

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ШВОВ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

Заместитель технического директора
по новым технологиям,
соискатель **А.М. Исаков**
(ООО «БИТУМ»),
канд. хим. наук **Д.Ю. Небрatenko**
(ФАУ «РОСДОРНИИ»)

Контактная информация: nebratenko@rosdornii.ru

В статье рассматривается способ повышения надежности деформационных швов мостовых сооружений. Описаны подходы к формированию адгезионных соединений и рассмотрены особенности их работы.

Ключевые слова: асфальтобетонные покрытия, открытые деформационные швы, закрытые деформационные швы, бетон, адгезионные соединения.

ВВЕДЕНИЕ

Мостовые сооружения расположены во всех регионах Российской Федерации и имеют первостепенное значение для обеспечения транспортной доступности. Такие сооружения являются достаточно сложно возводимыми, материало- и трудозатратными. Поэтому необходимо стремиться к повышению надежности как самого мостового сооружения, так и составляющих его элементов и конструкций. Основная задача деформационных швов мостовых сооружений – сохранение целостности и герметичности между пролетными строениями, а также между пролетными и опорными частями мостовых конструкций, работающих под высокими динамическими знакопеременными нагрузками. Это особенно важно обеспечить в условиях низких температур окружающего воздуха, поскольку любые ремонтные работы в указанных условиях связаны со значительными трудностями.

С понижением температуры окружающей среды происходит термоусадка композиционного материала и бетонные элементы конструкций изменяют свои геометрические размеры: происходит сжатие плит пролетных строений и увеличение геометрического размера деформационного шва (расширение зазора между соседними плитами). Кроме того,

все эти температурные напряжения происходят при периодически частых перемещениях пролетных строений, возникающих в результате движения транспортных средств.

Мастика, находящаяся в деформационном шве (с щебеночным или мастичным заполнением), должна в указанных условиях сохранять высокую эластичность, однородность и одновременно обеспечивать надежный контакт герметизирующего материала с поверхностью стенки камеры шва. Таким образом, задача рассмотренного в данной статье исследования заключалась в оптимизации состава и структуры деформационного шва с целью обеспечения его повышенной работоспособности в жестких условиях эксплуатации. Решение данной задачи позволит обеспечить надежность адгезионного соединения, эксплуатируемого при достаточно низких температурах и подвергающегося регулярным динамическим нагрузкам.

Одним из наиболее распространенных типов заполнителей деформационных швов благодаря своим универсальным адгезионным свойствам по отношению к субстратам различной природы (металлам, резине, бетону и т.п.) и простоте применения являются мастики на основе нефтяных битумов и бутадиен-стирольных термоэластопластов [1].

В состав мастик стандартной рецептуры входят следующие основные ингредиенты: битумы нефтяные дорожные вязкие, пластификаторы нефтяные, бутадиен-стирольные термоэластопласты, наполнители и регуляторы адгезии. Благодаря способности бутадиен-стирольных термоэластопластов к образованию пространственной трехмерной сетки вследствие набухания в компонентах нефтяных пластификаторов [2], клеевая пленка после приведения в контакт со склеиваемой поверхностью должна обеспечивать достаточную прочность адгезионного соединения без применения прижимных устройств в период ее отверждения. Однако, как показала практика эксплуатации мостовых конструкций [3], зачастую именно прочность крепления мастики к поверхности деформационного шва недостаточна, а адгезионное соединение в целом нуждается в доработке.

С целью обеспечения эффективной работы деформационного шва при отрицательных температурах, когезионная прочность битумно-полимерной мастики не должна превышать адгезионную прочность на границе раздела фаз *мастика – стенка деформационного шва*. В этом случае прочностные характеристики мастичного шва будут находиться на уровне прочности крепления мастики к поверхности субстрата.

Чаще всего понижение температуры делает мастики более жесткими, что приводит к увеличению прочностных показателей массива мастики.

Если при этом величина когезионной прочности превышает адгезионное взаимодействие на границе раздела *субстрат – мастика*, то происходит отслоение массива мастики от стенки деформационного шва, при нарушении его герметичности, что влечет за собой нарушение целостности деформационного шва и, как следствие, конструкции в целом.

Наиболее эффективным и достаточно легко реализуемым в промышленных масштабах вариантом повышения прочности связи *мастика-субстрат* является способ предварительной обработки поверхности промежуточными грунтовочными композициями, близкими по составу к мастике и способными взаимодействовать с активными центрами на рабочей поверхности субстрата, содержащего в своем составе неорганические компоненты [2].

Поэтому авторами данной статьи была сформулирована задача по разработке состава полимерной грунтовочной композиции на основе бутadiен-стирольных термоэластопластов, из состава которой (в отличие от битумно-полимерной мастики) исключены битумные компоненты.

В процессе подбора данного грунтовочного состава учитывались стандартизованные требования по относительному удлинению при отрицательных температурах, регламентированные ОДМ 218.2.025-2012 «*Деформационные швы мостовых сооружений на автомобильных дорогах*» [4].

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе работы исследовалась тройная система грунтовочного состава, представляющего собой толуольный раствор бутadiен-стирольного термоэластопласта линейного строения ДСТ 30-01 [5], нефтеполимерной смолы С₉ [6] и, в качестве компонента смесового растворителя, галогенсодержащей жидкости метиленхлорида СН₂Сl₂ [7].

Оптимизация соотношения компонентов проводилась методом планирования эксперимента с использованием программно-информационного комплекса Table Curve 3D [8, 9].

Благодаря исключению из состава грунтовки нефтяного дорожного битума и замене его на органический растворитель (систему растворителей), удалось добиться следующего:

- снижения общей вязкости системы;
- повышения удобоукладываемости (технологичности нанесения) слоя грунтовки на внутреннюю вертикальную часть деформационного шва;
- снижения времени высыхания «до отлипа»;
- повышения технологичности применения грунтовки;

- обеспечения возможности успешного использования грунтовки в труднодоступных местах мостовых конструкций, а также ее нанесения аэрозольным методом, снижающим время «высыхания».

Применение галогенпроизводных органических соединений различного строения и разных технических марок, вероятно, должно обеспечить не только высокий уровень прочности адгезионного соединения, но и возможность варьирования способов нанесения и режимов применения вышеуказанного типа мастик. Указанные подходы могут обеспечить технологичность использования грунтовочного состава на реальных объектах применения.

В разработанный состав грунтовки входит термоэластопласт линейный бутadiен-стирольный ДСТ 30-01 (БСТЭП). Он представляет собой продукт блоксополимеризации стирола и бутadiена в растворе углеродородов в присутствии литийорганического катализатора. Применение БСТЭП в качестве полимерной основы клеевых композиций позволяет получить высокую когезионную прочность клеевых плёнок при растяжении без наполнения и вулканизации, обеспечивает необходимую прочность крепления к различным материалам при модификации целевыми добавками [2]. При этом выбран именно БСТЭП линейного строения, поскольку разветвленные марки БСТЭП обладают большей молекулярной массой и при той же массовой доле в составе грунтовки обуславливают значительно более высокую вязкость, что ухудшает технологичность нанесения грунтовки на субстрат, повышает ее расход, и делает ее слой более толстым и неравномерным, а значит дефектным, что впоследствии может стать причиной его разрушения и преждевременного отрыва мастики от поверхности субстрата [9].

Второй компонент грунтовки – продукт термической полимеризации фракции С₉ – нефтеполимерная смола «Сибпласт», являющаяся побочным продуктом ряда процессов производственного цикла Ангарской нефтехимической компании.

Традиционно нефтеполимерными смолами считают продукты полимеризации арилалкен-, диен-, циклодиен-, олефин- и циклоолефинсодержащего нефтяного сырья, представляющие собой твердые аморфные термопластичные полимеры с низким молекулярным весом (300-3000). Известно, что нефтеполимерные смолы применяются как основное вещество в клеях-расплавах и как адгезионный агент (промотор адгезии) в клеях для самоклеящихся материалов [6]. Основное назначение таких смол – повышение клейкости к твердой шероховатой поверхности, как за счет расклинивания, так и за счет взаимодействия с активными кислородсодержащими группами на поверхности твердого субстрата.

В рассматриваемый состав грунтовки также входит метиленхлорид (метиленхлорид) CH_2Cl_2 . Он представляет собой прозрачную жидкость без цвета со сладковатым специфическим запахом эфира, поддается хорошему растворению в органических растворителях. Чистый метиленхлорид (дихлорэтан) относится к 4-ому классу опасности (малоопасные и безопасные вещества) но, тем не менее, требует осторожного обращения, так как обладает высокой летучестью. Поэтому при производстве грунтовки необходимо обеспечить хорошую вентиляцию, избегать контакта с щелочными металлами, а также, по возможности, не использовать латексные перчатки. При этом в результате использования грунтовки отрицательных эффектов не выявлено [10].

Ввиду относительно небольшой стоимости и значительной растворяющей способности по отношению к большому количеству органических веществ, легкости удаления и сравнительно малому токсиковлиянию, метиленхлорид находит широкое применение в качестве общепотребительного промышленного растворителя. Он эффективно растворяет жиры, смолы и битум, входит в состав композиций для обезжиривания различных поверхностей, а также применяется при склеивании некоторых пластических масс [11].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Завершенность предварительной реакции между компонентами нефтеполимерной смолы и метиленхлоридом оценивали по диаграммам динамических нагрузок, возникающих в теле мастики в момент растяжения (рис. 3 а-в). Данные получены на разрывной машине с поверенной климатической камерой при температуре минус $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ со скоростью движения каретки 1 мм/мин.

В момент раскрытия деформационного шва, заполненного мастикой, на границе контакта *субстрат/мастика* возникают напряжения, вызванные соотношением противоположно направленных сил когезии F_c и адгезии F_a . Величина адгезионных сил, возникающих на контакте *мастика/субстрат*, обусловлена наличием или отсутствием грунтовки, а также наличием или отсутствием метиленхлорида в составе грунтовки. Когезионную составляющую массива мастики можно принять постоянной, так как использовалась одна марка крупнотоннажно выпускаемой полимерно-битумной мастики ДШ-85 из одной партии и одной упаковки.

Приведенные на **рис. 3 а** данные указывают, что при когезионном характере разрушения адгезионного соединения (в данном случае отрыва полимерно-битумной мастики ДШ-85, нанесенной на поверхность бетонной плиты без подгрунтовки) уровень когезионных сил с увеличением расстояния между субстратами достигает максимума в точке *A* и начинает превышать уровень адгезионных сил на контакте *субстрат/мастика*.

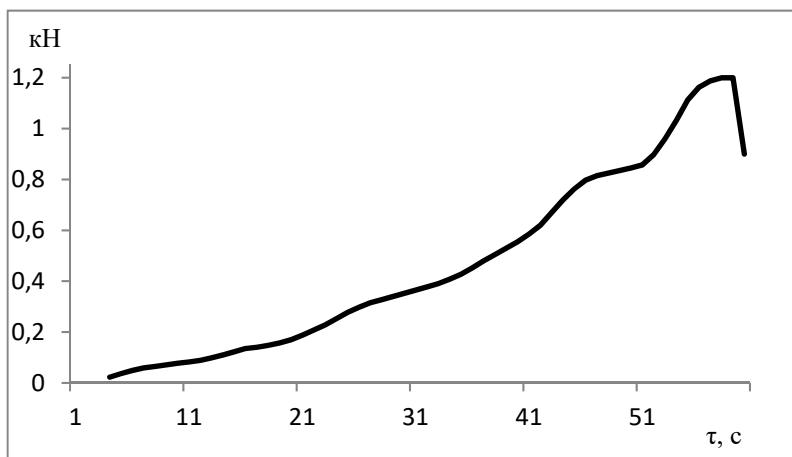


Рис. 3 а. Диаграмма изменения напряжений до момента раскрытия деформационного шва в случае отсутствия грунтовки на поверхности субстрата

В этот момент и происходит резкий отрыв тела мастики от поверхности субстрата. Поверхность бетона оголяется и остается абсолютно чистой.

Наблюдающееся в данном случае ослабление связи на границе *мастика/субстрат* может возникать в результате отсутствия взаимодействия между компонентами мастики и минералами из состава поверхности субстрата, поскольку известно, что бутадиен-стирольные термоэластопласты не могут химически реагировать с алюмосиликатами с образованием прочных соединений [8]. То есть в данном случае наблюдается взаимодействие в месте контакта *субстрат/мастика* за счет частичного заклинивания частиц мастики в порах субстрата.

В случае изменения конструкции клеевого соединения и предварительного нанесения на поверхность субстрата грунтовочной композиции, не содержащей в своем составе метиленхлорид, диаграмма прочности адгезионного соединения приобретает вид, представленный на **рис. 3 б**.

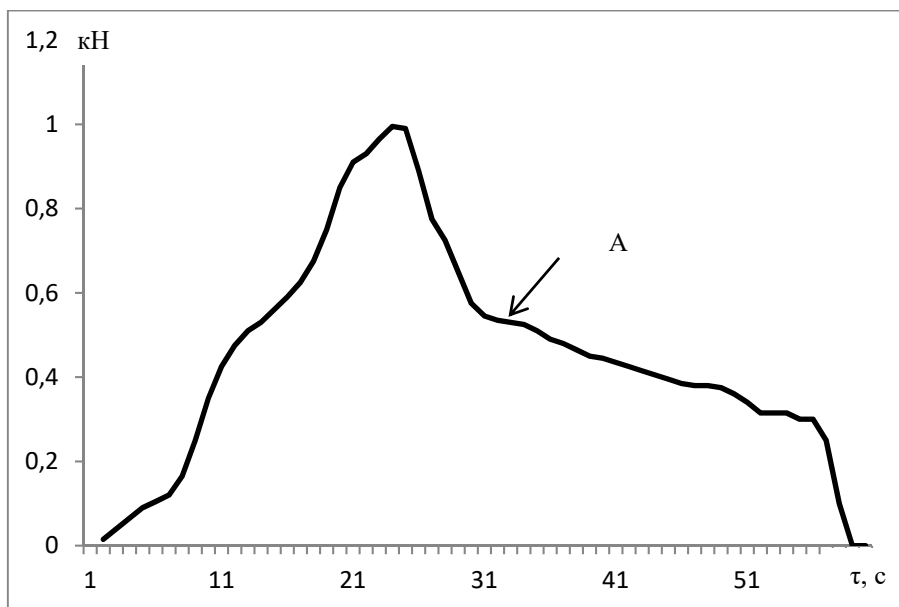


Рис. 3 б. *Диаграмма изменений напряжений до момента раскрытия деформационного шва в случае применения грунтовки, не содержащей в своем составе метиленхлорид*

После прохождения точки *A* отрыв идет не так резко, как на **рис. 3 а**, и продолжается после падения нагрузки до 50 % от пика (точка *A*). При этом отрыв может быть как чисто адгезионный, так и смешанный адгезионно-когезионный.

В отношении рассматриваемого напряжения на контакте *субстрат/мастика* можно сделать вывод, что соотношение сил увеличилось в пользу адгезии, но не настолько, чтобы полностью компенсировать когезионные силы. Шов уже раскрывается на 20-30 % больше без явного отрыва, и отрыв идет более плавно, т.е. мастика на границе раздела *субстрат-мастика* отрывается не резко, а постепенно или дискретно.

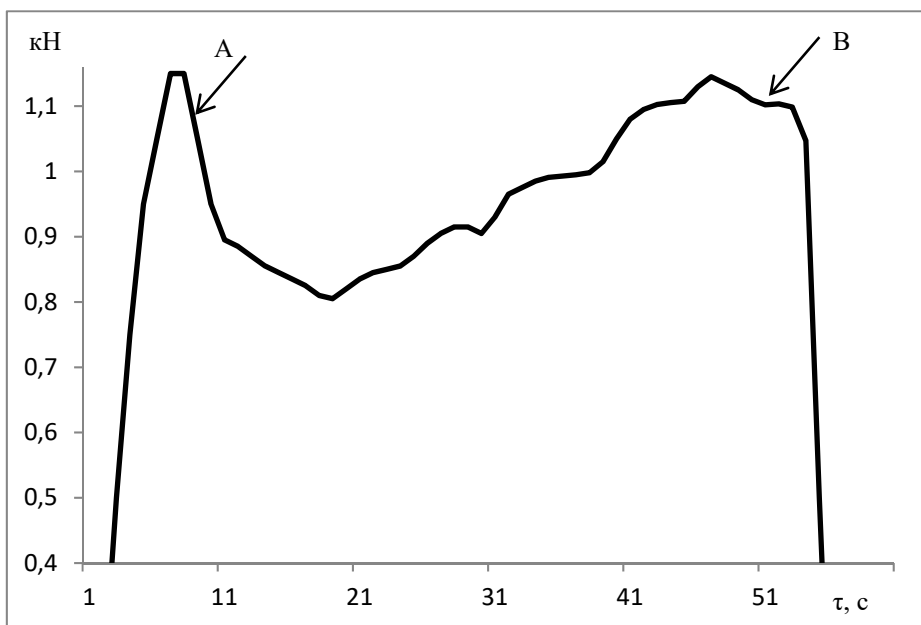


Рис. 3 в. Диаграмма изменения напряжений до момента раскрытия деформационного шва для случая наличия на поверхности субстрата грунтовки с метиленхлоридом

Представленные на **рис. 3 в** данные показывают, что введение в состав грунтовки метиленхлорида положительно влияет на прочностные характеристики самой грунтовки и адгезионного соединения в целом.

В данном случае показана правильная работа мастики на основе бутадиен-стирольного термоэластопласта, в которой соотношения сил адгезии и когезии уравновешены, период раскрытия шва достаточно долгий, при этом отчетливо наблюдается плавный набор пиковой нагрузки. На данном этапе основные растягивающие усилия в мастике воспринимаются асфальтовыми комплексами, не образующими сплошной каркас битумной части мастики, и которые обладают достаточно высокой прочностью и обеспечивают максимальные прочностные показатели в трехкомпонентной системе *мастика/грунтовка/субстрат*.

Однако они разрушаются при продолжении воздействия растягивающих усилий. Затем начинается постепенное снижение величины нагрузки за счет начала работы пространственно-эластичной структуры, которую в битумо-полимерной мастике создают бутадиен-стирольные термоэластопласты. С увеличением растягивающего усилия нагрузка на

звенья полимерных цепочек начинает расти и может доходить до значений точки *A*, далее происходит уже окончательный разрыв по массиву мастики. Типичный когезионный отрыв наблюдается в точке *B*.

Это в очередной раз доказывает, что основная задача любого грунтовочного состава состоит в выравнивании значений разрушающих напряжений от высокомодульных твердых поверхностей (бетон, асфальт, металл) до низкомодульных (в нашем случае – эластичный – полимерно-битумная мастика).

Механизм работы грунтовки между субстратом и мастикой предположительно можно рассматривать как действие сшивающего агента химико-термического действия, так как основным фактором повышения прочности связи *мастика-грунтовка* является наличие стирольных блоков бутадиен-стирольного термоэластопласта и в том, и в другом составах. При заливке горячей мастикой (180-190 °С) и последующем остывании происходит температурное спаивание стирольных блоков. Но основную роль в упрочнении грунтовки играет метиленхлорид.

Данный полярный алифатический растворитель, вводимый в незначительных количествах в неполярный толуол, запускает механизм полимеризации остаточных олигомеров [12] нефтеполимерной смолы и обеспечивает дополнительную, параллельную связь между звеньями бутадиен-стирольных термоэластопластов и олигомерами нефтеполимерной смолы. Еще более важным представляется то обстоятельство, что поляризованный растворитель (диэлектрическая проницаемость 8,75 – 9,05) [12] обеспечивает связь с алюмосиликатными компонентами бетона конструктивного элемента.

Достигнутые преимущества обеспечили возможность гарантировать увеличение ресурса безремонтной эксплуатации деформационных швов мостовых конструкций расположенных в I и II климатических зонах в 1,5 – 2,2 раза (до 5-7 лет). Грунтовки аналогичного состава использованы на мосту через р. Улу-Юл (Первомайское — Улу-Юл, Томская область), в проектах на мосту через р. Лебедь (Турочак, Алтай), на Братском мосту (через р. Енисей).

ВЫВОДЫ

Предложен способ повышения в 2 раза срока службы мастичного деформационного шва в элементах закрытых деформационных швов мостовых конструкций путем предварительного нанесения на субстрат грунтовки, представляющей собой новый полимерный состав на основе нефтеполимерной смолы, бутадиен-стирольных термоэластопластов линейного строения и модификатора класса галогенсодержащих органических соединений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Nebratenko M.Yu. Research properties of polymer solutions and materials received from them / M.Yu. Nebratenko, Yu.N. Filatov, Yu.A. Naumova, L.R. Lusova, D.Yu. Nebratenko A.G. Boksha // Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods and Technologies. – 2010. – Vol. 4. – Part 1. – P. 440-453.*
2. *Лазукин В.В. Разработка состава и технологии приготовления герметика на основе деструктурированного дивинил-стирольного каучука: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 / Лазукин Василий Владимирович; Воронежский ГАСУ. – Воронеж, 2003. – 180 с.*
3. *Яшинов А.Н. К вопросу о повышении надежности мостовых сооружений на автомобильных дорогах / А.Н. Яшинов, А.В. Зубко // ДОРОГИ И МОСТЫ. – 2019. – Вып. 40. – С. 201-210.*
4. *ОДМ 218.2.025-2012. Деформационные швы мостовых сооружений на автомобильных дорогах. – 86 с. – Электрон. данные – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200112562> (дата обращения: 23.08.2019).*
5. *ТУ 2294-021-00148889-2014 на термоэластопласт бутадиен-стирольный ДСТ Л 30-00. – Электрон. данные – URL: <https://sibur-int.ru/upload/iblock/ba8/ba81dab0ae7b5d14f7684e8a63073383.pdf> (дата обращения: 23.10.2019).*
6. *ТУ 2451-01-51513617-2007. Смола нефтеполимерная «Сибпласт». Технические условия». – Электрон. данные – <https://elarum.ru/info/standards/tu-2451-01-51513617-2007/> (дата обращения: 23.08.2019).*
7. *ГОСТ 9968-86. Метилен хлористый технический. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1994. – 18 с.*
8. *Небрatenко Д.Ю. Регулирование адгезионных и когезионных свойств клеевых композиций методом электростимуляции / Д.Ю. Небрatenко, Л.Р. Люсова, В.А. Глаголев, Г.Г. Салыч, Е.Э. Потапов // Каучук и резина. – 1999. – № 5. – С. 25-28.*
9. *Наумова Ю.А. Синергетические системы в многокомпонентных эластомерных материалах: идентификация, анализ, формирование: дис. ... д-ра тех. наук : 05.17.06 / Наумова Юлия Анатольевна;*

Московский государственный университет тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова. – М., 2013. – 309 с.

10. Bestfilament – Электрон. данные – URL: <https://rusabs.ru/product/dihlormetan-metilen-hloristyuu> (дата обращения: 02.10.2019).
11. Метиленхлорид – Электрон. данные – URL: <https://taurus-plus.ru/articles/41/> (дата обращения: 23.08.2019).
12. Соколов В.З. Инден-кумароновые смолы. – М.: Металлургия, 1978. – 216 с.

L I T E R A T U R A

1. Nebratenko M.Yu. Research properties of polymer solutions and materials received from them / M.Yu. Nebratenko, Yu.N. Filatov, Yu.A. Naumova, L.R. Lusova, D.Yu. Nebratenko A.G. Boksha // *Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods and Technologies*. – 2010. – Vol. 4. – Part 1. – P. 440-453.
2. Lazukin V.V. Razrabotka sostava i tekhnologii prigotovleniya germetika na osnove destruktirovannogo divinilstirol'nogo kauchuka: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.05 / Lazukin Vasilij Vladimirovich; Voronezhskij GASU. – Voronezh, 2003. – 180 s.
3. Yashnov A.N. K voprosu o povyshenii nadezhnosti mostovykh sooruzhenij na avtomobil'nyh dorogah / A.N. Yashnov, A.V. Zubko // *DOROGI I MOSTY*. – 2019. – Vyp. 40. – S. 201-210.
4. ODM 218.2.025-2012. Deformacionnye shvy mostovykh sooruzhenij na avtomobil'nyh dorogah. – 86 s. – *Elektron. dannye* – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200112562> (дата обращения: 23.08.2019).
5. TU 2294-021-00148889-2014 na termoelastoplast butadien-stirol'nyj DST L 30-00. – *Elektron. dannye* – URL: <https://sibur-int.ru/upload/iblock/ba8/ba81dab0ae7b5d14f7684e8a63073383.pdf> (дата обращения: 23.10.2019).
6. TU 2451-01-51513617-2007. Smola neftepolimernaya «Sibplast». *Tekhnicheskie usloviya*. – *Elektron. dannye* – <https://elarum.ru/info/standards/tu-2451-01-51513617-2007/> (дата обращения: 23.08.2019).
7. GOST 9968-86. Metilen hloristyj tekhnicheskij. *Tekhnicheskie usloviya*. – М.: Izdatel'stvo standartov, 1994. – 18 s.

8. *Nebratenko D.Yu. Regulirovanie adgezionnyh i kogezionnyh svojstv kleevyh kompozicij metodom elektrostimulyacii / D.Yu. Nebratenko, L.R. Lyusova, V.A. Glagolev, G.G. Salych, E.E. Potapov // Kauchuk i rezina. – 1999. – № 5. – S. 25-28.*
9. *Naumova Yu.A. Sinergeticheskie sistemy v mnogokomponentnyh elastomernyh materialah: identifikaciya, analiz, formirovanie: dis. ...d-ra tekh. nauk : 05.17.06 / Naumova Yuliya Anatol'evna; Moskovskij gosudarstvennyj universitet tonkih himicheskikh tekhnologij im. M.V. Lomonosova. – M., 2013. – 309 s.*
10. *Bestfilament – Elektron. dannye – URL: <https://rusabs.ru/product/dihlormetan-metilen-hloristyy> (data obrashcheniya: 02.10.2019).*
11. *Metilenhlorid – Elektron. dannye – URL: <https://taurus-plus.ru/articles/41/> (data obrashcheniya: 23.08.2019).*
12. *Sokolov V.Z. Inden-kumaronovye smoly. – M.: Metallurgiya, 1978. – 216 s.*

**INCREASING RELIABILITY OF EXPANSION JOINTS OF
BRIDGE STRUCTURES**

*Deputy Technical Director for New Technologies,
External Ph. D. student **A. M. Isakov**
(«BITUM» LLC),
Ph. D. (Chem.) **D.Y. Nebratenko**
(FAI «ROSDORNII»)
Contact information: nebratenko@rosdornii.ru*

The article discusses the way to increase the reliability of expansion joints of bridge structures. The approaches to the formation of adhesive compounds are described and the peculiarities of their work are considered.

Key words: *asphalt concrete pavements, open expansion joints, closed expansion joints, concrete, adhesive compounds.*

Рецензент: канд. техн. наук. М.И. Шейнцвит (ФАУ «РОСДОРНИИ»).
Статья поступила в редакцию: 12.11.2019 г.