

УДК: 691.168  
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.5  
EDN: ECEAVF



## Влияние термостатирования асфальтобетонной смеси и механических нагрузок на прочность асфальтобетона

В.Ю. Бессонова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация:** *Постановка задачи.* Одной из основных задач при создании дорожного асфальтобетонного покрытия всегда будет его долговечность. С этой целью предлагается применять процесс предварительного термостатирования асфальтобетонной смеси. Цель работы заключается в исследовании положительного влияния этого процесса на стабилизацию прочности асфальтобетона и снижение отрицательного влияния на нее механической деструкции под воздействием нагрузки. Задачами исследования являются определение энергии активации разрушения битума и его адгезионных связей, а также определение коэффициентов их чувствительности к механическим напряжениям.

*Результаты.* Описывается методика определения критериев долговечности асфальтобетонных композитов на основе термофлуктуационной теории прочности Журкова С.Н. Предложены некоторые способы их улучшения, в том числе с помощью модификации битума.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для дорожно-строительной отрасли состоит в том, что за счет применения термостатирования можно получить более долговечное асфальтобетонное покрытие.

**Ключевые слова:** адгезия, когезия, битум, прочность, асфальтобетон, долговечность, термостатирование

**Для цитирования:** Бессонова В.Ю. Влияние термостатирования асфальтобетонной смеси и механических нагрузок на прочность асфальтобетона // Известия КГАСУ, 2024, № 2(68), с. 54-65, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.5, EDN: ECEAVF

## The influence of temperature control of asphalt concrete mixture and mechanical loads on the strength of asphalt concrete

V.Yu. Bessonova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,  
St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract:** *Problem statement.* One of the main objectives when creating an asphalt concrete road surface will always be its durability. For this purpose, it is proposed to use the process of preliminary thermostating of the asphalt concrete mixture. The purpose of the work is to study the positive effect of this process on stabilizing the strength of asphalt concrete and reducing the negative impact of mechanical destruction on it under the influence of load. The objectives of the study are to determine the activation energy of the destruction of bitumen and its adhesive bonds, as well as to determine the coefficients of their sensitivity to mechanical stresses.

*Results.* A method for determining the durability criteria of asphalt concrete composites based on the thermofluctuation theory of strength by S.N. Zhurkov is described. Some ways to improve them have been proposed, including by modifying bitumen.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the road construction industry is that through the use of temperature control it is possible to obtain a more durable asphalt concrete pavement.

**Keywords:** adhesion, cohesion, bitumen, strength, asphalt concrete, durability, temperature control

**For citation:** Bessonova V.Yu. The influence of temperature control of asphalt concrete mixture and mechanical loads on the strength of asphalt concrete // News KSUAE, 2024, № 2(68), p. 54-65, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.5, EDN: ECEAVF

## 1. Введение

Асфальтобетон стал одним из основных материалов для создания дорожных покрытий. Он имеет ряд технологических и эксплуатационных преимуществ по сравнению с другими материалами. К ним относятся: меньший шум от воздействия автомобильного транспорта, практически отсутствие пыли, относительно короткий промежуток времени между укладкой в дорожное покрытие и началом по нему движения и др. При появлении разрушений наиболее простая технология его ремонта, что имеет большое значение при эксплуатации дорог в сложных климатических условиях. Сюда же можно отнести возможность повторного использования материалов после реставрации асфальтобетонных покрытий. Главные разрушающие факторы асфальтобетонных покрытий — это механические нагрузки со стороны транспорта, температурные напряжения, замерзающая в порах влага, и очевидно, как считают специалисты, химические агрессивные воздействия окружающей среды.

По своему составу асфальтобетон относится к композиционным материалам. Примерно на 95 % по своей массе он состоит из минеральных материалов различной дисперсности: щебня, песка, минерального порошка. Все они объединены в один прочный композит благодаря адгезионным свойствам битума, которого в нем содержится 4-6 %.

Известно, что существует два вида разрушения структуры асфальтобетона [1-2]. Во-первых, адгезионный, при котором в процессе повышения температуры и механических нагрузок уменьшается количество химических связей активных радикалов битума с поверхностями минеральных фракций. В определенный момент они полностью исчезают [3-5]. Второй вид разрушения – когезионный. В процессе его развития происходит термомеханическая деструкция самого битума, находящегося между твердыми фракциями асфальтобетона [6-7]. При этом значительно возрастает их подвижность относительно друг друга. Возникает быстрый износ дорожного покрытия. В асфальтобетоне появляются трещины и выкрашивания.

На практике, особенно в зимнее время, имеет место разрушение и по самому щебню, когда на дорожное покрытие воздействуют шипованные покрышки автомобильных колес [8-10].

Адгезионное и когезионное разрушения развиваются одновременно, но с разной интенсивностью. Наиболее часто встречающийся вид разрушения – смешанный – частично, как отслоение битума от минеральных поверхностей, частично разрушение по битумному слою.

Многими исследованиями доказано [11-12], что физические свойства битума в его слое в зависимости от расстояния до поверхности соединяемых материалов существенно различаются. Это явление объясняется тем, что на границе молекулы битума, прежде всего входящих в него молекул асфальтенов, смол и масел под действием физических (Ван-дер-Ваальсовых сил) и химических связей создают хорошо упорядоченные структуры, прочность которых во много раз выше, чем в объеме битума [13-15].

Целью работы является исследование положительного влияния процесса предварительного термостатирования асфальтобетонной смеси на стабилизацию прочности асфальтобетона и снижение отрицательного влияния на нее механической деструкции под воздействием нагрузки.

Задачами исследования являются:

- определение энергии активации разрушения битума и его адгезионных связей,
- определение коэффициентов их чувствительности к механическим напряжениям.

## 2. Материалы и методы

Исследования битума, нанесенного на полированную поверхность гранита, выполненные с помощью инфракрасной спектроскопии, показали, что частота атомов в молекулах асфальтенов непосредственно возле гранита на порядок выше, чем в остальном объеме битума, но на расстоянии не более 50 мкм это явление почти не наблюдается. Увеличение частоты колебания атомов говорит о том, что межатомные связи находятся в сжатом состоянии и следовательно их прочность, и прочность всего битума увеличивается [16-17].

Поскольку толщина слоя битума из-за шероховатостей и неправильности форм минеральных фракций, а также недостаточной степени уплотнения асфальтобетонной смеси колеблется от нескольких микрон до миллиметра и более, прочность его неодинаковая, что приводит к смешанному виду разрушения.

Прочность асфальтобетона – один из самых важных его параметров, поэтому методики ее определения достаточно подробно описаны в ГОСТах и должны строго соблюдаться, как по составу образцов, так и их форме и условиям испытания. С помощью данных методик устанавливается его зависимость от таких внешних параметров как температура, скорость нагружения, влагонасыщения и т.д. Но соотношение сопротивляемости разрушению адгезионных сил и межмолекулярных связей в самом битуме не оценивались. В то же время информация по этому вопросу могла бы более эффективно искать пути увеличения не только прочности, но и долговечности асфальтобетона. Другими словами, речь идет о стабильности прочностных свойств асфальтобетона, как композиционного материала во времени под действием перечисленных выше факторов, прежде всего температуры и нагрузки. В этом отношении достаточно большие возможности предоставляет термофлуктуационная теория прочности, созданная в пятидесятые-шестидесятые годы советским академиком С.Н. Журковым. Согласно этой теории главным разрушающим фактором является подводимая тепловая энергия, а механические напряжения снижают ее уровень необходимый для разрушения в материале межатомных связей. В каноническом виде формула Журкова записывается в виде:

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{u - \gamma \cdot \sigma}{R \cdot T} \quad (1)$$

где  $\tau$  – долговечность материала, (с),  $\tau_0$  – предэкспоненциальный множитель равный  $10^{11}-10^{13}$  с,  $u$  – энергия активации разрушения, (кДж/моль),  $\gamma$  – коэффициент чувствительности материала к механическим напряжениям, ( $\frac{\text{кДж}}{\text{моль} \cdot \text{МПа}}$ ),  $\sigma$  – механические напряжения, (МПа),  $R$  – газовая постоянная, ( $\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ ),  $T$  – температура, (К).

При переменных напряжениях (нагрузках) и температуре формула записывается в виде критерия Бейли:

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

В своих работах профессор Петров В.А. – представитель научной школы С.Н. Журкова показал, что накапливаемые субмикроскопические разрушения приводят к постепенному снижению предела прочности материала или изготовленных из него конструкций. Примерно 90 % времени эксплуатации происходит медленное разупрочнение материала, которое может находиться под контролем, например, методом акустической эмиссии. В соответствии с этим в работе [16] применительно к

адгезионным соединениям была предложена и апробирована другая редакция критерия Бейли:

$$\int_0^{\tau} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u_a - \gamma_a \cdot \sigma(t)}{R \cdot T(t)}} = 1 - \frac{\sigma_{\max}}{[\sigma]_a}, \quad (3)$$

где  $[\sigma]_a$  - начальная адгезионная прочность, (МПа),  $\sigma_{\max}$  - напряжения, возникающие при максимальной нагрузке, (МПа),  $u_a$  - энергия активации разрушения адгезионных связей, (кДж/моль).

После ряда теоретических и экспериментальных исследований была выдвинута и подтверждена гипотеза, что адгезионные связи между битумом и минеральным материалом возникают в результате появления активных радикалов при термодеструкции битума, что особенно важно и его асфальтенов. Было также высказано предположение о том, что возникшие адгезионные связи сразу после образования, в свою очередь, подвергаются термодеструкции, т.е. одновременно происходят два процесса: возникновение адгезионного соединения и его разрушение. Это явление описывается выражением 4:

$$N = z \cdot \frac{t}{\tau_0 \exp \frac{u_a - \gamma_a \cdot \sigma}{R \cdot T}} \left( 1 - \frac{t}{2\tau_0 \exp \frac{u_a - \gamma_a \cdot \sigma}{R \cdot T}} \right), \quad (4)$$

где  $N$  - количество возникших и сохраняющихся адгезионных связей на момент времени  $t$ ,  $z$  - коэффициент меньше единицы, отражающий то, что не все образовавшиеся активные радикалы образуют связи с минеральными материалами.

Проведенные экспериментальные исследования по изучению адгезионной прочности соединения гранитных образцов, склеенных битумом при температурах приготовления асфальтобетонных смесей и различной продолжительностью ее термостатирования при этой же температуре показали, что зависимость прочности от его продолжительности имеет свой экстремум. В результате из выражения (4) была получена формула для определения  $u_a$  - энергии активации разрушения адгезионных связей:

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

где  $t_*$  - продолжительность термостатирования, после которой возникала максимальная адгезионная прочность, (с).

Остался вопрос определения величины  $u_a$  - энергии активации разрушения связей в самом битуме. Для этого предлагается использовать следующую полученную математическую зависимость:

$$u_a = \frac{\ln \left( 1 - \frac{t_*}{2\tau_0 \exp \frac{u_a}{RT_1}} \right) - \ln \left( 1 - \frac{t_*}{2\tau_0 \exp \frac{u_a}{RT_2}} \right) - \ln \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]_2}}{\frac{1}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)}, \quad (6)$$

где  $[\sigma]_1$  и  $[\sigma]_2$  адгезионная прочность склеенных битумов образцов при температурах  $T_1$  и  $T_2$  и выдержанных при этих температурах одинаковое время  $t_*$ .

Процессы термодеструкции и образования адгезионных связей происходят в асфальтобетонной смеси во время следующих последовательных фаз: приготовление (перемешивание всех составляющих, включая битум), выдерживание в бункерах или силосах и транспортирование к месту укладки в дорожное покрытие в режиме некоторого понижения температуры, но во всех перечисленных фаз физико-механические процессы протекают при высокой температуре.

После окончания укладки дорожного покрытия в процессе его эксплуатации окончательно сформировавшийся асфальтобетон уже подвергается механическим нагрузкам в условиях сложного напряженного состояния и температурного воздействия довольно широкого диапазона. Можно предположить, что в это время происходят процессы уже механико-термической деструкции.

С позиции термофлуктуационной теории прочности расчет долговечности асфальтобетона можно произвести с помощью одного из двух выражений.

Первое:

$$z \left( N_m - \int_0^{t_s} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u_a - \gamma_a \sigma(t)}{RT(t)}} \right) = 1 - \frac{\sigma_{\max}}{[\sigma]}, \quad (7)$$

где  $\gamma_a$  - коэффициент чувствительности адгезии к механическим напряжениям.

Второе выражение:

$$z \left( N_m - \int_0^{t_s} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u_\sigma - \gamma_\sigma \sigma(t)}{RT(t)}} \right) = 1 - \frac{\sigma_{\max}}{[\sigma]} \quad (8)$$

На первом этапе рассчитываются значения величин:  $A = u_a - \gamma_a \sigma(t)$ ,  $B = u_\sigma - \gamma_\sigma \sigma(t)$ . Если оказывается, что  $A$  больше  $B$ , то будет иметь место когезионное разрушение. Расчет следует проводить по формуле (8). Если  $A$  меньше  $B$ , то ожидается разрушение адгезионное, применяется формула (7).

Во всех случаях встает вопрос о разработке методик определения величин коэффициентов  $\gamma_a$  и  $\gamma_\sigma$ , т.к. описание методики определения энергии активации процессов разрушения адгезии  $u_a$  и битума  $u_\sigma$  были разработаны и описаны ранее [17].

Для определения  $\gamma_a$  адгезионного соединения битума БНД 60/90 склеенные им при температуре 140 °С гранитные образцы нагружались постоянной сдвигающей нагрузкой, создающей в склейке напряжения в 85 % от заранее определенного предела прочности.

Из выражения (3) при постоянной температуре с учетом того, что нагрузка обеспечивается в склейке битумом напряжения 85 % от предела прочности можно записать:

$$u_a - RT(\ln \tau - 25,7) = 0,85 \gamma_a [\sigma]_a, \quad (9)$$

Откуда следует:

$$\gamma_a = \frac{u_a - RT(\ln \tau + 25,7)}{0,85 [\sigma]_a} \quad (10)$$

Аналогично выражению (10) может быть записано выражение для расчета коэффициента чувствительности самого битума к напряжениям на сдвиг:

$$\gamma_{\sigma} = \frac{u_{\sigma} - RT(\ln \tau + 25,7)}{\sigma}, \quad (11)$$

где  $\sigma$  - создаваемые касательные напряжения. Опытным путем было установлено, что их величина должна быть значительно меньше, чем при нагружении склеенных битумом образцов.

Сложность определения коэффициента чувствительности к механическим напряжениям самого битума состоит в том, что в реальных условиях его нагружение происходит, когда он находится в виде тонкого слоя в замкнутом объеме после воздействия на него температуры, при которой происходит приготовление горячей асфальтобетонной смеси. Поэтому была принята следующая методика подготовки образца битума и его разрушение на сдвиг.

Подготовка испытания битума начинается с формирования образца в виде тонкого диска. Для этого он, разогретый до температуры, соответствующей исследуемому режиму приготовления асфальтобетонной смеси, заливается в металлическое кольцо 1 (рис. 1), установленное на термоизоляционный керамический материал 4. Заранее отмеривается такое количество битума, которое после поджатия пуансона 3 до упора его бурта в кольцо 1 формировало битумный слой 2 толщиной около 2 мм. После этого вместе с керамической плитой образец помещался при той же температуре в термостат, где выдерживался при заданном условии эксперимента время.

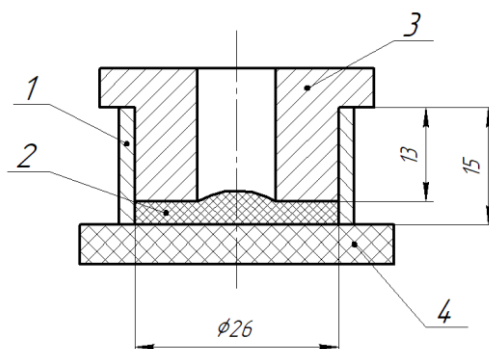


Рис.1. Формирование битумного образца-диска: 1-металлическое кольцо, 2- битум, 3-пуансон, 4- керамическая плитка (иллюстрация авторов)

Fig.1. Formation of a bitumen sample disk: 1-metal ring, 2- bitumen, 3-punch, 4-ceramic tile (illustration by the authors)

После термостатирования образец вместе с формой охлаждался до нормальной температуры. Затем кольцо 1 вместе с сформировавшимся в нем диском битума 2 помещалось в нагружающее устройство, изображенное на рис.2.

Конструкция устройства позволяет сдвигать битум по кольцевой поверхности (в данном случае диаметр 26 мм), исключая его любое другое перемещение благодаря поджатию гайкой 3 кольца 1 и цилиндра 4. Таким образом, обеспечиваются условия чистого сдвига, аналогичные условиям деформирования битумного слоя в замкнутых объемах асфальтобетона.

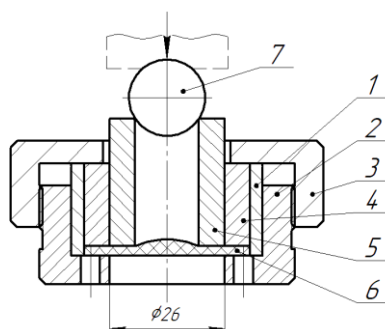


Рис. 2. Устройство для испытания образцов из битума на срез  
1-кольцо, 2-оправка, 3-поджимная гайка, 4-поджимной цилиндр, 5-пуансон, 6-битум, 7-металлический шарик (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Device for shear testing of bitumen samples  
1-ring, 2-mandrel, 3-pressure nut, 4-pressure cylinder, 5-punch, 6-bitumen, 7-metal ball  
(illustration by the authors)

### 3. Результаты и обсуждения

На первом этапе экспериментирования по описанной выше методике была определена прочность на срез образцов битума БНД 60/90 сформированных при температуре 140 °С без термостатирования и с термостатированием (выдержкой при температуре 140 °С) в течение 72 часов. Были испытаны четыре состава битума: без модификаторов, с добавлением минерального порошка, с модификатором Амдор-10, с добавлением 4% порошка железного сурика  $Fe_2O_3$ . Результаты испытания представлены в виде таблицы 1.

Таблица 1

Битум	Прочность битума на срез	
	Прочность, МПа	
	Без термостатирования	После термостатирования
Без модификатора	0,048	0,081
С минеральным порошком	0,091	не испытывались
с Амдор-10	0,085	не испытывались
с 4% $Fe_2O_3$	0,161	0,468

На втором этапе эксперимента по испытанию битума на срез исследовалась чувствительность битума к механическим напряжениям, т.е. значение коэффициента  $\gamma_{\sigma}$  без термостатирования, после термостатирования и модификатором  $Fe_2O_3$ .

Для этого образцы, установленные в оправку 2 (рис. 2), с помощью рычажного специального устройства нагружались статической сдвигающей нагрузкой. С помощью электронных часов и контактного датчика фиксировалось время  $\tau$  до разрушения испытуемого образца.

По величине действующих напряжений и продолжительности  $\tau$  с помощью формулы (11) рассчитывался коэффициент  $\gamma_{\sigma}$  чувствительности битума к механическим напряжениям. Результаты в виде графиков представлены на рис. 3.

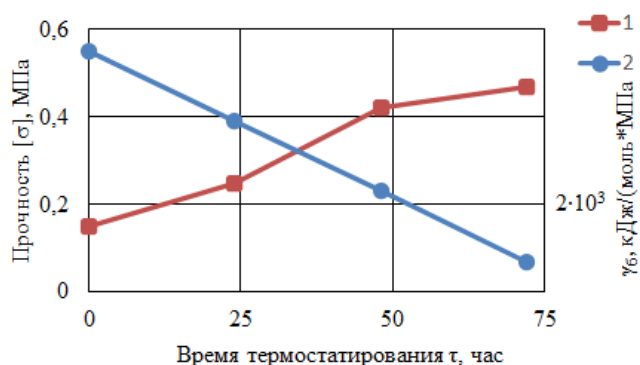


Рис. 3. Зависимость прочности битума на сдвиг  $[\sigma]$  - 1, и коэффициента его чувствительности к механическим напряжениям – 2 от термостатирования при 140 °С (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Dependence of bitumen shear strength  $[\sigma]$  - 1, and the coefficient of its sensitivity to mechanical stress - 2 on temperature control at 140 °С (illustration by the authors)

На третьем этапе эксперимента проводились нагружение статической нагрузкой склеенных битумом гранитных образцов с разной продолжительностью термостатирования. Поскольку прочность битумного слоя в склейке оказалась значительно выше, чем при испытаниях битумных дисков, предварительно определялась прочность при нагрузке со скоростью движения нагружающего пуансона 6 мм/с. Полученные результаты этих испытаний представлены на рис. 4.

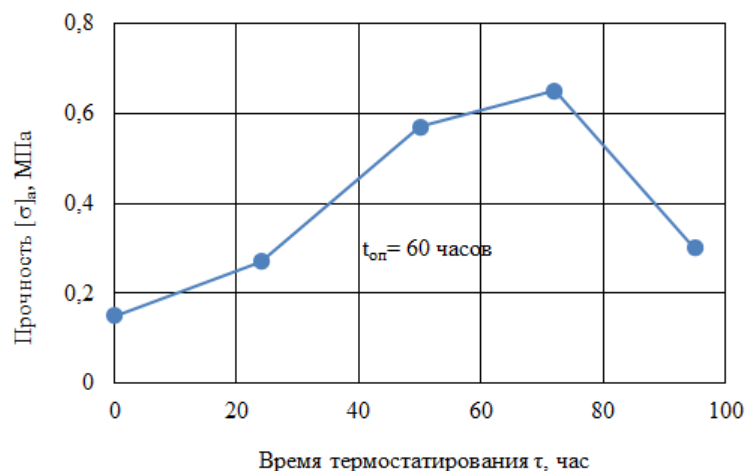


Рис. 4. Зависимость адгезионной прочности битума БНД 60/90 и гранита от времени термостатирования при температуре 140 °С (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Dependence of the adhesive strength of BND 60/90 bitumen and granite on temperature control time at a temperature of 140 °С (illustration by the authors)

В многочисленных исследованиях, которые проводятся на территории России [18-20] и за рубежом [21-22] доказано, что физико-механические свойства битумных вяжущих в асфальтобетоне могут быть значительно улучшены применением в них модификаторов. Сомнительно, что они могут заметно повлиять на энергию активации разрушения межмолекулярных связей внутри битума или его адгезии, а вот на прочность самого битума, т.е. коэффициент чувствительности к механическим напряжениям, некоторые модификаторы не влияют. Это подтвердили и проведенные эксперименты, результаты которых представлены в таблице 1, где эксперименты проводились с немодифицированным и модифицированным битумом.

Следующим этапом исследования была определена чувствительность к механическим нагрузкам уже не самого битума, а его адгезии в соединении с гранитом – коэффициент  $\gamma_a$ . Рассматривался также вопрос о его зависимости от применения



модификаторов битума, в частности на примере мелкодисперсного порошка железного сурика ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) и термостатирования после возникновения контакта битума и минерального материала, в данном случае гранита. Термостатирование проводилось так же, как и ранее при  $140^\circ\text{C}$  в течение 72 часов. Проведенные до этого исследования показали, что такой режим обеспечивает значительное увеличение адгезионной прочности. В данном случае стоял вопрос о стабильности этой прочности во времени под нагрузкой.

Величина коэффициента  $\gamma_a$  рассчитывалась по формуле (10). Ее зависимость от термостатирования и модифицирования битума железным суриком представлены графиками на рис. 5.

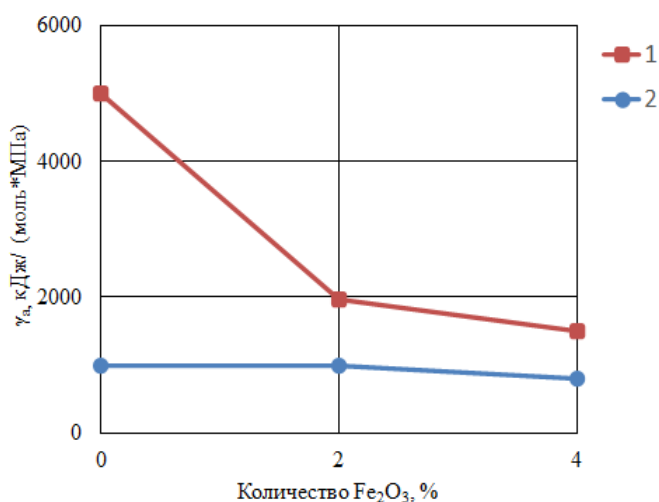


Рис. 5. Влияние  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и термостатирования на чувствительность адгезионной прочности и механической нагрузки  $\gamma_a$ : 1 – без термостатирования, 2 – после термостатирования при  $140^\circ\text{C}$  72 часа (иллюстрация авторов)

Fig. 5. The influence of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and temperature control on the sensitivity of adhesive strength and mechanical load  $\gamma_a$ : 1 – without temperature control, 2 – after temperature control at  $140^\circ\text{C}$  for 72 hours (illustration by the authors)

#### 4. Заключение

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В сопротивлении разрушению асфальтобетона имеют место три реактивные составляющие: адгезия битума и минеральных фракций, сопротивление битума деформации на сдвиг и механическое зацепление минеральных фракций разной дисперсности. Важно знать долю каждого из этих составляющих из их соотношения для того, чтобы определить первостепенное направление повышения прочности и долговечность асфальтобетона.

2. Значение энергии активации разрушения адгезионных связей выше, чем самого битума. Следовательно, разрушение асфальтобетона, если не применяется его правильное термостатирование и применяемый битум не модифицирован, будет иметь когезионный характер.

3. Для разработки технологии технологических процессов приготовления асфальтобетонных смесей, их составов и оценки долговечности под воздействием нагрузок в качестве критериев желательнее использовать значения энергии активации разрушения битума и его адгезионных связей, а также коэффициенты их чувствительности к механическим напряжениям. Для определения этих характеристик могут быть применены уже разработанные и описанные методики.

**Список литературы/References**

1. 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. P. 95-101. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.169>
2. 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>
3. Абдуллин А.И., Емельянычева Е.А., Дияров И.Н. Оценка адгезии битума к минеральному материалу в асфальтобетоне на основе его смачивающих свойств // *Вестник Казанского технологического университета*. 2009. Т.4. С. 256-259. [Abdullin A.I., Emelyanycheva E.A., Diyarov I.N. Evaluation of the adhesion of bitumen to mineral material in asphalt concrete based on its wetting properties // *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2009. Vol.4. P. 256-259].
4. 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>
5. Страхова Н.А., Цамаева П.С., Эльмурзаев А.А. Методы улучшения адгезионных свойств битумов к минеральным материалам // *Вестник ГГНТУ. Технические науки*. 2020. Т. 16. № 4(22). С. 29-35. [Strakhova N.A., Tsamaeva P.S., Elmurzaev A.A. Methods for improving the adhesion properties of bitumen to mineral materials // *Bulletin GGNTU. Technical science*. 2020. Vol. 16. № 4(22). P. 29-35]. <https://doi.org/10.34708/GSTOU.2020.25.57.004>
6. Галкин А.В., Париг Я.И. Условия определения когезионной прочности битумного вяжущего // *Вестник ХНАДУ*. 2017. вып. 79. С. 47-51. [Galkin A.V., Parig Ya.I. Conditions for determining the cohesive strength of bitumen binder // *Bulletin of KhNADU*. 2017. Iss. 79. P. 47-51].
7. Тюкилина П. М., Зиновьева Л.В., Егоров А.Г. Влияние облагораживания нефтяного сырья на когезионные и деформативные свойства дорожных битумов // *Нефтепереработка и нефтехимия*. 2017. № 5. С. 13-18. [Tyukilina P. M., Zinovyeva L. V., Egorov A. G. Influence of refinement of petroleum raw materials on the cohesive and deformative properties of road bitumen // *Oil refining and petrochemistry*. 2017. № 5. P. 13-18].
8. Ларина Т. А., Зубарев Н.Р. Модель износа асфальтобетонных покрытий при эксплуатации дорог // *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2019. № 2(88). С. 29-31 [Larina T. A., Zubarev N. R. Model of wear of asphalt concrete pavements during road operation // *Science and technology in the road industry*. 2019. № 2(88). P. 29-31].
9. Васильев А. Ю., Спиридонова Л.В. Изучение влияния шипованных шин на износ дорожного покрытия // *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. 2019. № 1(19). С. 15. [Vasiliev A. Yu., Spiridonova L. V. Study of the influence of studded tires on the wear of road surfaces // *Automobile. Road. Infrastructure*. 2019. № 1(19). P. 15].
10. Applications of Machine Vision-Quality Control, Cancer Detection and Traffic Surveillance // Lund university (Sweden) website. URL: [http://www.maths.lu.se/fileadmin/math/personal\\_staff/hanna/phd\\_thesis.pdf](http://www.maths.lu.se/fileadmin/math/personal_staff/hanna/phd_thesis.pdf) (reference date 26.12.2023).
11. 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> [Kopylov V.E., Burenina O.N. Asphalt concrete using mineral powders activated by oil sludge // *Oil and Gas Engineering*. 2022. Vol. 20, № 5. P. 87–93. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-5-87-93>].
12. Yuan, J. LED-based measurement system for affinity between bitumen and aggregate / J. Yuan, W. J. Dong, J. J. Chen и др. // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 81. P. 298–302. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.066>

13. Migle Paliukaitea, Viktoras Vorobjovasa, Matas Buleviciusb, Vitalijus Andrejevasa Evaluation of different test method for bitumen adhesion properties // *Transportation Research Procedia*. 2016. Vol. 14. P. 724-731. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.339>
14. Zhang J., Apeageyi A. K., Airey G. D. Influence of aggregate mineralogical composition on water resistance of aggregate-bitumen adhesion // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2015. Vol. 62. P. 45-54. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.06.012>
15. Polacco G., Filippi S., Merusi F., Stastna G. A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2015. Vol. 224. P. 72-112. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.07.010>
16. Рудской А.И., Башкарев А.Я., Бессонова В.Ю. Применение термофлуктуационной теории прочности для расчета долговечности адгезионных соединений на примере гранитно-битумных композитов// *Современное машиностроение. Наука и образование*. 2023. № 12. С. 505-520. [Rudskoy A.I., Bashkarev A.Ya., Bessonova V.Yu. Application of thermal fluctuation theory of strength to calculate the durability of adhesive joints using the example of granite-bitumen composites // *Modern mechanical engineering. Science and education*. 2023. № 12. P. 505-520]. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id23-555>
17. 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. <https://doi.org/10.4123/CUBS.108.2>
18. Vdovin E. A., Bulanov P. E., Mavliev L. F. Modification of bituminous binders with styrene-butadiene-styrene copolymer and sulfur // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2022. № 7(105). P. 10504. <https://doi.org/10.4123/CUBS.105.4>
19. Буланов П. Е., Мавлиев Л. Ф., Вдовин Е. А., Баранов В. А. Влияние эластомера на динамическую вязкость полимерно-битумных вяжущих // *Транспорт и логистика устойчивого развития территорий, бизнеса, государства (драйверы роста, тренды и барьеры) : Материалы II Международной научно-практической конференции, Москва, 30 марта 2023 года. – Москва: Государственный университет управления*. 2023. С. 49-51. [Bulanov P. E., Mavliev L. F., Vdovin E. A., Baranov V. A. The influence of elastomer on the dynamic viscosity of polymer-bitumen binders // *Transport and logistics of sustainable development of territories, business, state (growth drivers, trends and barriers): Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference, Moscow, March 30, 2023. – Moscow: State University of Management*. 2023. P. 49-51]
20. 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). [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)].
21. Porto M. Bitumen and bitumen modification: A Review on Latest Advances / P. Caputo, V. Loise, S. Eskandarsefat, B. Teltayev, C. Rossi // *Appl. Sci*. 2019. № 9. P. 742. <https://doi.org/10.3390/app9040742>
22. Gawdzik Barbara, Tadeusz Matynia and Krzysztof Blazejowski. The use of Devulcanized recycled rubber in the modification of road bitumen // *Material* 2020. 13(21), P.1-21. <https://doi.org/10.3390/ma13214864>

### **Информация об авторах**

**Бессонова Виктория Юрьевна**, аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация  
*Email: bessonova\_vyu@spbstu.ru*, *ORCID: 0000-0003-1942-5562*

### **Information about the authors**

**Victoria Yu. Bessonova**, post-graduate student, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation  
*Email: bessonova\_vyu@spbstu.ru*, *ORCID: 0000-0003-1942-5562*