung der Haltbarkeit von Bitumen die Herstellung von Bitumenzusammensetzungen durch die Verwendung von recycelten technologischen Abfällen, insbesondere von Abfällen aus Blähton und der Holzindustrie, möglich ist.

Influence des charges sur la résistance et la durabilité lors de la pénétration des composites bitumineux

Résumé: Sont présentés les résultats des études expérimentales sur la résistance et la durabilité de la pénétration des composites bitumineux obtenus par l'introduction dans le bitume de la marque BN 90/10 des déchets d'argile expansée et de déchets de l'industrie de transformation. Est prouvé que pour augmenter la durée de vie du bitume, il est possible de créer des compositions bitumineuses en introduisant des déchets d'origine humaine recyclables et plus précisément des déchets d'argile expansée et de l'industrie du bois.

Авторы: *Ярцев Виктор Петрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений»; *Данилов Владислав Михайлович* – аспирант кафедры «Конструкции зданий и сооружений», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.