

УДК 691.17

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-116

А.И. Рудской<sup>1</sup>, А.Я. Башкарев<sup>2</sup>, В.Ю. Бессонова<sup>3</sup>

## ТЕХНОЛОГИЯ ДОБАВЛЕНИЯ В ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВЫХ МОДИФИКАТОРОВ НА ПРИМЕРЕ ДОРОЖНЫХ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ



<sup>1</sup>Андрей Иванович Рудской,  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого  
Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: (812)552-6757, E-mail: [rector@spbstu.ru](mailto:rector@spbstu.ru)



<sup>2</sup>Альберт Яковлевич Башкарев,  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого  
Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: 8(921)950-3715, E-mail: [bashkarev@spbstu.ru](mailto:bashkarev@spbstu.ru) .



<sup>3</sup>Виктория Юрьевна Бессонова,  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого  
Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: 8(931)292-4945, E-mail: [bessonova.viktoria@yandex.ru](mailto:bessonova.viktoria@yandex.ru).

### Аннотация

Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что эффективность модификаторов полимерных композитов зависит от температурно-временного режима их применения, в рассматриваемом случае применительно к асфальтобетонам. В первую очередь от этого зависит адгезионная прочность соединения связующего с другими фракциями композита. Оптимальные значения температуры и времени процесса зависят от природы и марки используемых материалов. Разработана методика определения характеристик связующего, которые необходимо знать для выполнения практических расчетов.

*Ключевые слова:* модификатор, дорожные асфальтобетоны, температурно-временной режим, адгезионная прочность.

## **Введение**

В современной технике в качестве конструкционных материалов все большее распространение находят полимерные композиционные материалы, в которых в качестве связующего твердых наполнителей используются термопласты, обладающие хорошими технологическими возможностями и качественными адгезионными свойствами, например, это полиамиды со своим достаточно широким температурным и механическим диапазонами применения. Но самым распространенным термопластом стал нефтяной битум, миллионы тонн которого ежегодно используют при строительстве автомобильных дорог в качестве связующего их асфальтобетонных покрытий.

Существуют два основных класса полимерных композитов. В некоторых полимер является не только связующим всех входящих в композит фракций, но и определяет его главные функции, например низкий коэффициент трения, износостойкость и т.д. В других композитах такой полимерный материал как битум используется только как связующее. Его процентное содержание в таких случаях обычно ограничено всего несколькими процентами, не более 5-6 % в общем объеме. Но основное требование к связующему здесь не только хорошая адгезионная прочность, но и ее стабильность в неблагоприятных условиях эксплуатации.

В любом соотношении с полимерным связующим в состав композита входят твердые фракции разной дисперсности. Природа их чаще может быть металлическая, керамическая, например, в асфальтобетонах, или каких-то других сополимеров, обладающих особыми физико-механическими свойствами, например, фуллерены.

Во всех случаях необходимо корректно определять пропорцию между связующим и наполнителями. Первоначально в этом вопросе существовал подход с позиций среднеарифметического соотношения механических характеристик и связующего и наполнителей, который в какой-то степени остается и сейчас, например, применительно к стеклопластикам. Но оказалось, что составляющие композита могут существенно изменять физико-механические свойства друг друга, что существенно влияет не только на прочность и долговечность композитов, но и на технологические процессы их приготовления. В той или иной степени это относится ко всем композитам, но особенно наглядно это поясняется механизмом формирования асфальтобетона, который как говорилось выше стал одним из самых распространенных композиционных материалов.

Асфальтобетон на 95 % состоит из минеральных фракций различной дисперсности, например, от нескольких десятков микрон у частиц минерального порошка до нескольких миллиметров у щебня и кварцевого песка.

С целью повышения качества асфальтобетона, применяемого для создания дорожных покрытий, сейчас используют различные модификаторы битума, улучшающие его адгезионные и когезионные свойства [1-6]. В определенной степени модификатором является и минеральный порошок, основное назначение которого было и остается заполнять микропоры между частицами песка, снижая их подвижность [7-10]. Но положительная роль минерального порошка, возможно, этим не ограничивается. Проведенные исследования прочности адгезионного соединения гранита и битума показали, что прочность битума на их границе значительно выше, чем в остальном его объеме [11,12].

Было выдвинуто и затем проверено предположение, что причина увеличения прочности заключается в том, что имеющиеся в граните ионы железа проникают в молекулы асфальтенов, вызывая их сжатие и как следствие увеличивая прочность их межатомных и межмолекулярных связей [13]. Этот процесс подтверждается увеличением частоты колебаний атомов, что было установлено с помощью инфракрасной спектроскопии. Теоретически прочность адгезии должна была бы возрасти кратно. Но как показали исследования, этот эффект возникает только на очень близком расстоянии от гранита. И на расстоянии всего 50 мкм он уже практически не заметен [14,15].

Достаточно полно это явление еще не изучено. Но чтобы распространить положительное влияние ионов железа на больший объем битума как адгезива, в него, разогретого до жидкого состояния, был добавлен небольшой процент (2-4 %) мелкодисперсного порошка железного сурика ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), который при нагреве образует ионы железа. Испытания прочности адгезии "на сдвиг" проводилось при комнатной температуре (20 °С) на гранитных образцах, склеенных модифицированным битумом БНД 70/100. Результаты испытания в виде графиков, представленные на рис. 2, показывают, что добавление порошка железного сурика заметно увеличило прочность адгезии. Однако возникла проблема с введением небольшого количества этого мелкодисперсного модификатора, плотность которого в несколько раз выше плотности битума. Проведенный эксперимент показал, что порошок железного сурика в нагретом до 100 °С битуме полностью погружается в нем уже через 5 минут. В лабораторных условиях, чтоб затормозить этот процесс, создавался расплав битума с концентрированным содержанием сурика, который затем разбавлялся тоже нагретым битумом до требуемого процентного содержания. Поэтому для производственных условий

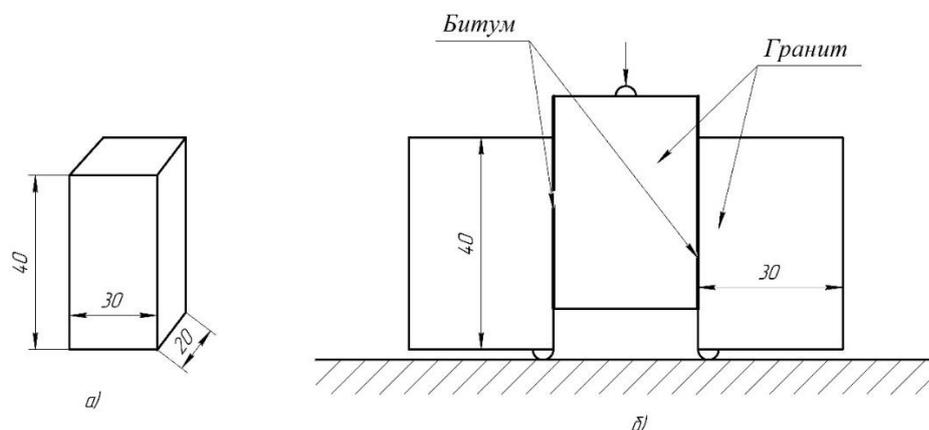
предлагается, когда количество модификаторов очень незначительно, заранее перемешивать их с минеральным порошком. Это даст возможность достаточно равномерно распределять их по всему объему горячей асфальтобетонной смеси, не изменяя технологический процесс ее приготовления.

Модификация полимерных связующих в данном случае битума, имеет физико-химическую природу, поэтому она происходит не мгновенно, а протекает во времени, которое имеет свое оптимальное значение. Интересно, что в большинстве рекомендаций на фактор времени внимание практически не обращалось. Главное считалось – это количество, так как от этого зависит стоимость процесса модификации.

В данной работе поставлен вопрос о зависимости от температурно-временного режима приготовления асфальтобетонной смеси и адгезионной прочности асфальтобетона, как минерально-битумного композита, и деформативных свойств битумного слоя, находящегося между склеенными им гранитными поверхностями.

## Методы

Исследование адгезионной прочности соединения гранитных образцов, склеенных битумом БНД 70/100 производства МНПЗ, проводилось по методике, описанной в работе [11] по схеме нагружения, представленной на рис. 1.



**Рис. 1.** *a* – гранитные образцы, *б* – схема нагружения их склейки битумом

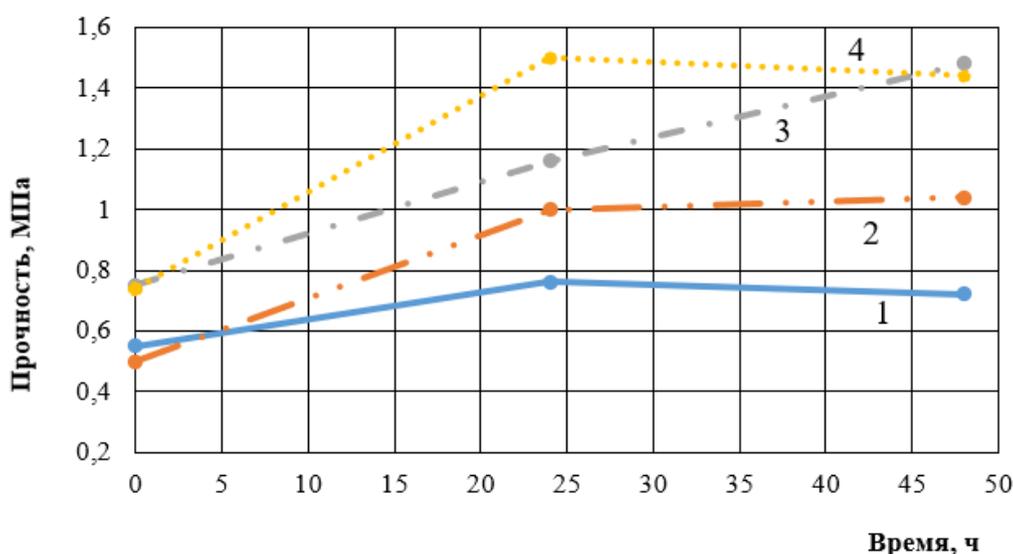
Порядок подготовки образцов к испытаниям был следующим. Образцы вместе с битумом нагревались в термостате до температуры 180 °С. Затем они с помощью битума склеивались и те из них, которые должны были подвергнуться термостатированию, скреплялись струбцинами

и вновь помещались в термостат на 24 часа или 48 часов при той же температуре 180 °С.

Перед испытанием склеенные образцы охлаждались погружением в воду (15-20 °С), затем освобождались от струбцин и помещались в охлаждаемую камеру с температурой +8 °С, где выдерживались не менее 24 часов для стабилизации температуры по всему объему материала для упрощения последующего процесса испытания. После этого адгезионная прочность соединения испытывалась на сдвиг со скоростью движения пуансонов испытательной машины 1 мм/мин.

В качестве связующего испытывались следующие составы битума: 1 – битум марки БНД 70/100 немодифицированный производства МНПЗ, 2 – битум модифицированный в количестве 4 % порошком железного сурика, 3 – битум модифицированный минеральным порошком МП-2 (тонкость помола 72) в пропорции 1:1 по массе, 4 – битум модифицированный смесью минерального порошка в пропорции 1:1 по массе и железного сурика в количестве 4 % по массе от битума.

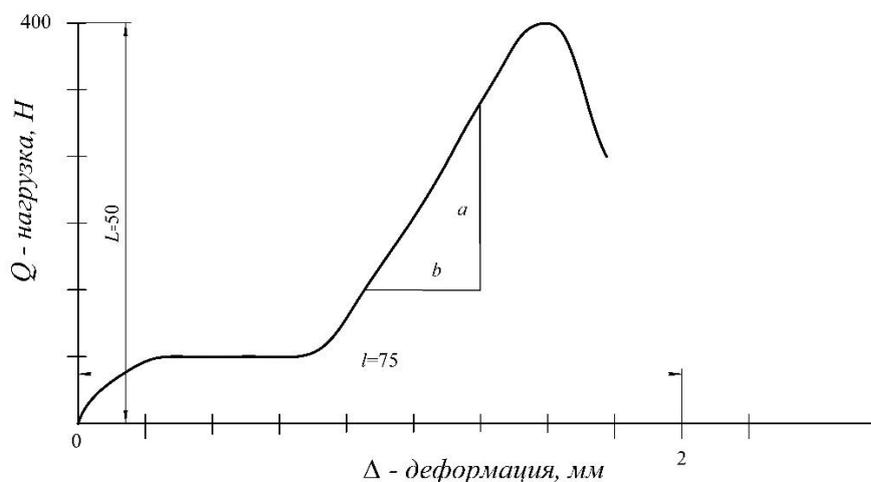
Результаты испытания адгезионной прочности представлены в виде графиков на рис. 2.



**Рис. 2.** Изменение прочности адгезионного соединения "битум БНД 70/100 производства МНПЗ -гранит" в результате термостатирования при температуре 180 °С: 1 - битум без модификаторов, 2 - битум с добавлением 4 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3 - битум с добавлением минерального порошка в соотношении 1:1 по массе, 4 - битум с добавлением 4 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> от битума и минерального порошка в соотношении 1:1 по массе

Одновременно с определением прочности адгезионных соединений проводилась запись диаграммы нагружения образцов, что давало возможность оценить модуль деформации битумного слоя для каждого исследованного модификатора.

Диаграмма деформации битумного слоя "на сдвиг" между двумя поверхностями гранитных образцов представлена на рис. 3.



**Рис. 3.** Пример диаграммы деформации битумного слоя (без модификации) "на сдвиг"

Порядок определения модуля деформации битумного слоя в адгезионных соединениях битум-гранит по диаграммам их нагружения был следующим.

Замеряется длина оси ординаты (вертикальная) в мм какого-то конкретного значения нагрузки. Эта нагрузка делится на соответствующую длину оси ординат. Масштаб записи нагрузки  $M_G$  будет равен:  $M_G = \frac{Q}{L}$ .

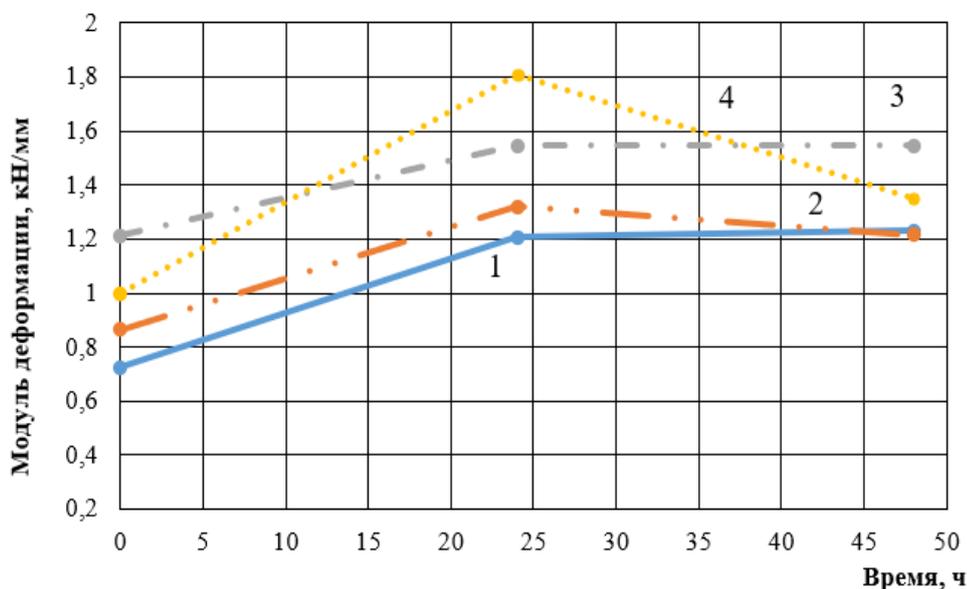
То же самое и с масштабом записи деформации. Берется по оси абсцисс (горизонтальная) значение деформации  $\Delta$ . Измеряется, сколько  $l$  мм на нее приходится на диаграмме. Рассчитывается масштаб записи деформации:  $M_\Delta = \frac{\Delta}{l}$ . Затем берется линейный участок на графике диаграммы и строится на нем прямоугольный треугольник (см. рисунок 3). Определяется величина его катетов:  $a$  (вертикальный),  $b$  (горизонтальный).

Умножается  $a$  на масштаб нагрузки  $M_G$ . Определяется ее величина нагрузки  $Q = a \cdot M_G$  (Н). Так же деформация:  $\Delta = b \cdot M_\Delta$  (мм).

После этого рассчитывается модуль деформации  $G = \frac{Q}{\Delta}$  (Н / мм).

По имеющимся результатам испытания прочности адгезионного соединения при разных режимах термостатирования был рассчитан модуль деформации для битума марки БНД 70/100 того же производителя МНПЗ и с теми же модификаторами, с которыми выше определялась адгезионная прочность.

Характер изменения модуля деформации представлен в виде графиков на рис. 4.



**Рис. 4.** Изменение модуля деформации в результате термостатирования адгезионного соединения "битум БНД 70/100 производства МНПЗ -гранит" в результате термостатирования при температуре 180 °С: 1 - битум без модификаторов, 2 - битум с добавлением 4 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3 - битум с добавлением минерального порошка в соотношении 1:1 по массе, 4 - битум с добавлением 4 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> от битума и минерального порошка в соотношении 1:1 по массе

## Результаты

Результаты определения адгезионной прочности (рис. 2) показали довольно хорошую эффективность использования модификаторов даже без термостатирования. Например, введение в битум железного сурика увеличило начальную адгезионную прочность примерно на 15-20 % и этот эффект не изменился и после продолжительного термостатирования. В вдвое больший эффект отмечен при введении в битум мелкодисперсного минерального порошка в соотношении 1:1 к массе битума (кривая 3). Этот эффект сохранялся одинаково после термостатирования в течение 24 и 48 часов. Можно считать, что применение термостатирования при изготовлении асфальтобетонной смеси необходимо независимо от способа модификации битума или без него. Положительный эффект сохраняется одинаково при любых исследуемых модификаторах.

Наибольший эффект от применения минерального порошка можно объяснить тем, что он среди всех других минеральных фракций

асфальтобетонной смеси обеспечивает наибольший контакт с битумом, что сопровождается возникновением значительного его объема с упорядоченной прочной надмолекулярной структурой.

Почти все исследованные составы показали, что в исследованном диапазоне времени термостатирования адгезионная прочность достигает максимального значения через 24 часа. Затем она или стабилизируется или начинает медленно снижаться. Ранее, обосновывая возможность применения к расчету долговечности адгезионного соединения полимеров термофлуктуационной теории прочности, авторы данной работа доказали [11], что количество адгезионных связей  $N$  при температуре  $T$  во времени  $\tau$  постоянно и не монотонно изменяется. Была выведена формула:

$$N = k \cdot \frac{\tau}{\tau_0 \cdot \exp \frac{u_6}{R \cdot T}} \cdot \left( 1 - \frac{\tau}{2 \cdot \tau_0 \cdot \exp \frac{u_a}{R \cdot T}} \right), \quad (1)$$

где  $u_a$  и  $u_6$  – энергия активации разрушения битума и его адгезионных связей,  $R$  – газовая постоянная,  $\tau_0 = (10^{-11}-10^{-13})$  с. – предэкспотенциальный множитель,  $k$  – коэффициент, учитывающий какая доля активных радикалов, образовавшихся при термодеструкции битума, образовала адгезионные связи.

Момент возникновения максимальной адгезионной  $\tau_*$  прочности определяется, если первую производную от выражения (1) приравнять к нулю. В результате получается выражение:

$$u_a = R \cdot T \cdot (27,6 + \ln \tau_*) \quad (2)$$

Таким образом, экспериментально определив время  $\tau_*$ , когда наступает при термостатировании максимальная прочность, можно рассчитать энергию активации разрушения адгезионных связей  $u_a$ , которая зависит и от битума, и от минерального материала.

С этих позиций, очевидно, и следует делать выводы по результатам выполненных испытаний адгезионной прочности.

Особое внимание при испытаниях соединения битума и гранита было обращено на деформируемость битумного слоя, находящегося между гранитными поверхностями. От этого в первую очередь при повышенных температурах зависит процесс образования колеи [16]. При изучении процесса термостатирования вставал вопрос о возможности его влияния на деформативные характеристики, в том числе на механизм образования в асфальтобетонном покрытии трещин, что имеет для него весьма

отрицательные последствия. В настоящее время исследования в этом направлении идут достаточно успешно, например, с применением измельченной крошки эластомеров [17-20].

Проведенные выше результаты исследований показали, что термостатирование битума также влияло на модуль деформации его слоя, как и на его адгезионную прочность. При этом между этими зависимостями наблюдается определенная корреляция. При термостатировании модуль деформации битумного слоя без модификаторов увеличивается значительно больше, но, как и адгезионная прочность через 24 часа он стабилизируется. Стабилизируются и деформации битумных слоев, модифицированных другими примененными способами модификации.

Особый интерес представляет модификация битума смешенными мелкодисперсными порошками: минерального порошка-железный сурик ( $Fe_2O_3$ ). Результаты испытания представлены на рис. 2 и 4. Модифицированный ими битум показал самую высокую адгезионную прочность и после термостатирования почти самый низкий модуль деформации. Возможно, вероятность появления трещин в этом случае будет меньше.

### **Заключение**

1. Термостатирование горячих асфальтобетонных смесей сразу после их приготовления должно стать одной из основных операций технологического процесса, с помощью которого можно управлять качеством будущего асфальтобетона с учетом условий эксплуатации дорожных покрытий.
2. Полученные рекомендации по термостатированию для битумо-минеральных композитов после проверки и корректировки могут быть применены и при изготовлении других полимерных композитов.
3. При малом процентном содержании мелкодисперсных модификаторов связующего полимерных композитов можно рекомендовать их предварительное смешивание. При этом при использовании термостатирования возможно достижение большего эффекта.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- [1] Redelius, P. G. The structure of asphaltenes in bitumen. *Road Materials and Pavement Design*. (2006). 7(sup1). 143–162. <https://doi.org/10.1080/14680629.2006.9690062>

- [2] Рябина К.М., Проваторова Г.В. Исследование свойств асфальтобетона на модифицированном полимерами битуме // Строительные материалы и изделия. 2022. Том 5. № 4. С. 19 – 29. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-4-19-29
- [3] Ивкин А.С., Васильев В.С., Саламатова Е.В., Поваров В.Г., Майданова Н.В., Калинин М.В., Страхов В.М. Факторы, влияющие на сцепление битума с минеральными материалами // Кокс и Химия. 2022. № 1. С. 27-36.
- [4] Копылов В.Е., Буренина О.Н. Асфальтобетон с использованием минеральных порошков, активированных нефтяным шламом // Нефтегазовое дело. 2022. Т. 20, № 5. С. 87–93. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-5-87-93>
- [5] Zhang, J. Influence of aggregate mineralogical composition on water resistance of aggregate-bitumen adhesion / J. Zhang, A. K. Apeageyi, G. D. Airey и др. // International Journal of Adhesion and Adhesives. - 2015. - Vol. 62. - pp. 45-54.
- [6] Porto M., Caputo P., Loise V., Eskandarsefat S., Teltayev B., Rossi C. Bitumen and bitumen modification: A Review on Latest Advances. Appl. Sci, 2019, №9, pp. 1–35.
- [7] Sirota E. V. (2005). Physical structure of asphaltenes. Energy & fuels, 19(4), 1290-1296. <https://doi.org/10.1021/ef049795b>
- [8] Страхова Н.А., Цамаева П.С., Эльмурзаев А.А. Методы улучшения адгезионных свойств битумов к минеральным материалам // Вестник ГНТУ. Технические науки. 2020. Т. 16. № 4(22). С. 29-35.
- [9] Башкарёв А.Я., Лазарев Ю.Г., Беспалова Н.Н., Бессонова В.Ю. Методика определения фактической площади минеральных составляющих, покрываемых слоем битума в асфальтобетонной смеси // Путь навигатор. 2022. № 53 (79). С. 46-49.
- [10] Копылов В.Е., Буренина О.Н., Павлова Е.А. Активация минеральных порошков, как способ улучшения физико-механических характеристик асфальтовых бетонов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2017. Том 9. № 5 <https://naukovedenie.ru/PDF/48TVN517.pdf> (доступ свободный).
- [11] Yazhi Xu, Chuanfeng Zheng, Yepeng Feng, Xuldong Guo Low-temperature cohesive and adhesive strength testing of contact surface between bitumen and mineral aggregates by image analysis // Construction and buildings materials. 2018. Vol 183. pp. 95-101. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.169>
- [12] Ying Yuan, Long Chen. Relationship among cohesion, adhesion and bond strength // Materials and design. 2020. Vol. 185. pp. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108272>

- [13] Per Redelius. Asphaltenes in Bitumen, What They Are and What They Are Not, Road Materials and Pavement Design. 2009. 10:sup1, 25-43, <http://doi.org/10.1080/14680629.2009.9690234>
- [14] Bashkarev A.Ya., Bessonova V.Yu., Lazarev Yu.G., Lozhechko V.P. Interfacial layers in mineral-bitumen composite and durability of asphalt concrete. Construction of Unique Buildings and Structures; 2023. № 3 (108). С. 10802. doi: 10.4123/CUBS.108.2
- [15] Башкарев А.Я., Лазарев Ю.Г., Бессонова В.Ю., Исмаилов А.М. Долговечность адгезионных соединений битума в асфальтобетоне// Транспортное строительство/ 2023. № 1. С. 13-17
- [16] Ушаков В.В., Горячев М.Г., Кудрявцев А.Н. Учет природно-климатических условий эксплуатации автомобильных дорожных одежд // Вестник МАДИ, 2022. № 3. С. 68-73
- [17] Галкин А.В., Париг Я.И. Условия определения когезионной прочности битумного вяжущего // Вестник ХНАДУ. 2017. вып. 79. С. 47-51.
- [18] Ying Yuan, Long Chen. Relationship among cohesion, adhesion and bond strength // Materials and design. 2020. Vol. 185. P. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108272>
- [19] Canestrari, F., Cardone, F., Graziani, A., Santagata, F., Bahia, H. U. Adhesive and Cohesive Properties of Asphalt-Aggregate Systems Subjected to Moisture Damage // In Road Materials and Pavement Design. 2010. Vol. 11. P. 11–32. <https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690325>
- [20] Васильев, А. Ю. Изучение влияния шипованных шин на износ дорожного покрытия / А. Ю. Васильев, Л. В. Спиридонова // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2019. № 1(19). С. 15.

A.I. Rudskoy, A.Y. Bashkarev, V.Y. Bessonova

## **TECHNOLOGY OF ADDING FINE POWDER MODIFIERS TO POLYMER COMPOSITES USING THE EXAMPLE OF ROAD ASPHALT CONCRETE**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

### **Abstract**

It is theoretically justified and experimentally confirmed that the effectiveness of polymer composite modifiers depends on the temperature and time regime of their application, in the case under consideration in relation to asphalt concrete. First of all, the adhesive strength of the binder's connection with other fractions of the composite depends on this. The optimal values of temperature and process time depend on the nature and brand of the materials

used. A method has been developed for determining the characteristics of the binder, which must be known in order to perform practical calculations.

*Key words:* modifier, road asphalt concrete, temperature and time regime, adhesive strength.

## REFERENCES

- [1] Redelius, P. G. The structure of asphaltenes in bitumen. *Road Materials and Pavement Design*. 2006. 7(sup1). 143–162. <https://doi.org/10.1080/14680629.2006.9690062>
- [2] Ryabinina K.M., Provatorova G.V. Investigation of the properties of asphalt concrete on polymermodified bitumen. *Construction Materials and Products*. 2022. 5 (4). P. 19 – 29. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-4-19-29 (rus.)
- [3] Ivkin A.S., Vasiliev V.S., Salamatova E.V., Povarov V.G., Maidanova N.V., Kalinin M.V., Strakhov V.M. Factors affecting the adhesion of bitumen with mineral materials // *Coke and Chemistry*, № 1, - 2022, p. 27-36. (rus.)
- [4] Kopylov V.E., Burenina O.N. Asphalt concrete using mineral powders activated by oil sludge // *Oil and Gas Business*. 2022. T. 20, № 5. P. 87–93. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-5-87-93>. (rus.)
- [5] Zhang, J. Influence of aggregate mineralogical composition on water resistance of aggregate–bitumen adhesion / J. Zhang, A. K. Apeageyi, G. D. Airey и др. // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. - 2015. - Vol. 62. - pp. 45-54.
- [6] Porto M., Caputo P., Loise V., Eskandarsefat S., Teltayev B., Rossi C. Bitumen and bitumen modification: A Review on Latest Advances. *Appl. Sci*, 2019, №9, pp. 1–35.
- [7] Sirota E. B. Physical structure of asphaltenes. *Energy & fuels*, 2005. 19(4), pp. 1290-1296. <https://doi.org/10.1021/ef049795b>
- [8] Strakhova N.A., Tsamaeva P.S., Elmurzaev A.A. Methods for improving the adhesion properties of bitumen to mineral materials // *Vestnik GGNTU. Technical science*. 2020. T. 16. № 4(22). pp. 29-35. <https://doi.org/10.34708/GSTOU.2020.25.57.004>. (rus.)
- [9] Bashkarev A.Ya., Lazarev, Yu.G., Bessalova N.N., Bessonova V.Yu. Methodology for determining the actual area of mineral components covered by a layer of bitumen in an asphalt concrete mixture. *Route navigator*, 2022. No. 53(79), pp. 46-49. [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_49928478\\_28703896.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_49928478_28703896.pdf). (rus.)
- [10] Kopylov V.E., Burenina O.N., Pavlova E.A. Activation of mineral powders as a way to improve the physical and mechanical characteristics of asphalt

- concrete // Internet journal "SCIENCE". 2017. Vol. 9. № 5  
<https://naukovedenie.ru/PDF/48TVN517.pdf> (free access). (rus.)
- [11] Yazhi Xu, Chuanfeng Zheng, Yepeng Feng, Xuldong Guo Low-temperature cohesive and adhesive strength testing of contact surface between bitumen and mineral aggregates by image analysis // Construction and buildings materials. 2018. Vol 183. pp. 95-101.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.169>
- [12] Ying Yuan, Long Chen. Relationship among cohesion, adhesion and bond strength // Materials and design. 2020. Vol. 185. pp. 1-13.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108272>
- [13] Per Redelius (2009) Asphaltenes in Bitumen, What They Are and What They Are Not, Road Materials and Pavement Design, 10:sup1, pp.25-43,  
<http://doi.org/10.1080/14680629.2009.9690234>
- [14] Bashkarev A.Ya., Bessonova V.Yu., Lazarev Yu.G., Lozhechko V.P. Interfacial layers in mineral-bitumen composite and durability of asphalt concrete. Construction of Unique Buildings and Structures; 2023. № 3 (108). p. 10802. doi: 10.4123/CUBS.108.2 (rus.)
- [15] Bashkarev A.Ya., Lazarev Yu.G., Bessonova V.Yu., Ismailov A.M. Durability of adhesive compounds of bitumen in asphalt concrete // Transport Construction 2023. No. 1. pp.13-17 (rus.)
- [16] Ushakov V.V., Goryachev M.G., Kudryavtsev A.N. Taking into account the natural and climatic conditions of operation of automobile road pavements // Bulletin of MADI, 2022. No. 3. pp. 68-73 (rus.)
- [17] Galkin A.V., Parig Ya.I. Conditions for determining the cohesive strength of bitumen binder // Bulletin of KhNADU. 2017. Iss. 79. pp. 47-51 (rus.)
- [18] Ying Yuan, Long Chen. Relationship among cohesion, adhesion and bond strength // Materials and design. 2020. Vol. 185. pp. 1-13.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108272>
- [19] Canestrari, F., Cardone, F., Graziani, A., Santagata, F., Bahia, H. U. Adhesive and Cohesive Properties of Asphalt-Aggregate Systems Subjected to Moisture Damage // In Road Materials and Pavement Design. 2010. Vol. 11. pp. 11–32. <https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690325>
- [20] Vasiliev, A. Yu. Study of the influence of studded tires on the wear of road surfaces / A. Yu. Vasiliev, L. V. Spiridonova // Automobile. Road. Infrastructure. 2019. № 1(19). P. 15 (rus.)