This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Research Article
ISSN 2304-6295
Received: February 17, 2024 Accepted: March 2, 2024 Published: March 9, 2024

Hot asphalt mixture temperature control for adhesion strength improvement

Bashkarev, Albert Yakovlevich[1]
Bessonova, Victoria Yurievna[1*]
Lazarev, Yuriy Georgievich [1]
Panevin, Nikolai Ivanovich[2]

[1] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; bashkarev@spbstu.ru (B.A.Y.); bessonova.viktoria@yandex.ru (B.V.Y.); lazarev-yurij@yandex.ru (L.Y.G.)
[2]Avtodoris LLC, Voronezh, Russian Federation; panevinn@mail.ru (P.N.I.)
Correspondence:* email bessonova.viktoria@yandex.ru; contact phone +79312924945

Keywords:

Asphalt concrete; Durability; Adhesion; Temperature control; Thermofluctuation theory

Abstract:

The object of research is to determine the optimal modes of asphalt-concrete mixture. **Method.** The thermal fluctuation theory of strength for calculating durability and determining the optimal modes of asphalt concrete mixture preparation as a research method shows that the use of "silos-thermostats" contributes to achieving the highest possible strength of asphalt concrete. **Results.** Consequently, it has been proved that the tested methods of determining the quality of road bitumen can be used as a basis for a new instrumental base for evaluating its adhesive properties. In this regard, the quality of road surfaces can be improved at no additional cost.

1 Введение/ Introduction

Проблема повышения прочности и долговечности асфальтобетона остается актуальной задачей. Поиск решения которой позволяет предположить, что прочность и долговечность асфальтобетона напрямую связаны с адгезионными свойствами [1].

Асфальтобетонные заводы по разнообразию применяемых компонентов, температурным режимам, а главное по объемам выпускаемой продукции по своим масштабам все больше похожи на «планетные кухни» (многофункциональные устройства), где идет приготовление дорожных горячих или теплых асфальтобетонных смесей.

В последние годы часть специалистов [2]-[3] высказывает мнение о том, что асфальтобетонные покрытия на автомобильных дорогах уступают по прочности и долговечности покрытиям из цементобетона. В практике в этой части еще недостаточно данных, чтобы безапелляционно подтвердить данное мнение [4]. Тем более известно, что стоимость ремонта цементобетонных дорожных покрытий значительно выше, чем асфальтобетонных [5]. Поэтому сравнительная оценка о их преимуществах для России и большинства европейских стран пока остается в пользу последних [6]-[7].

Асфальтобетон примерно на 95 % состоит из минеральных фракций разной дисперсности: щебня, песка и минерального порошка. Как правило, самое большое количество минерального материала по массе — это щебень. Но фактическая площадь, взаимодействующая с битумом у минерального порошка, а хотя его количество по массе минимальное, значительно больше, чем у минеральных материалов [8]-[10].

Самая слабая прочность среди всех составляющих асфальтобетона у битума, количество которого обычно составляет 4–6 %. Поэтому разрушение асфальтобетона происходит либо по

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

самому битуму, либо по его границе с минеральными фракциями. В первом случае это называется когезионным разрушением, во втором - адгезионным [11]-[13]. Часто наблюдается и смешанный вид разрушения [14]-[15].

В настоящее время исследования когезии, т.е. прочности самого битума и его адгезионных свойств в основном проводится на трехмерных образцах, которые формируются в температурных и временных условиях, отличающихся по своему воздействию от условий формирования в асфальтобетоне тонкого битумного слоя, находящегося между твердыми минеральными фракциями, которые сами в некоторой степени влияют на формообразование в битуме надмолекулярных структур [16]-[17].Все это предопределяет не только прочность самого битума, но и его деформационные свойства [18]-[19]. Общепринятых методик исследования физико-механических свойств битума, учитывающих воздействия на него технологических температурных режимов пока практически не создано.

Таким образом готовых решений повышения прочности и долговечности асфальтобетона не прослеживается. Встает вопрос исчерпаны ли в дорожном строительстве инновационные возможности повышения качества дорожного строительства, прежде всего повышения долговечности асфальтобетонных покрытий, частота ремонта, которых в условиях их интенсивной эксплуатации требует все больших экономических затрат и все большего внимания.

Объектом исследования является определение оптимальных режимов приготовления асфальтобетонной смеси. Предмет исследования- горячая асфальтобетонная смесь. Цель исследования состоит в разработке научных и практических предложений по улучшению качества дорожных покрытий без дополнительных затрат.

Задачи исследования:

- апробирование методов определения качества дорожного битума;
- исследование процесса термостатирования горячей асфальтобетонной смеси с помощью «силосов-термостатов».

Разрушение самого битума и его адгезионных связей происходит не только в результате возникновения механических напряжений, но и под действием тепла [20]-[21]. Поэтому только сравнительная оценка теплостойкости и самого битума, и его адгезионных связей может дать ответ о вероятности адгезионного или когезионного разрушения соединения битума с твердыми поверхностями минеральных материалов.

По своей природе битум это натуральный органический материал, состоящий из различных комбинаций углерода (70–87 %), водорода (8-12 %), серы (0,5-7 %), кислорода (0,2-12 %) и азота (0-2 %), из которых создаются его основные компоненты: масла, смолы, асфальтены и небольшое количество карбенов, карбоидов и парафинов [22]-[23].Все дорожные битумы получают из нефтепродуктов, отличающихся по своей природе, месту добычи, технологии переработки. Поэтому пропорции составляющих битума всегда разные. Однако самая высокомолекулярная масса у асфальтенов (1000–5000) [24]-[25]. По другим сведениям, от 600 до 1600. Тем не менее, обладая наиболее уплотненной частью битума и температурой разложения свыше 300 ^{0}С, именно они по единодушному мнению специалистов в основном предопределяют физико-механические свойства битума. Это дает основание искать общие рекомендации на технологии изготовления и методы расчетов на прочность и долговечность битумных композитов независимо от производителей и марок применяемого битума [26]-[27].

2 Материалы и методы / Materials and Methods

В работе исследовались адгезионные соединения битума и гранита. Методы исследования базировались на выявлении их свойств и способности этих свойств проявляться в определенных условиях. Широко применяемые инженерные методы расчетов на прочность для традиционных конструкционных материалов при использовании полимерных композитов перестали себя оправдывать. Много лет делались попытки усовершенствовать их путем применения функций зависимости модуля деформации и пределов прочности от таких факторов как температура, скорость нагружения, продолжительность действия нагрузки и т.д. Но такой подход позволяет решать только конкретные задачи с узкой областью условий.

В Советском Союзе академиком Журковым С. Н. [28] в середине прошлого века была предложена термофлуктуационная теория прочности, на основе которой его научной школой в физико-техническом институте имени И. А. Иоффе и Ленинградском политехническом институте им. М. И. Калинина был разработан ряд инженерных методик для расчета на долговечность и

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

полимерных композиционных материалов. Они прошли достаточно серьезную апробацию при создании и применении антифрикционных полиамидных покрытий [29].

В последние годы в Петербургском политехническом университете были предложены аналогичные методики расчета и испытания адгезионных соединений битума и гранита. Было выдвинуто предположение о том, что в процессе нагрева битума происходит термодеструкция его молекул. В результате термодеструкции появляются активные радикалы способные создавать новые химические связи внутри самого битума и с контактируемыми с ним поверхностями минеральных материалов. Чем больше появляется активных радикалов, тем больше образуется химических адгезионных связей и тем прочнее адгезионное соединение.

Образовавшиеся внутри самого битума межмолекулярные связи изменяют его физико-механические свойства. Повышается его модуль деформации и когезионная прочность соединения с другими материалами. Казалось бы, трудно установить соотношение количества радикалов, участвующих в образовании адгезионных связей и тех, которые образуют внутренние межмолекулярные связи. Но как будет показано ниже этот вопрос можно обойти, получив ряд необходимых практических результатов.

Известна каноническая формула Журкова С.Н. для расчета долговечности любого материала τ:

$$\tau = \tau_0 \exp\frac{u - \gamma \cdot \sigma}{R \cdot T}, \tag{1}$$

где τ_0 предэкспотенциальный множитель 10^{-11}-10^{-13} с, равный периоду вращения электрона вокруг ядра атома, u энергия активации разрушения внутренних связей внутри материала, которая зависит от природы материала. Применительно к битуму она будет отличаться от места добычи нефтепродукта, технологии его переработки и так далее: σ механические напряжения, γ коэффициент чувствительности материала к механическим напряжениям, T температура, R – газовая постоянная.

Формула (1) применима при условии постоянных напряжений и температуры. При их переменных значениях для расчета долговечности может быть использован Критерий Бейли [31]:

$$\int_0^{\tau} \frac{dt}{\tau_0 \exp\frac{u - \gamma \cdot \sigma(t)}{R \cdot T(t)}} = 1 \tag{2}$$

3 Результаты и Обсуждение / Results and Discussion

В работе [30] было высказано утверждение, что возникшие адгезионные связи так же подвергаются термодеструкции, т.е. происходит параллельно два процесса: образование и разрушение адгезионного соединения. Естественно, что изменение его прочности следует за изменением количества сохраняющихся связей в прямой пропорциональности. В той же работе было получено математическое описание этого процесса при постоянной температуре и отсутствии нагрузки, т.е. при тех условиях, при которых происходит приготовление асфальтобетонной смеси.

$$N = z \cdot \frac{t}{\tau_0 \exp\frac{u_б}{RT}} \cdot \left(1 - \frac{t}{2 \cdot \tau_0 \exp\frac{u_a}{RT}}\right), \tag{3}$$

где $u_б$ и $u_а$ энергии разрушения битума и его адгезионных связей соответственно, z коэффициент пропорциональности, отражающий частичное участие возникших радикалов в образовании адгезионного соединения. Естественно, что z меньше единицы.

Если взять первую производную от выражения (3), то приравняв ее к нулю можно определить момент t_*, когда количество сохраняющихся связей, а следовательно, и прочность

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

адгезионного соединения будут максимальные:

$$t_* = \tau_0 \exp \frac{u_a}{RT} \quad (4)$$

Если экспериментально определить время, через которое при температуре *T* прочность адгезии достигает максимума, то с помощью этой же формулы можно определить величину u_a.

$$u_a = RT(\ln t_* - \ln \tau_0) \quad (5)$$

Для этой цели в работе [31-32] была разработана и применена следующая методика.

Из гранита, который часто применяется для производства щебня, используемого в асфальтобетонах, были изготовлены образцы в виде прямоугольных прямоугольников (рис. 1 и 2).

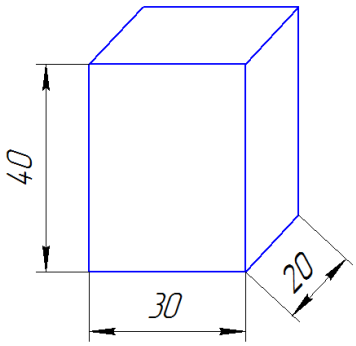

Рис. 1 - Форма образцов
Fig. 1 – Sample Form

Рис. 2 - Внешний вид образцов
Fig. 2 – Appearance of samples

С помощью дорожного битума БНД 70/100 они соединялись при температуре 160 °С и выдерживались в термостате разное время. После охлаждения до нормальной температуры (21–23 °С) они разрушались на сдвиг по схеме, представленной на рисунке 3.

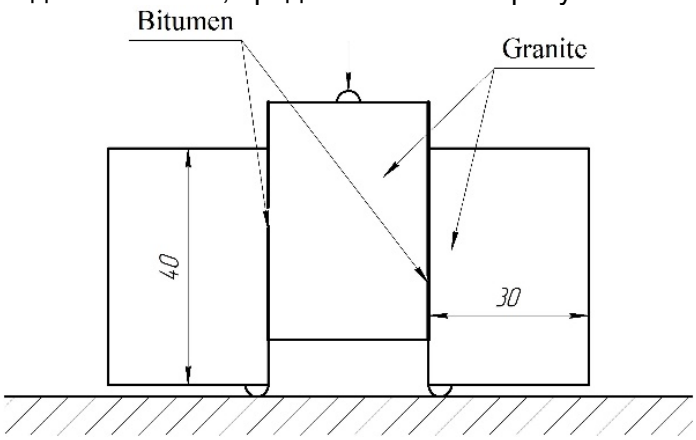

Рис. 3 - Схема склейки и испытаний образцов
Fig. 3 - Scheme of gluing and testing of samples

Результаты испытаний в виде графика изображены на рисунке 4.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

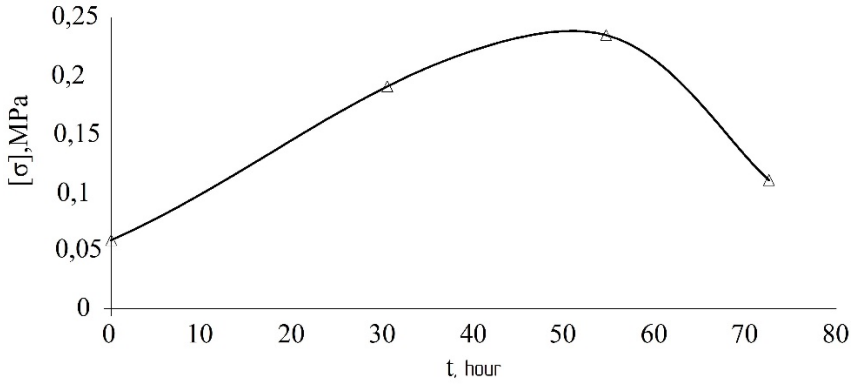

Рис. 4 - График зависимости адгезионной прочности от продолжительности термостатирования
Fig. 4 - Graph of the dependence of adhesive strength on the duration of temperature control

Максимальная прочность была получена после термостатирования в течение 50 часов. По результатам эксперимента была рассчитана величина u_a, которая оказалась равной 136 кДж/моль.

Как говорилось выше процесс формирования прочности и деформативной способности прослойки битума, а также его адгезии происходит во времени термодеструкции молекул битума, сопровождающегося непрерывным появлением активных радикалов.

В этом непрерывном процессе имеется несколько последовательных фаз.

Первая – приготовление асфальтобетонной смеси (стабильная относительно короткая продолжительность и постоянная высокая температура).

Вторая – сохранение температуры горячей асфальтобетонной смеси до момента выгрузки в транспортные средства при некотором снижении температуры.

Третья – транспортирование до места укладки в дорожное покрытие при условии понижения температуры и неопределённой нестабильной продолжительности.

В практике дорожного строительства вторая фаза этого процесса, как правило, непродолжительная, т.к. она требует оборудовать асфальтобетонные заводы «силосами-термостатами», что естественно повышает затраты, т.е. стоимость горячей асфальтобетонной смеси, но не за счет дополнительного нагрева, т.к. хорошая термоизоляция «силосов» позволяет без этого достаточно долго сохранять ее температуру.

Положительными факторами в пользу включения в технологический процесс второй фазы специалисты называют преимущества, которые можно разделить на две группы.

Первая – повышение качества асфальтобетонной смеси, которая по мнению производителей «силосов-термостатов» объясняется возможностью варьировать рецептуру асфальтобетонных смесей в зависимости от их назначения, стабильностью температуры выдаваемой смеси и лучшей обвалакиваемостью битумом минеральных фракций.

Вторая группа факторов – улучшение логистики в организации дорожного строительства, что дает бесспорный технико-экономический эффект. Это связано с возможностью круглосуточного приготовления асфальтобетонной смеси, своевременной ее выдачей даже в случае непредвиденных ремонтов на АБЗ или возникающей необходимостью неравномерной подачи асфальтобетонной смеси, например при отказах от ее получения.

По-настоящему эффективным применением «силосов-термостатов» будет, если при хранении асфальтобетонной смеси контролируется изменение ее качества.

У разных составов смеси скорость протекания в них физико-химических процессов может существенно отличаться. Зависит это прежде всего от битума. У разных марок битумного вяжущего она своя. На ней может отражаться и условия транспортирования, хранения и нагрева асфальтобетонной смеси. Поэтому непосредственно перед использованием битума на АБЗ нужно оценить его свойства, которые предопределяют окончательную прочность и долговечность дорожного асфальтобетона.

В качестве критериев долговечности битумно-минеральных композитов могут быть взяты энергия активации разрушения самого битума и его адгезионных связей с минеральными материалами, а также коэффициенты чувствительности его и этих связей к механическим напряжениям. Поскольку количество составов асфальтобетонных смесей и марок битума довольно большое, необходимо создание для этих целей базы данных и специальных

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

оперативных методик, включая сопровождающее их лабораторное оборудование и соответствующее программное обеспечение.

Последовательность технологических процессов приготовления и доставки горячей асфальтобетонной смеси к месту укладки в дорожное покрытие представлена в виде схемы на рисунке 5.

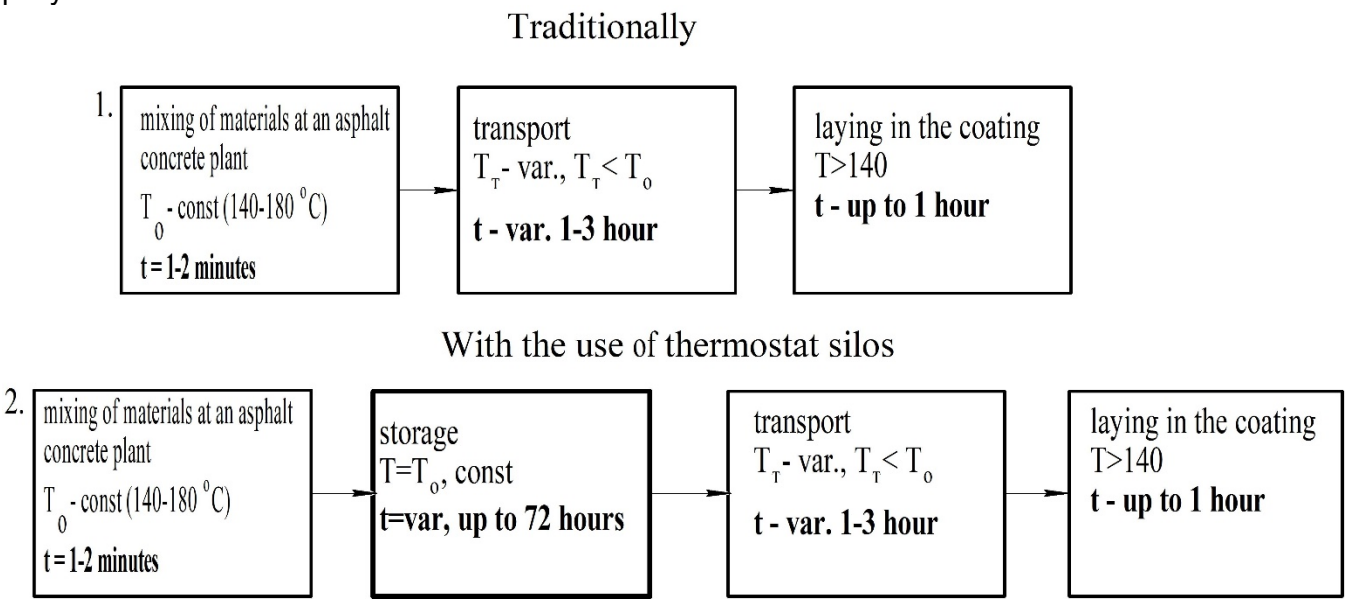

Рис. 5 - Последовательность процессов приготовления асфальтобетонной смеси: 1 – сразу с отгрузкой в транспорт, 2 – с применением силосов – термостатов.
Fig. 5 - The sequence of processes for the preparation of asphalt concrete mixture: 1 – immediately with shipment to transport, 2 – with the use of silos – thermostats.

На рисунке 6 изображен график с результатами испытания прочности адгезионного соединения гранита и битума БНД 70/100 производства МНПЗ с добавлением 4 % мелкодисперсного сурика (Fe_2O_3), склеенного при температуре 160 °С по описанной выше методике и выдержанного разное время в термостате при этой же температуре.

График показывает, что в самые первые часы выдержки при заданной температуре соединения его прочность возрастает в 2 раза. Затем продолжает возрастать до величины в 4 раза большей (после термостатирования в течение 24 часов). При большем времени она практически стабилизировалась.

На том же рисунке изображен график предполагаемого изменения прочности соединения битума с минеральным материалом, если смесь будет отгружена в транспортное средство практически сразу после ее приготовления на АБЗ.

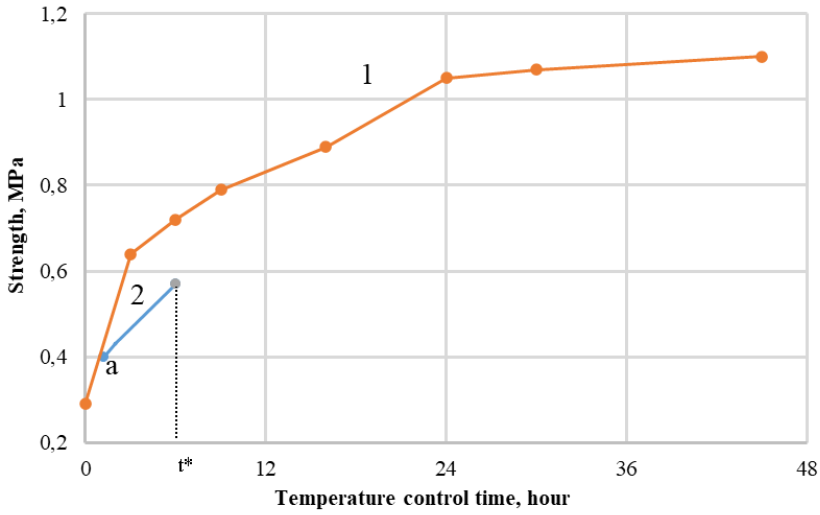

Рис.6 - Изменение прочности адгезионного соединения «битум-гранит» после термостатирования при температуре 160 °С: 1 – при условии термостатирования

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

(предполагается в «силосе-термостате» 2 – предполагаемое сразу после отгрузки в транспортное средство, t_* - максимально допустимое время (окончания) транспортирования. Fig. 6 - The change in the strength of the bitumen-granite adhesive joint after thermostating at a temperature of 160 °C: 1 – under the condition of thermostating (assumed in the "silo thermostat" 2 – assumed immediately after shipment to the vehicle, t_* - the maximum allowable time (end) of transportation.

Участок графика a-b соответствует изменению прочности соединения битума с минеральными материалами в процессе транспортирования асфальтобетонной смеси, температура которой в это время понижается. Поэтому процесс образования адгезионных связей, хотя и продолжается, но менее эффективно и относительно короткое время. После того как дорожное покрытие уже уложено, процесс упрочнения какое-то время тоже будет происходить, но в меньше степени.

Представленный на рисунке 6 график показывает, что для более прочного асфальтобетона лучше начать его транспортирование через 24 часа, но выдерживая асфальтобетонную смесь при температуре близкой к температуре ее приготовления. Без «силосов-термостатов» эту проблему практически не решить.

В результате: применяемые стандартные методы оценки битума как связующего в асфальтобетоне не в полной мере отражают его качество при использовании в составе асфальтобетонных смесей. Значительно лучше это делать, применяя критерии долговечности, предлагаемые термофлуктуационной теорией прочности.

В результате было установлено, что на качество асфальтобетонной смеси влияет не только температура ее приготовления, но и продолжительность ее воздействия. В зависимости прочности от температурно-временного фактора существует экстремум, после которого она начинает снижаться.

Проведенные исследования показали, что, применяя термостатирование асфальтобетонной смеси прочность асфальтобетона можно повысить в два и более раз.

4 Выводы / Conclusions

1- Процесс формирования прочности и деформативной способности прослойки битума, а также его адгезии происходит во времени термодеструкции молекул битума, сопровождающегося непрерывным появлением активных радикалов.

Отмечено, что в этом непрерывном процессе имеется несколько последовательных фаз.

Первая – приготовление асфальтобетонной смеси (стабильная относительно короткая продолжительность и постоянная высокая температура).

Вторая – сохранение температуры горячей асфальтобетонной смеси до момента выгрузки в транспортные средства при некотором снижении температуры.

Третья – транспортирование до места укладки в дорожное покрытие при условии понижения температуры и неопределённой нестабильной продолжительности.

2- Применяемые стандартные методы оценки битума как связующего в асфальтобетоне не в полной мере отражают его качество при использовании в составе асфальтобетонных смесей. Установлено, что лучше это делать, применяя критерии долговечности, предлагаемые термофлуктуационной теорией прочности.

3- Апробированные в работе методы определения качества дорожного битума могут быть положены в основу новой приборной базы для оценки его адгезионных свойств.

4- Применение процесса термостатирования горячей асфальтобетонной смеси с помощью «силосов-термостатов» может увеличить качество дорожных покрытий, не расходуя дополнительных затрат.

References

1. Vdovin E.A., Bulanov P.E., Mavliev L.F. (2022) Modification of bituminous binders with styrene-butadiene- styrene copolymer and sulfur. Construction of Unique Buildings and Structures, **7(105)**, P. 10504. https://doi.org/10.4123/CUBS.105.4
2. Yakobson M. Ya., Kuznetsova A. A., Vvedenskaya A. S. (2016) Relevance and prospects of cement concrete application in road construction. Transport construction, **9**, 7-10 https://www.elibrary.ru/download/elibrary_27451041_98788430.pdf

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

3. Sharafutdinov K. B., Saraykina K. A., Kashevarova G. G. [et al.]. (2023) Strength and Durability of Concretes with a Super Absorbent Polymer Additive. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, **19(2)**, 120-135. https://doi.org/10.22337/2587-9618-2023-19-2-120-135
4. Ermoshin N.A., Romanchikov S.A., Averianov D.A. (2022) Simulation modeling of the risk of road structures during the repair period. Route navigator, **50(76)**, 30-41 https://www.elibrary.ru/download/elibrary_48202390_88032815.pdf
5. Belikhin, S. V., Lazarev Yu. G., Ismailov A.M. (2019) Materials for structural repairs of transport infrastructure facilities. Regional aspects of the development of science and education in the field of architecture, construction, land management and cadastre at the beginning of the III millennium: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Komsomolsk-on-Amur, November 29-30, 2018. – Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-on-Amur State University,128-133 https://elibrary.ru/download/elibrary_38588377_57029397.pdf
6. Lazarev Yu.G., Petukhov P.A. Shirokykh M.V. (2016) Development of methodology for evaluation of accuracy (reliability) of design of non-rigid pavements. Bulletin of Civil Engineers, **2 (55)**, 38-46. https://elibrary.ru/download/elibrary_26366397_29603402.pdf.
7. Telegina M., Kirillova D., Lazarev Y., Petrov V. (2020) Temperature Condition of Asphalt Concrete During Road Usage. Proceedings of EECE 2019: Energy, Environmental and Construction Engineering, St. Petersburg, Russia, November 19-20, 2019. Cham: Springer, 177-189. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42351-3_16.
8. Yazhi Xu, Chuanfeng Zheng, Yepeng Feng, Xuldong Guo. (2018) Low-temperature cohesive and adhesive strength testing of contact surface between bitumen and mineral aggregates by image analysis. Construction and buildings materials, **183**, 95-101. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.169
9. Kopylov V.E., Burenina O.N., Pavlova E.A. (2017) Activation of mineral powders as a way to improve the physical and mechanical characteristics of asphalt concrete. Internet journal “SCIENCE”, **9 (5).** https://naukovedenie.ru/PDF/48TVN517.pdf (free access).
10. Bashkarev A.Ya., Lazarev, Yu.G., Bespalova N.N., Bessonova V.Yu. (2022) Methodology for determining the actual area of mineral components covered by a layer of bitumen in an asphalt concrete mixture. Route navigator, **53(79)**, 46-49. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_49928478_28703896.pdf
11. Abdullin A.I., Yemelyanicheva E.A., Diyarov I.N. (2009) Evaluation of the adhesion of bitumen to mineral material in asphalt concrete based on its wetting properties. Bulletin of Kazan Technological University, **4**, 256-259. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12793628_48894021.pdf
12. Galkin A.V., Parig Ya.I. (2017) Conditions for determining the cohesive strength of bitumen binder. Bulletin of KhNADU,**79**, 47-51. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30565347&ysclid=lryu814evw94919850
13. Ying Yuan, Long Chen. (2020). Relationship among cohesion, adhesion and bond strength. Materials and design, **185**, 1-13. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108272
14. Canestrari, F., Cardone, F., Graziani, A., Santagata, F., Bahia, H. U. (2010) Adhesive and Cohesive Properties of Asphalt-Aggregate Systems Subjected to Moisture Damage. In Road Materials and Pavement Design, **11**, 11–32. https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690325
15. Bashkarev, A. Y., Kudravtseva N. N., Jaroslaw R. (2015) Correlation between asphalt concrete strength, amount of bitumen and asphalt mix batching modes. International Scientific Conference Urban Civil Engineering and Municipal Facilities (SPbUCEMF-2015), 66-72. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.125
16. Strakhova N.A., Tsamaeva P.S., Elmurzaev A.A. (2020) Methods for improving the adhesive properties of bitumen to mineral materials. Bulletin of GGNTU. Technical science, **16-4 (22)**, 29-35. https://doi.org/ 10.34708/GSTOU.2020.25.57.004.
17. Porto M., Caputo P., Loise V., Eskandarsefat S., Teltayev B., Rossi C. (2019) Bitumen and bitumen modification: A Review on Latest Advances. Appl. Sci, **9**, 1–35. https://doi.org/10.3390/app9040742
18. Kotlyarsky E.V. (2011) Scientific and methodological foundations for assessing the structural and mechanical properties of composite materials based on organic binders. Building materials, **10**, 36 – 41. https://elibrary.ru/item.asp?id=17292721&ysclid=lgklyaveli538040728

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

19. Rudensky A.V. (2016) Bitumen quality is one of the most important factors in the efficiency of road construction and operation. Road builders, **1,** 32–34. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36979719_62256142.pdf
20. Polacco G., Filippi S., Merusi F., Stastna G. (2015) A review of the fundamentals of polymer-modified asphalt: Asphalt polymer interactions and compatibility. Advances in Colloid and Interface Science, **224**, 72–112. http://doi.org/10.1016/j.cis.2015.07.010
21. Tyukilina P. M., Gureev A.A. (2021) On the evolution of regulatory requirements for rheological characteristics of road binders in Russia. Chemistry and technology of fuels and oils, **1**, 46–48. https://doi.org/10.32935/0023-1169-2021-623-1-46-48
22. Tyukilina P. M., Zinovieva L. V., Egorov A. G. (2017) Influence of refining of petroleum raw materials on cohesive and deformative properties of road bitumen. Oil refining and petrochemistry, **5**, 13–18. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29333788
23. Per Redelius (2006). The structure of asphaltenes in bitumen. Road Materials and Pavement Design, **7**, 143-162. http://doi.org/ 10.1080/14680629.2006.9690062.
24. Per Redelius (2009) Asphaltenes in Bitumen, What They Are and What They Are Not, Road Materials and Pavement Design, **10:sup1**, 25-43, http://doi.org/ 10.1080/14680629.2009.9690234
25. Sirota E. B. (2005). Physical structure of asphaltenes. Energy & fuels, **19(4)**, 1290-1296. https://doi.org/10.1021/ef049795b
26. Fakhri Mansour, Dezfoulian Reza (2019) Pavement structural evaluation based on roughness and surface distress survey using neural network model. Construction and Building Materials, **204**, 768-780, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.142
27. Le Van Phuc, Le Anh-Thang, Nguyen Manh Tuan, Nguyen Quang Phuc (2022) Development and validation of a temperature correction model for FWD backcalculated moduli. Australian Journal of Civil Engineering, **21**, 1-9, https://doi.org/10.1080/14488353.2022.2083045
28. Zhurkov S.N. (1982) Questions of modern physics of the strength of solids. Readings in memory of A.F. Ioffe, 14-21. https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001204276/
29. Ivankov S.A., Bashkarev A.Ya. (2011) About the durability and strength of composites. Scientific and technical bulletins of SPbSPU, **4**, 169-199. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15561868&ysclid=lrytht6868274131517
30. Rudskoy A.I., Bashkarev A.Ya., Bessonova V.Yu. (2023) Application of the Thermofluctuation Theory of Strength to Calculate the Durability of Adhesive Joints in the Case of Granite-Bitumen Composites. Modern mechanical engineering. Science and education, **12**, 505-520. https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id23-555
31. Bashkarev A.Ya., Bessonova V.Yu., Lazarev Yu.G., Lozhechko V.P. (2023) Interfacial layers in mineral-bitumen composite and durability of asphalt concrete. Construction of Unique Buildings and Structures, **3 (108)**, P. 10802. https://doi.org/10.4123/CUBS.108.2
32. Lazarev Y., Bondarenko A., Medres C., Raty J. (2017) Method of Assessment and Prediction of Temperature Conditions of Roadway Surfacing as a Factor of the Road Safety. Transportation Research Procedia: 12th International Conference "Organization and Traffic Safety Management in Large Cities", SPbOTSIC 2016, Saint-Petersburg, September 28-30, 2016, **20**, 396-400. http://doi.org/ 10.1016/j.trpro.2017.01.064