



КОМПЛЕКСНО-МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ДОРОЖНЫЕ ГОРЯЧИЕ И ЛИТЫЕ АСФАЛЬТОПОЛИМЕРСЕРОБЕТОНЫ ПОВЫШЕННОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

**В. И. Братчун^{а,1}, В. Л. Беспалов^{а,2}, Е. А. Ромасюк^{а,3}, А. В. Загородняя^{б,4},
О. А. Пшеничных^{а,5}**

^а ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, 86123.

^б ГОУ ВО ЛНР «Луганский национальный университет им. В. Даля»,
20А, кв-л Молодежный, г. Луганск, ЛНР, 91034.

E-mail: ¹bratv09@yandex.ua, ²v.l.btspalov@donnasa.ru, ³Frazer@mail.ua, ⁴housenastya@mail.ru,
⁵o.a.pshenichnyh@donnasa.ru

Получена 03 вересня 2021; принята 10 вересня 2021.

Аннотация. Расчетный срок службы покрытий асфальтобетонных дорог I-а и I-б технических категорий до капитального ремонта (10–12 лет) в Донецкой Народной Республике и в России не выдерживается. После пяти лет эксплуатации они нуждаются в капитальном ремонте [1–3]. Свойства асфальтобетона – композиционного материала с коагуляционным типом контактов – определяются прежде всего качеством органического вяжущего, рациональным сочетанием типов макроструктуры, мезоструктуры и микроструктуры минерального остова, порового пространства, а также энергией взаимодействия на поверхности раздела фаз «органическое вяжущее–минеральный материал» [4–10]. Таким образом, необходимо разрабатывать такие способы направленного регулирования структуры и свойств нефтяных дорожных битумов и повышения энергетического взаимодействия на поверхности раздела фаз «органическое вяжущее–минеральный материал», которые бы позволили асфальтобетону, эксплуатируемому в покрытиях жестких дорожных одежд в климатических условиях и грузонапряженности на автомобильных дорогах Донецкой Народной Республики и в России эффективно противостоять старению, сдвиговым деформациям, низкотемпературному и усталостному трещинообразованию и циклическим транспортным нагрузкам [11–19].

Ключевые слова: комплексно-модифицированные горячие и литые дорожные асфальтополимербетоны повышенной долговечности.

КОМПЛЕКСНО-МОДИФІКОВАНІ ДОРОЖНІ ГАРЯЧІ І ЛИТІ АСФАЛЬТОПОЛІМЕРСЕРОБЕТОНІ ПІДВИЩЕНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ

**В. І. Братчун^{а,1}, В. Л. Беспалов^{а,2}, Є. О. Ромасюк^{а,3}, А. В. Загородня^{б,4},
О. О. Пшеничних^{а,5}**

^а ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,
2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, 86123.

^б ДООУ ВО ЛНР «Луганський національний університет ім. В. Даля»,
20А, кв-л Молодіжний, м. Луганськ, ЛНР, 91034

E-mail: ¹bratv09@yandex.ua, ²v.l.btspalov@donnasa.ru, ³Frazer@mail.ua, ⁴housenastya@mail.ru,
⁵o.a.pshenichnyh@donnasa.ru

Отримана 03 вересня 2021; прийнята 10 вересня 2021.

Анотація. Розрахунковий термін служби покриттів асфальтобетонних доріг I-а і I-б технічних категорій до капітального ремонту (10–12 років) в Донецькій Народній Республіці і в Росії не витримується.

Після п'яти років експлуатації вони потребують капітального ремонту [1–3]. Властивості асфальтобетону – композиційного матеріалу з коагуляційним типом контактів – визначаються перш за все якістю органічного в'язучого, раціональним поєднанням типів макроструктури, мезоструктури і мікроструктури мінерального кістяка, порового простору, а також енергією взаємодії на поверхні розділу фаз «органічне в'язуче–мінеральний матеріал» [4–10]. Таким чином, необхідно розробляти такі способи спрямованого регулювання структури і властивостей нафтових дорожніх бітумів та підвищення енергетичної взаємодії на поверхні розділу фаз «органічне в'язуче–мінеральний матеріал», які б дозволили асфальтобетону, який експлуатується в покриттях нежорстких дорожніх одягів в кліматичних умовах і вантажонапруженості на автомобільних дорогах Донецької Народної Республіки і в Росії ефективно протистояти старінню, зсувними деформаціям, низькотемпературному і втомлесному тріщиноутворенню, і циклічним транспортним навантаженням [11–19].

Ключові слова: комплексно-модифіковані гарячі і літі дорожні асфальтополімербетони підвищеної довговічності.

COMPLEX MODIFIED ROAD HOT AND CAST ASPHALT POLYMER-SULFUR CONCRETE OF INCREASED DURABILITY

Valery Bratchun ^{a,1}, Vitaly Beshpalov ^{a,2}, Evgeniy Romasyuk ^{a,3}, Anastasia Zagorodnyaya ^{b,4}, Oleg Pshenichnykh ^{a,5}

^a Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavin Str., Makeevka, DPR, 83123.

^b V. Dahl Lugansk National University,
20A, quarter Molodezhny, Lugansk, LPR, 91034.

E-mail: ¹bratv09@yandex.ua, ²v.l.beshpalov@donnasa.ru, ³Frazer@mail.ua, ⁴housenastya@mail.ru,
⁵o.a.pshenichnykh@donnasa.ru

Received 03 September 2021; accepted 10 September 2021.

Abstract. Estimated service life of asphalt concrete road pavements, I-a and I-b technical categories before major overhaul (10–12 years) in the Donetsk People's Republic and in Russia is not maintained. After five years of operation, they need major repairs [1–3]. The properties of asphalt concrete – a composite material with a coagulation type of contacts – are determined, first of all, by the quality of the organic binder, a rational combination of types of macrostructure, mesostructure and microstructure of the mineral backbone, pore space, as well as the energy of interaction at the interface between the phases «organic binder–mineral material» [4–10]. Thus, it is necessary to develop such methods of directed regulation of the structure and properties of oil road bitumen and increasing the energy interaction at the interface between the phases «organic binder–mineral material» Donetsk People's Republic and in Russia effectively resist aging, shear deformations, low-temperature and fatigue cracking, and cyclic transport loads [11–19].

Keywords: complex modified hot and cast road asphalt-polymer concretes of increased durability.

Введение

Одними из эффективных полимеров – модификаторов нефтяных дорожных битумов являются бутадиевметилстирольный и дивинилстирольный каучуки, соответственно СКМС-30, АРКМ-15 (ГОСТ 44138-78) и ДСТ-30-01 (ТУ 38.103267-99). В то же время к настоящему

времени недостаточно полно сформулированы теоретические положения получения модифицированных асфальтобетонов повышенной долговечности; не исследованы явления и процессы, происходящие в асфальтобетонах с комплексно-модифицированной микроструктурой; отсутствуют данные об оптимальных концентрационных

отношениях компонентов-модификаторов; о параметрах технологических режимов производства комплексно-модифицированных органических вяжущих, укладки и уплотнения асфальтополимерсеробетонных смесей; недостаточно изучены физические и деформационно-прочностные характеристики комплексно-модифицированных асфальтобетонов.

Цель исследования

Теоретическое и экспериментальное обоснование способов получения технологичных комплексно-модифицированных горячих и литых асфальтополимерсеробетонных смесей для строительства конструктивных слоев нежестких дорожных одежд повышенной долговечности путем установления закономерностей формирования структуры модифицированных органических вяжущих и контактной зоны на поверхности раздела фаз «комплексно-модифицированное органическое вяжущее–поверхностно-активированный минеральный порошок асфальтобетона».

Теоретико-экспериментальные исследования

Современные представления об: условиях работы асфальтобетонов в покрытиях нежестких дорожных одежд; о составе и структуре нефтяных дорожных битумов; о закономерностях структурообразования в концентрированных растворах полимеров, наполненных полимерных системах, битумо- и полимербитумных вяжущих, в асфальтовяжущих веществах и в асфальтобетонах, и использование системного анализа позволили разработать конструктивно-функциональную схему асфальтобетона как открытой системы, обосновать способы направленного регулирования микроструктуры асфальтобетона, разработать концептуальные физико-химические модели формирования оптимальных структур асфальтовяжущих веществ, обеспечивающих повышенную долговечность дорожного асфальтобетона в условиях эксплуатации; оптимизировать составы и структуры систем: «битум–бутадиенметилстирольный каучук –техническая сера»; «битум–дивинилстирольный каучук–техническая сера» с использованием регрессионного анализа параметров многокомпонентных систем с экспериментально-статистическим

описанием областей допустимых значений факторов.

Необходимым условием эффективного влияния полимера на свойства органических вяжущих является их совместимость, которая определяется прежде всего способностью полимера растворяться в вяжущем до молекулярного и надмолекулярного уровня. Только при этом условии можно получить существенное улучшение структуры и свойств органических вяжущих (например, равенство параметров растворимости полимера и дисперсионной среды органического вяжущего). Оптимальные температурно-временные режимы совмещения полимера и нефтяного битума должны обеспечить растворение полимера в битуме без деструкции последнего при достижении максимального значения битумополимерным вяжущим значений эластичности [20, 21].

Для получения сдвигоустойчивого бетона следует проектировать II тип макроструктуры асфальтобетона (поровая), который позволит эффективно использовать как свойства пленок органического вяжущего, разделяющих полидисперсные минеральные частицы, так и пространственный каркаса, образованного зернами щебня и способствующего повышению сдвигоустойчивости за счет увеличения плоскостей скольжения и их шероховатости (достигаются максимальные значения модуля деформации, предела прочности, внутреннего трения и зацепления, исследования В. А. Золотарева) [22].

Структура битумополимерных вяжущих (БПВ) должна характеризоваться оптимальным сочетанием измененной полимером дисперсионной среды органического вяжущего и структурно-механическими характеристиками дисперсной фазы органического вяжущего. Для этого ОВ должно иметь оптимально-структурированную среду (нефтяной дорожный битум III структурно-реологического типа).

Структурная сетка полимера должна сформироваться в ОВ после окончания уплотнения асфальтобетонной смеси или обратимо разрушаться при критических напряжениях.

Введение полимера в ОВ должно повышать или не понижать его адгезию к поверхности минеральных материалов.

Решающее значение для формирования физико-механических свойств композиционных

материалов имеют состояние и свойства граничных слоев на поверхности раздела фаз.

Согласно предложенной концептуальной модели (рисунок 1), поверхностная активация растворами олигомеров или полимеров поверхности минерального порошка (МП) приведет к лучшему совмещению активированного МП с модифицированным органическим вяжущим (при правильном подборе активатора и модификатора), например, с битумополимерным, что обеспечит полное смачивание ее модифицированным органическим вяжущим.

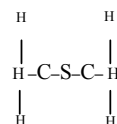
В результате межмолекулярных взаимодействий и диффузионных процессов на границе раздела фаз «активированный МП–модифицированное вяжущее» образуется структурно-упрочненный слой, обеспечивающий высокую адгезионную прочность на ПРФ асфальтобетона.

Модификацию битума бутадиенметилстирольным каучуком СКМС-30 целесообразно вести из раствора в углеводородных фракциях.

Можно предположить, что в этом случае при концентрации СКМС-30 (ДСТ-30-01) 2...3 % мас. в органическом вяжущем в области эксплуатационных температур сформируется термофлуктуационная пространственная полимерная сетка (исследования Л. М. Гохмана) [21]. Узлами цепей из макромолекул и надмолекулярных образований, например, СКМС-30 являются

α -метилстирольные блоки, которые объединяются между собой с понижением температуры до точки перехода полистирола в стеклообразное состояние, а также образованными в результате взаимодействия макромолекул СКМС-30 (ДСТ-30-01) и асфальтенов битума. Прочность термофлуктуационной пространственной полимерной сетки будет определяться количеством узлов и энергией взаимодействия в них, а эластичность – кинетической гибкостью бутадиеновых цепей между узлами сетки.

По мере увеличения концентрации элементарной серы (температура объединения битума и серы 150... 155 °С) должно произойти увеличение общей структурированности системы в результате того, что незначительная часть серы должна принять участие в вулканизации бутадиенметилстирольного (дивинилстирольного) каучука образуются преимущественно моносульфидные



и поперечные полисульфидные связи типа

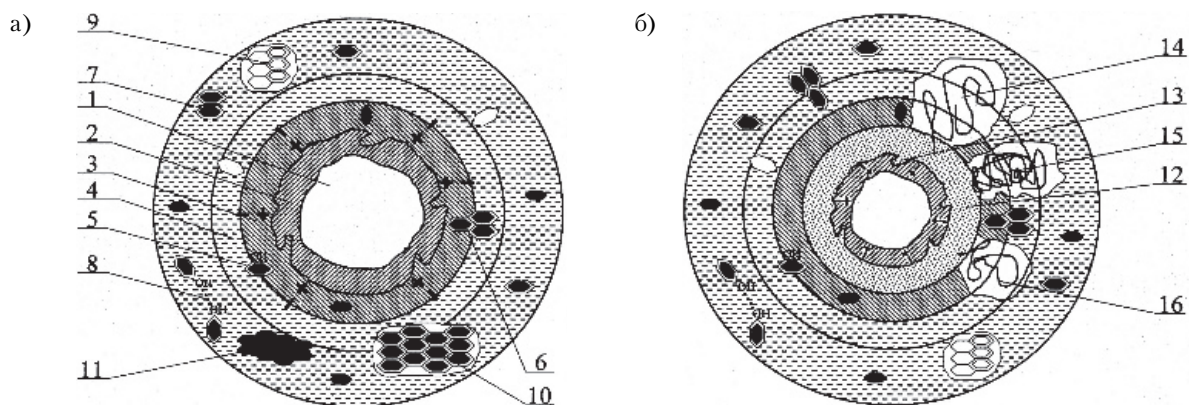
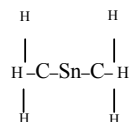


Рисунок 1. Предполагаемая схема формирования межфазного контактного слоя в системе «битумополимерное вяжущее–активированный полимером минеральный порошок»: а) битум–неактивированный минеральный порошок; б) битумополимерное вяжущее–активированный олигомером (полимером) минеральный порошок; 1 – частица минерального порошка; 2, 3, 4 – структурированный, диффузный и объемный слой вяжущего соответственно; 5 – полярное вещество битума; 6 – асфальтены; 7 – смолы; 8 – ассоциативный комплекс; 9 – кристалл полициклического углеводорода; 10, 11 – фрагменты коагуляционной и конденсационной структур; 12 – слой олигомера (полимера) – активатора поверхности МП; 13 – пора, заполненная олигомером (полимером); 14 – фрагмент полимерной сетки; 15, 16 – фрагменты структур с аутогезионными взаимодействиями.

До 10 % мас. серы вступит в химическое взаимодействие с углеводородами битума. Произойдет –S– дегидрирование и образование асфальгеноподобных веществ. Часть серы растворится (20...26 % мас.). Остальная сера должна диспергироваться в битуме до коллоидного состояния. Это приведет к усилению коагуляционного структурообразования в битумополимерсерном вяжущем за счет взаимодействия частиц серы через прослойки полимера. В битумополимерсерном вяжущем возникнет трехмерная сопряженная сетка, узлами которой являются асфальтены, химически связанная сера, кристаллы серы и коллоидно-диспергированная сера.

Активация поверхности минерального порошка СКМС-30 должна привести к формированию на поверхности порошка структурно-упрочненного слоя полимера, который повысит адгезию битумополимер серного вяжущего к поверхности минерального порошка вследствие увеличения количества контактов сегментов надмолекулярных образований сополимера СКМС-30 (ДСТ-30-01) с активными центрами олеофильной поверхности, аутогезии макромолекул СКМС-30 (рисунок 1). Это создаст проч-

ную и эластичную пространственную матрицу асфальтополимерсеробетона с высокой адгезией и когезией, что и определит долговечность модифицированного асфальтобетона.

На рисунке 2 приведена блок-схема получения дорожных комплексно-модифицированных асфальтобетонных смесей с повышенными технологическими свойствами и асфальтополимерсеробетонов повышенной долговечности.

Материалы и методы

Для выполнения экспериментальных исследований приняты:

- в качестве органических вяжущих нефтяные дорожные битумы марок: БНД 40/60, БНД 60/90, соответствующие требованиям ДСТУ 4044-2001 (ГОСТ 22245-90).
- для комплексной модификации микроструктуры асфальтобетонов использованы: каучук синтетический бутадиен-метилстирольный СКМС-30 АРКМ-15 (ГОСТ 11138-78); техническая сера (ГОСТ 127.1-93); блоксополимер на основе стирола и бутадиена марки ДСТ-30-01 (ТУ 38.103267).

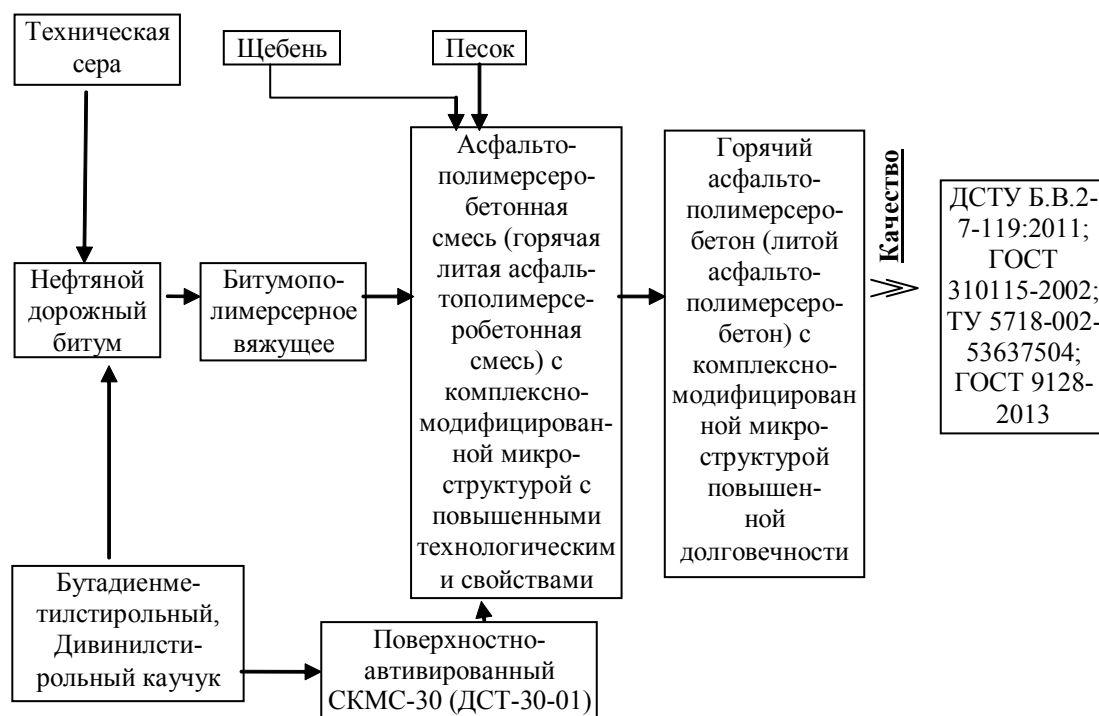


Рисунок 2. Блок-схема получения горячей (литой) асфальтополимерсеробетонной смеси с комплексно-модифицированной микроструктурой.

Использован известняковый минеральный порошок (МП): содержание CaCO_3 – 92 %; удельная поверхность $S_{1,2} = 400 \text{ м}^2/\text{кг}$; плотность – 2715 кг/м^3 ; средняя плотность под нагрузкой 40 МПа – 1880 кг/м^3 ; пустотность – 31,8 %; битумоемкость – 50 %.

- щебень и песок получены дроблением и рассевом гранита Каранского карьера (Донецкая область) со следующими показателями качества: дробимость – 6,2 % (марка щебня по прочности – 1 400); истираемость щебня в полочном барабане – 2,3 %; насыпная плотность щебня – 1410 кг/м^3 ; истинная плотность – 2670 кг/м^3 ; морозостойкость $F > 200$ циклов; содержание зерен лещадной и игольчатой формы – 6,5 %.

При выполнении экспериментальных исследований, кроме стандартных использован ряд специальных методов исследования: калориметрический (микрокалориметр ДАК-I-IA); инфракрасная спектроскопия (спектрометр Spekord IR-75); рентгенофазовые (дифрактометр УРС-50) и др.; исследование усталостной долговечности при действии статических и динамических нагрузок в условиях двухстороннего изгиба выполнено на разработанной установке, которая позволяет исследовать стандартные образцы-балочки ($16 \times 4 \times 4 \text{ см}$) в режиме постоянных циклических нагружений с определением количества циклов до разрушения и замеров величин прогиба образца. Режимы циклического нагружения: нагрузка от 0,1 до 0,5 с, отдых от 0,2 до 0,9 с. Величина циклической нагрузки 10...50 % от разрушающей. Температурные режимы испытаний: -20°C ; -10°C ; 0°C ; 10°C ; 20°C . Стойкость к колееобразованию образцов асфальтобетона определяли на установке Infratest Кат. 20–4 000 при температуре 60°C , определяя глубину формирования колеи после 10 000 и 20 000 циклов прокатывания нагруженного колеса ($p = 0,7 \text{ МПа}$) по EN12697-33. Для определения глубины вдавливания штампа при определении пластичности литых асфальтобетонов, подвижности литых асфальтополимерсеробетонных смесей, устойчивости по Маршаллу, моделирования уплотняемости асфальтобетонных смесей на кафедре автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «ДОННАСА» изготовлены приборы и оборудование в соответствии с нормативными документами, которые аттестованы.

Результаты исследования

Сопоставление рассчитанных параметров растворимости (δ) бутадиенметилстирольного каучука (СКМС-30), дивинил-стирольного сополимера (ДСТ-30-01) и алкановых фракций битума свидетельствует о том, что они имеют близкие значения δ (1).

$$\delta_{\text{СКМС-30}} \approx \delta_p \approx \delta_{\text{ДСТ-30-01}}, \quad (1)$$

где $\delta_{\text{СКМС-30}}$, δ_p , $\delta_{\text{ДСТ-30-01}}$ – параметры растворимости бутадиенметилстирольного каучука, алкановых компонентов битума и дивинил-стирольного сополимера, $\delta_{\text{СКМС-30}} 16,8 \approx \delta_p (15,25 - 16,13) \approx \delta_{\text{ДСТ-30-01}} 17,8 \text{ МДж}^{0,5}/\text{м}^{1,5}$.

Таким образом, оба полимера совместимы с мальгенами битума. Следовательно, битумополимерные вяжущие в области технологических температур $150...155^\circ\text{C}$ должны быть термостабильными и седиментационно устойчивыми.

Микроскопическими исследованиями в проходящем свете с использованием стереомикроскопа Technival-2 CarlZeissJena с подогревающим столиком (увеличение в 125 раз) установлено, что при объединении частиц ДСТ-30-01 (СКМС-30) и мальгеновой фракции битума существует несколько характерных температур: температура набухания ($75...80^\circ\text{C}$), соответствующая переходу частицы дивинилстирольного, бутадиенметилстирольного каучука из стеклообразного в высокоэластичное состояние; температура диспергирования частиц полимера на агрегатобулярные образования под действием давления набухания ($95...100^\circ\text{C}$); температура растворения ДСТ-30-01 (СКМС-30) ($105 - 120^\circ\text{C}$). Оптимальное время приготовления БПВ при температурах растворения $150...155^\circ\text{C}$ составляет 50...70 минут. В этом случае битумополимерные вяжущие характеризуются максимальными значениями эластичности, растяжимости и адгезии.

Совокупность факторов, определяющих физико-механические свойства модифицированного битумополимерсерного вяжущего при взаимодействии с активированной поверхностью, является сложным сочетанием. Поэтому при планировании эксперимента использовался трехфакторный композиционный несимметричный план на трех целочисленных уровнях ($-1; 0; +1$) с коэффициентом корреляции между факторами $r_{ij} < 0.1$, $i, j = 1, 2, 3$ и $i \neq j$ [23].

В качестве факторов, действующих на оптимизируемую систему, приняты: концентрация

полимера активатора (ДСТ-30-01) на поверхности минерального порошка $X_1 = 0,4...1,0\%$; массовая концентрация в битуме технической серы $X_2 = 20...30\%$ и ДСТ-30-01 $X_3 = 1,0...3,0\%$.

Важнейшими свойствами асфальтобетона, предопределяющими долговечность этого материала, является устойчивость его структуры к длительному увлажнению и к трещинообразованию. Поэтому в качестве параметров оптимизации приняты: предел прочности по образующей при 0°C Y_1 ($R_{\text{обр.}}$, не менее $1,5\text{ МПа}$), который характеризует поведение асфальтобетонного покрытия под транспортной нагрузкой в зимнее время, а также косвенно характеризует поведение асфальтобетона при низких температурах и сопротивляемость материала к образованию низкотемпературных трещин; коэффициент водостойкости при длительном водонасыщении Y_2 ($K_{\text{вд.}}$, не менее $0,88$); предел прочности при сжатии при 20°C Y_3 ($R_{\text{сж.}}$, не менее $2,8\text{ МПа}$) (ДСТУ Б В.2.7-119:2011).

Регрессионный анализ выполнен в программе PlanExpB-D13 v.1.0. с построением графиков функции отклика. $R_{\text{обр.}}$ (2), $K_{\text{вд.}}$ (3) и R_{20} (4), которые аппроксимированы полиномами второй степени.

$$Y_1 = 2,34 + 0,176X_3 - 0,322X_1^2 - 2,266X_3^2 - 0,181X_1 \cdot X_3, \quad (2)$$

$$Y_2 = 0,945 + 0,025X_3 - 0,04X_1^2, \quad (3)$$

$$Y_3 = 3,783 + 0,239X_2 + 0,511X_3 - 0,648X_1^2 + 0,15X_2^2 - 0,154X_3^2 - 0,201X_1 \cdot X_2 + 0,229X_2 \cdot X_3, \quad (4)$$

Полученные уравнения регрессии (2–4) проверены на адекватность и удовлетворяют критерию Фишера. Определены доверительные интервалы значений для функций отклика. Выделена область оптимальных значений факторов системы «битум–ДСТ-30-01–техническая сера –МП, активированный ДСТ-30-01», обеспечивающих заданные параметры оптимизации модифицированного асфальто вяжущего вещества (рисунки 3–5, Opt). Характерно, что при всех значениях факторов варьирования предел прочности по образующей (Y_1) обеспечивается.

Таким образом, концентрацию ДСТ-30-01 (СКМС-30) в битуме для систем «битум–дивинил-стирольный сополимер–техническая сера–МП, активированный ДСТ-30-01» следует назначать $2...3\%$ масс., а технической серы $25...30\%$ масс. (рисунок 3).

Концентрация ДСТ-30-01 (СКМС-30) на поверхности минерального порошка в системе «битум–дивинил-стирольный сополимер–техническая сера–МП, активированный ДСТ-30-01» должна быть $0,50...0,75\%$ (рисунки 3–5).

При этом активацию минерального порошка целесообразно вести при введении ДСТ-30-01 (СКМС-30) из раствора в углеводородных растворителях. В этом случае наиболее благоприятным является момент возникновения новых поверхностей, поскольку можно использовать особое энергетическое состояние, присущее лишь свежесформованным поверхностям. Возникновение свободных радикалов вследствие разрыва химических связей, а также изменение структуры поверхностных слоев минеральных

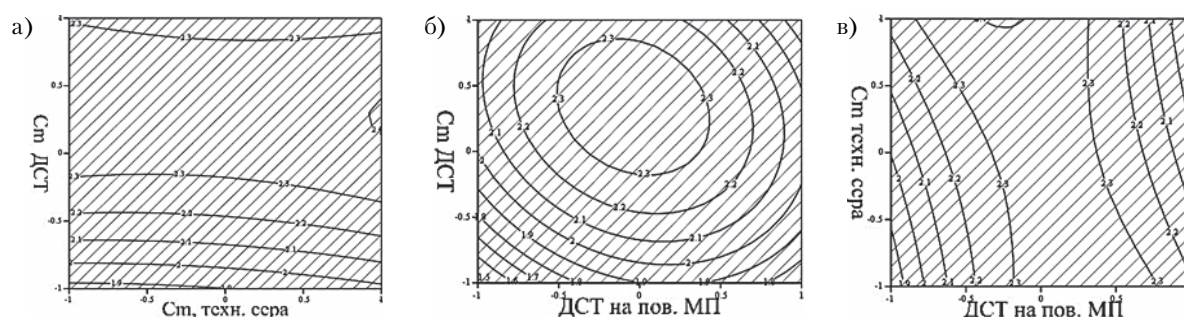


Рисунок 3. Геометрическая интерпретация уравнения (1), характеризующего изменение предела прочности по образующей при 0°C ($R_{\text{обр.}}$) от действующих факторов: а) концентрация в битуме ДСТ-30-01 и технической серы; б) концентрация в битуме ДСТ-30-01 и МП, активированный ДСТ-30-01; в) концентрация в битуме технической серы и МП, активированный ДСТ-30-01.

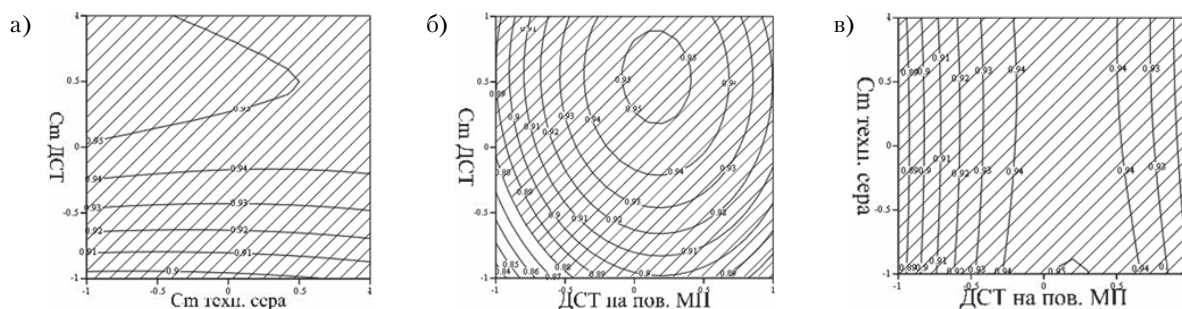


Рисунок 4. Геометрическая интерпретация уравнения (2), характеризующего изменение коэффициента водостойкости при длительном водонасыщении ($K_{вд}$) от действующих факторов: а) концентрация в битуме ДСТ-30-01 и технической серы; б) концентрация в битуме ДСТ-30-01 и МП, активированный ДСТ-30-01; в) концентрация в битуме технической серы и МП, активированный ДСТ-30-01.

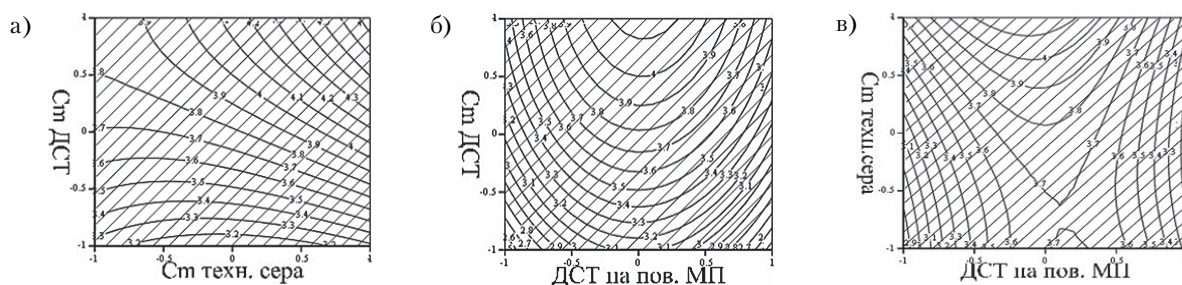


Рисунок 5. Геометрическая интерпретация уравнения (3), характеризующего изменение предела прочности при сжатии, при 20 °С (R_{20}) от действующих факторов: а) концентрация в битуме ДСТ-30-01 и технической серы; б) концентрация в битуме ДСТ-30-01 и МП, активированный ДСТ-30-01; в) концентрация в битуме технической серы и МП, активированный ДСТ-30-01.

частиц, образующихся в процессе диспергирования, являются важными актами, сопровождаемыми механохимическими процессами. Свободные радикалы обладают исключительно высокой активностью, позволяющей им легко вступать в химическое взаимодействие с обычными молекулами.

К тому же в процессе диспергирования известнякового минерального порошка в среде раствора термоэластопласта возможно взаимодействие активных участков новых поверхностей минеральных частиц и ДСТ-30-01 (СКМС-30) по радикал-радикальному механизму. При этом увеличивается количество контактов сегментов надмолекулярных образований блок-сополимера ДСТ-30-01 (СКМС-30) с активными центрами олефиновой поверхности (гидрофобной), вследствие чего формируется структурно-упрочнённый слой полимера на поверхности минерального порошка.

Процессы, происходящие в системах, изучали с привлечением дериватографии и ИК-спектроскопии.

Данные, приведенные на рисунке 6, свидетельствуют о том, что при температурах объединения их с нефтяным дорожным битумом они термически стабильны. Минимальная температура потери массы происходит при 240 °С. Максимальная скорость потери массы органических продуктов происходит в интервале температур 300...400 °С. Характерно, что введение в битумополимерную композицию активированного минерального порошка заметно снижает интенсивность деструкции битумополимерсерного вяжущего (система под индексом 8 на рисунке 6).

Процессы деструкции и конденсации компонентов битума, начиная с температуры свыше 200 °С, как в системе «битум–СКМС-30–сера», так и в композиции «битум–СКМС-30–сера–активированный наполнитель», происходят в

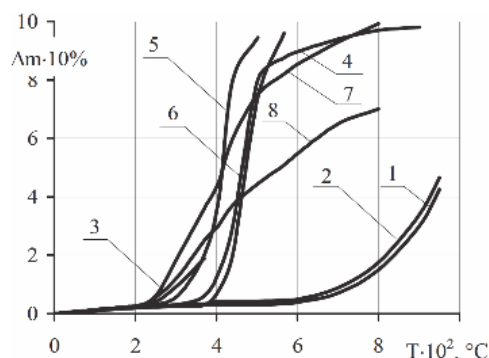


Рисунок 6. Зависимость потери массы вещества Δm от температуры T , °C: 1 – известняковый минеральный порошок неактивированный; 2 – известняковый минеральный порошок, активированный 0,5 % мас. СКМС-30 (ДСТ-30-01); 3 – сера; 4 – битум; 5 – бутадиенмелтистирольный каучук СКМС-30; 6 – битум, модифицированный СКМС-30; 7 – битум, модифицированный СКМС-30 и технической серой; 8 – битум с СКМС-30, технической серой и известняковым минеральным порошком, который активирован 0,5 % мас. СКМС-30 (ДСТ-30-01).

одних и тех же температурных интервалах. Следовательно, можно предположить, что химическое взаимодействие на поверхности раздела фаз «битумополимерсерное вяжущее–активированный СКМС-30 минеральный порошок» отсутствует.

Аналогично процессы деструкции в системе «битум–ДСТ-30-01–сера» происходят в тех же температурных пределах, как и для системы «битум–СКМС-30–сера».

Дивинил-стирольный сополимер, как и бутадиенмелтистирольный каучук, устойчив к воздействию теплового потока в условиях динамического нагрева до 260 °C. Развитие процесса термоокислительной деструкции происходит в интервале 260...320 °C, а при температуре 320...410 °C происходят процессы термической деполимеризации макромолекул ДСТ-30-01. Поскольку при нагреве до 410 °C ДСТ-30-01 (СКМС-30) теряют около 90 % своей массы, термической деполимеризации подвергаются не только полистирольные блоки, но и полибутадиеновые фрагменты его цепей. Оставшаяся часть исходной навески образца, представляющая собой сшитый полимерный продукт, подвергается окислению при температурах более 410 °C.

Рассмотрение ИК-спектров (рисунок 7) неактивированного и активированного известня-

кового минерального порошка показывает, что в системе где известняковый минеральный порошок, активирован 0,5 % мас. СКМС-30, не проявляются полосы поглощения бутадиенмелтистирольного каучука. Они перекрываются широкой и интенсивной полосой поглощения карбонатных пород (максимум в области 1450 см⁻¹).

Поглощение CO₃²⁻ – не экранируется и практически не ослабляется 0,5 % мас. СКМС-30. Это свидетельствует о физической сорбции бутадиенмелтистирольного каучука на поверхности известнякового минерального порошка.

Дивинильная составляющая в термоэластопласте более реакционноспособная, чем стирольная. На первых стадиях окисления уменьшается интенсивность полос, отнесенных к колебанию группы СН=СН, а полосы, связанные с деформационными колебаниями С=С связей в бензольном кольце, практически остаются неизменными. Термическое окисление ДСТ-30-01

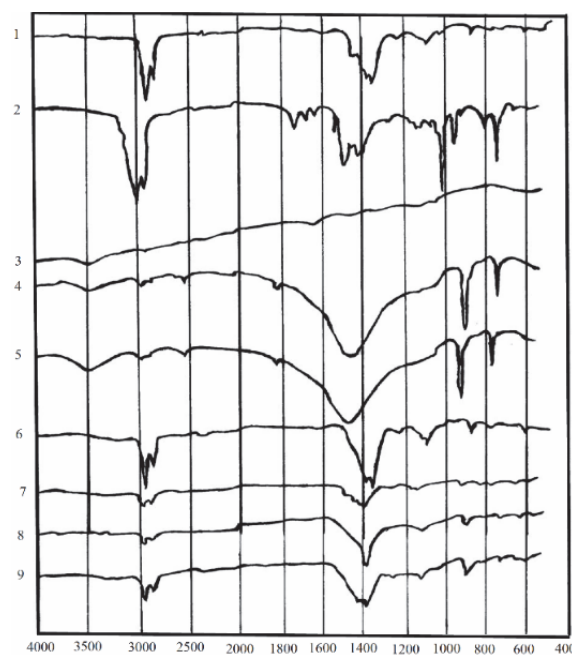


Рисунок 7. ИК-спектры: 1 – битум; 2 – бутадиенмелтистирольный каучук СКМС-30 (ДСТ-30-01); 3 – техническая сера; 4 – известняковый минеральный порошок неактивированный; 5 – известняковый минеральный порошок, поверхностно-активированный 0,5 % мас СКМС-30; 6 – битум + СКМС-30; 7 – битум + СКМС-30–сера; 8 – битум–СКМС-30–сера–известняковый минеральный порошок неактивированный; 9 – битум–СКМС-30–сера–известняковый минеральный порошок, поверхностно-активированный 0,5 % мас. СКМС-30.

кислородом воздуха приводит к появлению карбоксильной ($-\text{OH}$) и альдегидной ($\text{C}=\text{O}$) групп, разрыву $\text{CH}=\text{CH}$ связей [24, 25].

Из полученных ИК-спектров исследуемых образцов следует, что в пленке СКМС-30, как и для ДСТ-30-01 область $3\,000\text{--}2\,800\text{ см}^{-1}$ сливается в сплошную полосу, что обусловлено валентными колебаниями связи $\text{C}-\text{H}$ (рисунок 7).

Аналогично ИК-спектру системы «битум, модифицированный 2 % мас. бутадиен-метилстирольного каучука», практически полностью соответствует ИК-спектр битума, на котором присутствуют характерные для битумов интенсивные полосы в области $2\,852$ и $2\,921\text{ см}^{-1}$ (валентные колебания CH в группах CH_2 , свидетельствующие о значительном количестве ароматических углеводородов в составе битума) и полосы поглощения в области $1\,458\text{ см}^{-1}$ (деформационные колебания $\delta(\text{CH}_2)$) и $1\,376\text{ см}^{-1}$ (деформационные колебания $\delta(\text{CH}_3)$). Указанные полосы всегда присутствуют в спектрах предельных углеводородов, парафинов, масел (рисунок 7) [26]. Основные полосы поглощения СКМС-30 (CH_3 – группы боковых цепей, CH_2 – группы, $\text{C}=\text{CH}$ – группы и др.) практически не заметны.

При температуре менее 145°C присутствие технической серы не приводит к изменению химического состава битума и образованию новых соединений: наблюдается незначительное изменение интенсивности колебаний в диапазонах волновых чисел с $1\,000\text{--}1\,200\text{ см}^{-1}$. Дальнейшее нагревание выше 160°C вызывает превращение легкоподвижной жидкости в малоподвижную массу, вязкость которой достигает максимума при 187°C , а затем снижается. При температуре выше 300°C жидкая сера, снова становится легкоподвижной. Эти аномальные изменения обусловлены тем, что разорвавшиеся кольца S_8 превращаются в цепочечные структуры, смыкающиеся концевыми атомами серы, причем нагревание приводит к постепенному уменьшению длины цепей [11]. Следовательно, введение в битумополимерное вяжущее технической серы приводит к существенному снижению интенсивности полос поглощения битума (CH_2 – группы боковых цепей, CH_3 – группы, нафтены, $\text{C}=\text{O}$ группы и др.). Это подтверждает теоретические предпосылки настоящего исследования, а именно, часть серы принимает участие в вулканизации бутадиенметилстирольного каучука, часть серы вступает в

химическое взаимодействие с углеводородами битума с образованием меркаптанов, сульфидов и полисульфидов. Большая часть серы диспергируется в битумополимерном вяжущем до коллоидного уровня и именно на этой поверхности большая часть битумополимерсерного вяжущего переходит в структурированное состояние.

Сопоставление ИК-спектров (рисунок 7) систем: «битум–СКМС-30–техническая сера–известняковый минеральный порошок неактивированный» и «битум–СКМС-30–техническая сера–известняковый минеральный порошок активированный 0,5 % мас. СКМС-30», показывает, что в системе, в которой содержится, активированный бутадиенметилстирольным каучуком минеральный порошок, более четко проявляются полосы поглощения компонентов битума. Это свидетельствует о том, что наличие на поверхности минерального порошка СКМС-30 улучшает смачивание минерального порошка битумополимерсерным вяжущим и способствует формированию более структурированного адсорбционно-сольватного слоя модифицированного битума на поверхности минерального порошка. Аналогично происходит процесс в системе «битум–ДСТ-30-01–техническая сера–известняковый минеральный порошок, активированный 0,7 % мас. ДСТ-30-01». В результате чего на поверхности минерального порошка сформируется структурно-упрочненный слой полимера, который повышает адгезию битумополимерсерного вяжущего к поверхности минерального порошка. Это приводит к усилению коагуляционного структурообразования в микроструктуре асфальтобетона.

Термограммы ДТА (рисунок 8), как и данные ИК-спектроскопии (рисунок 7), свидетельствуют о том, что в системе «битумополимерсерное вяжущее–минеральный порошок, активированный 0,5 % мас. СКМС-30», более четко проявляются полосы поглощения битума (ароматика, метильные группы), чем в системе «битумополимерсерное вяжущее–неактивированный минеральный порошок». Следовательно, слой структурированного бутадиенметилстирольного каучука на поверхности минерального порошка улучшает смачивание его вяжущим и обеспечивает более сильное межмолекулярное взаимодействие на поверхности раздела фаз.

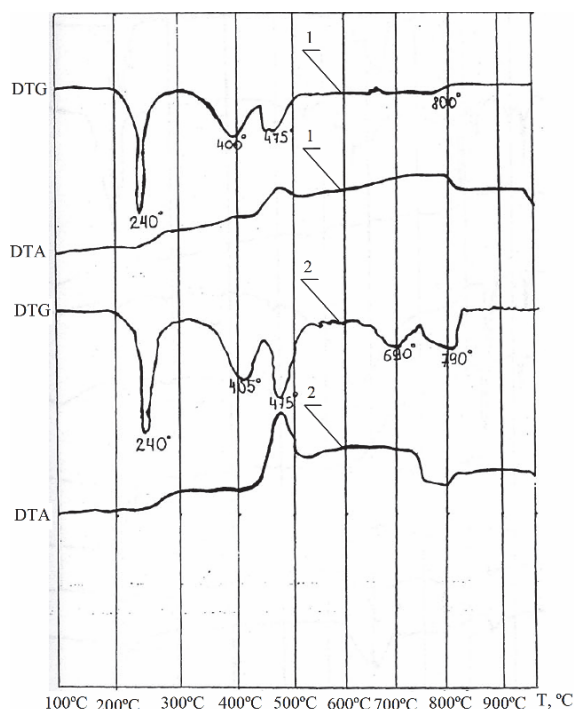


Рисунок 8. ДТА и DTG систем: 1 – битум–бутадиенметилстирольный каучук СКМС-30–серы; 2 – битум–бутадиенметилстирольный каучук СКМС-30–серы–активированный СКМС-30 минеральный порошок.

Асфальтополимерсеробетонные смеси более технологичны, чем традиционные горячие асфальтобетонные. Оптимальный интервал температур уплотнения асфальтополимерсеробетонных смесей с комплексно-модифицированной микроструктурой 60...130 °С, а для горячих асфальтобетонных смесей, приготовленных на битуме БНД 40/60, 90...130 °С. Это позволит продлить строительный сезон, увеличить дальность транспортирования асфальтобетонных смесей, увеличить и эффективное время уплотнения.

Асфальтополимерсеробетоны с комплексно-модифицированной микроструктурой оптимальных составов характеризуются следующими показателями качества: предел прочности при сжатии, МПа при 0 °С $R_0 = 8–10$, при 20 °С $R_{20} = 5,0–6,5$, при 75 °С $R_{75} = 1,2–1,4$; набухание, % от объема – 0; водонасыщение, % от объема 1,5–2,0.

Предел прочности при изгибе при температуре 60 °С для асфальтобетона с комплексно-модифицированным асфальтовяжущим веществом в 4,2 раза больше в сравнении с традици-

онным горячим асфальтобетоном. Это обеспечит более высокую несущую способность и сдвигоустойчивость асфальтобетонного покрытия с применением модифицированных асфальтобетонов.

Асфальтополимерсеробетон характеризуется большими критическими напряжениями ($\sigma_{кр} = 0,095$ МПа), чем горячий асфальтобетон (0,045 МПа), а также более широким интервалом вязкоупругого поведения в покрытии дорожной одежды (рисунок 9).

Температура стеклования для асфальтополимерсеробетона равна минус 32,5 °С, для горячего асфальтобетона на битуме БНД 40/60 – минус 17,5 °С, а температура перехода в вязкотекучее состояние для асфальтополимерсеробетона равна 75 °С, для горячего асфальтобетона $T_{ви} = 41$ °С (рисунок 9). Следовательно, температурный интервал вязкоупругого состояния модифицированного асфальтополимерсеробетона составляет 107,5 °С, что на 49 °С больше, чем у горячих асфальтобетонов по ДСТУ Б В.2.7-119:2011 (ГОСТ 9128-2013). Характерно, что модуль упругости асфальтополимерсеробетона при 50 °С значительно больше, чем асфальтобетона, приготовленного на битуме БНД 40/60 ($\Pi_{25} = 59,0,1$ мм) (рисунок 9). Коэффициент пластичности асфальтополимерсеробетона в диапазоне изученных температур –20...50 °С линеен. Это свидетельствует о малом температурно-временном влиянии на реологические свойства асфальтополимерсеробетона.

Асфальтополимерсеробетоны более долговечны. Так, коэффициент старения (тепловой прогрев выполнен при температуре 75 °С и ультрафиолетовом облучении в климатической камере ИП-1) после 2 000 часов прогрева $K_{ст} = 1,25$, а для горячего асфальтобетона $K_{ст} = 1,6$. Коэффициент водостойкости при водонасыщении в течение 90 суток для асфальтополимерсеробетона составляет $K_{вд} = 0,87$, а для традиционного асфальтобетона $K_{вд} = 0,59$.

При исследовании литых асфальтополимерсеробетонных смесей для оптимизации состава бинарной смеси «битумополимерсерное вяжущее–поверхностно–активированный минеральный порошок» использован двухфакторный композиционный несимметричный план на трех целочисленных уровнях (–1; 0; +1) с коэффициентом корреляции между факторами $r_{ij} < 0,1$, $i, j = 1, 2$ и $i \neq j$.

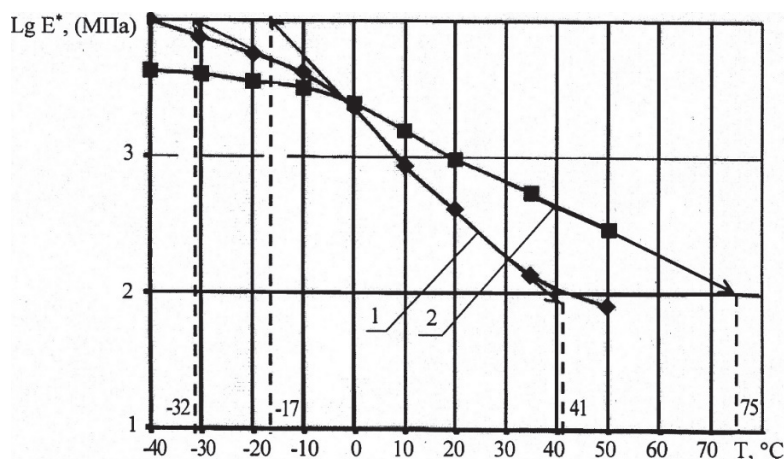


Рисунок 9. Температурная зависимость комплексного модуля упругости E^* асфальтобетона при частоте деформирования 0,05 Гц: 1 – мелкозернистый асфальтобетон (тип Б), приготовленный на битуме БНД 40/60 ($P_{25} = 59,0,1$ мм); 2 – мелкозернистый асфальтополимерсеробетон (битум $P_{25} = 59,0,1$ мм модифицирован 2 % мас. СКМС-30 и 30 % мас. технической серы, минеральный порошок поверхностно-активирован 0,5 % мас. СКМС-30).

В качестве факторов, действующих на оптимизируемую систему, приняты: массовая концентрация минерального порошка, активированного раствором СКМС-30 (0,5 % мас. СКМС-30 в пересчете на твердое вещество к массеизвестнякового минерального порошка), X_1 (10–20 % мас.); массовая концентрация битумополимерсерного вяжущего (битум БНД 40/60 ($P_{25} = 59,0,1$ мм) модифицирован 2 % мас. СКМС-30 по массе и 30 % мас. технической серы), X_2 (6,5–10,5 % мас.). В качестве параметров оптимизации состава матрицы асфальтополимерсеробетона приняты: предел прочности на растяжение при изгибе при 0 °C, Y_1 ($R_{изг}$, не менее 5,6 МПа); коэффициент длительной водостойкости Y_2 ($K_{вд}$, не менее 0,96); подвижность смеси при 150 °C (Y_3 , не менее 30 мм); глубина погружения штампа при 40 °C, Y_4 (h , не более 4 мм).

Регрессионный анализ выполнен с помощью программы «Actat 2,0». Получены уравнения регрессии в виде неполных и полных полиномов 2-й степени (5, 6, 7) :

$$Y_1(X_1, X_2) = 4,96 + 1,68 \cdot X_1 + 1,36 \cdot X_2 + 1,28 \cdot X_1 \cdot X_2 + 1,24 \cdot X_1^2 \quad (5)$$

(м.к.к. = 0,981, $C_v = 10,6$ %).

$$Y_2(X_1, X_2) = 32 + 15,5 \cdot X_1 + 7,3 \cdot X_2 - 239 \cdot X_1^2 \quad (6)$$

(м.к.к. = 0,975, $C_v = 14,4$ %).

$$Y_4(X_1, X_2) = 3,43 + 0,33 \cdot X_1 + 0,52 \cdot X_2 + 0,39 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,22 \cdot X_1^2 + 0,32 \cdot X_2^2 \quad (7)$$

(м.к.к. = 0,985, $C_v = 4,7$ %).

Характерно, что при всех значениях факторов варьирования коэффициент длительной водостойкости (Y_3) обеспечивается.

Исходя из ограничений по показателю пластичности литого асфальтополимерсеробетона (глубина погружения штампа) и по показателю подвижности при 150 °C (осадка конуса), а также учитывая экономичность литого асфальтополимерсеробетона, установлено, что оптимальное содержание в смеси активированного минерального порошка должно быть 17...18 % мас., а модифицированного органического вяжущего 8...9,5 % мас. (рисунок 10).

Литые асфальтополимерсеробетоны характеризуются повышенным сопротивлением сдвига при высоких положительных температурах (условная жесткость по Маршаллу при 60 °C 23,1 кН), повышенной плотностью, коэффициентом длительной водостойкости (90 суток), $K_{вд} = 0,89$, коэффициентом морозостойкости после 100 циклов попеременного замораживания-оттаивания $F = 0,85$, коэффициентом теплового старения после 2 000 часов прогрева в климатической камере ИП-1 при температуре 75 °C и ультрафиолетовом облучении, $K_{ст} = 1,27$.

В настоящее время производятся комплекты для транспортирования литых асфальтобетонных смесей КДМ-1501, ОРД-1023, УРД-2М, асфальтоукладчики и другое технологическое оборудование для производства литых асфальтополимерсеробетонных смесей и смесей (Super 82

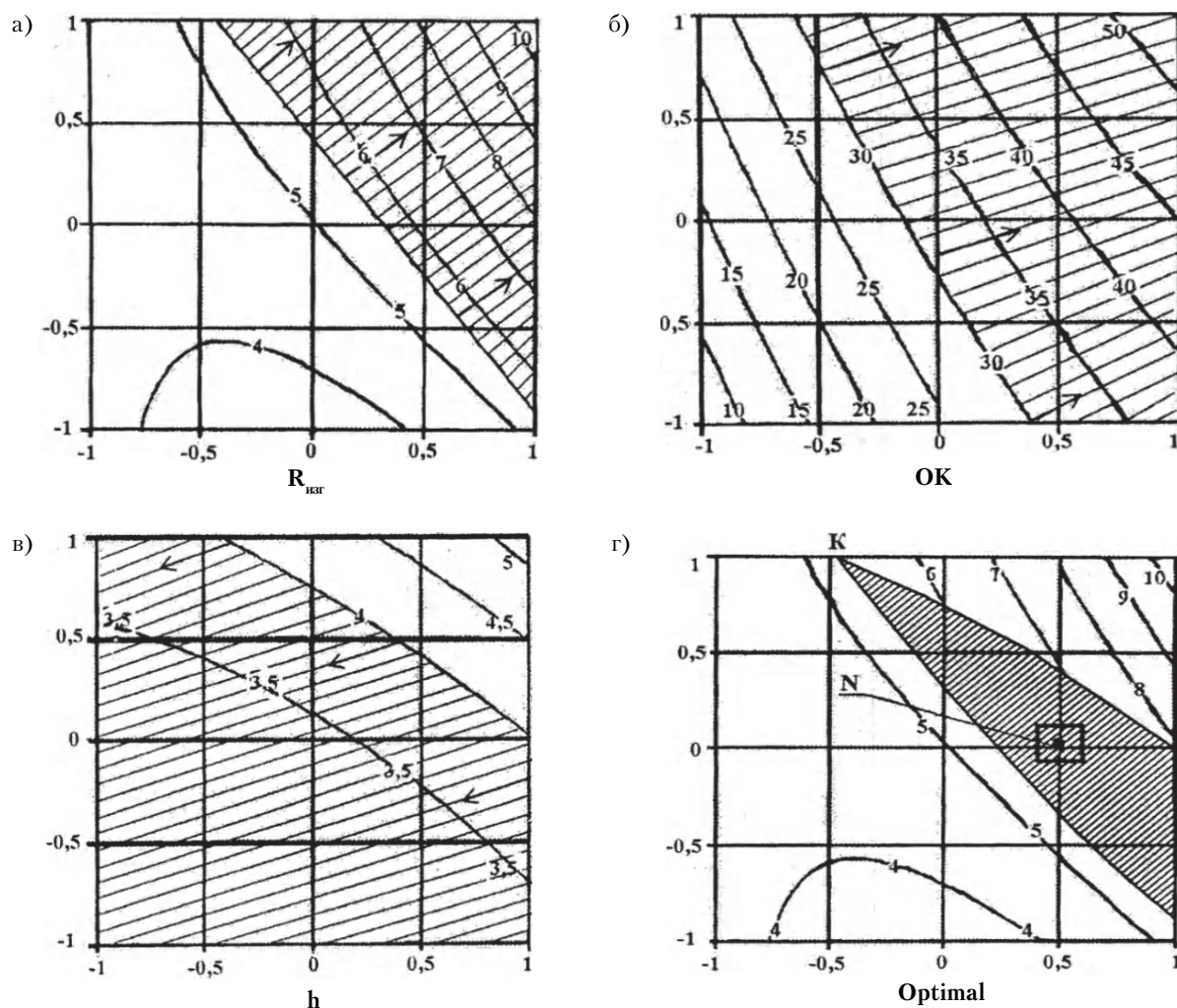


Рисунок 10. Зависимость предела прочности на растяжение при изгибе $R_{изг}$ (МПа), при 0 °С (Y_1) (а); подвижности асфальтополимерсеробетонной смеси OK (мм) при 150 °С (б); глубины погружения штампа при 40 °С, h (мм), (в) и области оптимальных составов $Optimal$ (г) асфальтополимерсерных вяжущих веществ от соотношения в системе поверхностно-активированного бутадиенмелтистирольным каучуком СКМС-30 известнякового минерального порошка и битумополимерсерного вяжущего.

GAF, Super 1502 GAF, GADF 11, GADE, Д-597А, ДС-117, Д-508-2А и др.).

При небольших объемах работ, например, при устройстве слоя износа ($h = 2$ см) укладывать литую асфальтобетонную смесь можно вручную.

Разработаны «Рекомендации по производству и применению литых асфальтополимерсеробетонных смесей для ямочного ремонта и строительства покрытий нежестких дорожных одежд в неблагоприятных погодных условиях». Выполнено технико-экономическое обоснование целесообразности финансирования проекта.

Литые асфальтополимерсеробетонные смеси получают по технологии, включающей: по-

верхностную активацию раствором бутадиенмелтистирольного каучука минерального порошка; приготовление битумополимерсерного вяжущего, представленного нефтяным дорожным битумом БНД 40/60, бутадиенмелтистирольным каучуком (2 % мас.) и технической серой (25–30 % мас.); производство асфальтополимерсеробетонной смеси в асфальтосмесителе принудительного действия.

Стоимость литой асфальтополимерсеробетонной смеси на 20 % дороже горячей асфальтобетонной смеси, но срок ее эксплуатации 20...25 лет, в то время как срок эксплуатации традиционного асфальтобетонного покрытия до капитального ремонта 8...10 лет. Годовая плановая прибыль

от внедрения 50 тыс. тонн, литых асфальтополимерсеробетонных смесей при устройстве слоев износа составит 90 550 000 рублей. Это обусловлено значительным повышением долговечности дорожного покрытия. Ориентировочная стоимость проектных работ и дополнительного оборудования для производства, транспортирования и укладки литых асфальтополимерсеробетонных смесей 24 500 000 рублей.

Заключение и обсуждение

- На основе методологии системного анализа предложенных физико-химических моделей модифицированных асфальтовязущих веществ и асфальтобетонов с использованием экспериментально-статистического описания разработаны и реализованы новые научно-обоснованные технологические решения получения комплексно-модифицированных горячих и литых асфальтополимерсеробетонных смесей для устройства покрытий нежестких дорожных одежд автомобильных дорог повышенной долговечности. Асфальтополимербетоны способны противостоять колееобразности, усталостному разрушению, трещинообразности и термоокислению, в результате комплексной модификации органических вяжущих полимерами термодинамически совместимыми с нефтяными дорожными битумами: бутадиенметилстирольный каучук СКМС-30 (дивинилстирольный каучук ДСТ-30-01) совместно с технической серой;
- С использованием экспериментально-статистического метода планирования эксперимента установлено, что оптимальная массовая

концентрация бутадиенметилстирольного каучука СКМС-30 (ДСТ-30-01) в битумах III структурно-реологического типа БНД 40/60, БНД 60/90 должна составлять 2...3 % мас., технической серы 25...30 % мас., а массовая концентрация СКМС-30 на поверхности минерального порошка 0,5 % мас. При данных концентрационных отношениях формируется структурированный слой модификатора, приводящий к усилению межмолекулярного взаимодействия на поверхности раздела фаз «битумополимерсерное вяжущее–поверхностно-активированный синтетическим каучуком минеральный порошок». Асфальтополимерсеробетонные смеси отличаются повышенной удобоукладываемостью и уплотняемостью в диапазоне температур 60...130 °С. Асфальтополимерсеробетоны характеризуются широким интервалом вязкоупругого поведения. Температура перехода в вязкотекучее состояние 75 °С, температура стеклования –32,5 °С;

- С использованием метода планирования эксперимента оптимизирован состав асфальтополимерсерного вяжущего вещества литой асфальтополимерсеробетонной смеси оптимального состава (массовая концентрация поверхностно-активированного 0,5 % мас. СКМС-30 известнякового минерального порошка 17...18 % мас., битумополимерсерного вяжущего 8...9,5 % мас., что обеспечивает подвижность смеси при 150 °С, ОК > 30 мм, глубину погружения штампа при 40 °С, $h < 4$ мм. Для литого асфальтополимерсеробетона предел прочности при изгибе на растяжение при 0 °С, $R_{изг} > 5,6$ МПа.

Литература

1. Костельов, М. П. До какого уровня (Китайского, Европейского или Американского?) следует России поднимать качество строительства и сроки службы своих новых автомобильных дорог / М. П. Костельов, В. П. Перевалов, Д. В. Пахarenко. – Текст : непосредственный // Дорожная техника. – 2011. – № 11. – С. 12–29.
2. Котлярский, Э. В. Долговечность дорожных асфальтобетонных покрытий и факторы, способствующие разрушению структуры асфальтобетона в процессе эксплуатации / Э. В. Котлярский,

Reference

1. Kostelov, M. P.; Perevalov, V. P.; Pakhareno D. V. To what level (Chinese, European or American?) Should Russia raise the quality of construction and the service life of its new highways? – Text : direct. – In: *Road equipment*. – 2011. – № 11. – P. 12–29. (in Russian)
2. Kotlyarsky, E. V.; Voyenko, O. A. Durability of road asphalt concrete pavements and factors contributing to the destruction of the structure of asphalt concrete during operation. – Moscow : Tekhnopoligrafstentr, 2007. – 136 p. – Text : direct. (in Russian)

- О. А. Военко. – Москва : Технополиграфцентр, 2007. – 136 с. – Текст : непосредственный.
3. Бахрах, Г. С. Модель оценки срока службы дорожной одежды нежесткого типа / Г. С. Бахрах. – Текст : непосредственный // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2013. – № 3. – С. 35–41.
4. Дорожный асфальтобетон / Л. Б. Гезенцев, Н. В. Горелышев, А. М. Богуславский, И. В. Королёв. – Москва : Транспорт, 1985. – 350 с. – Текст : непосредственный.
5. Руденский, А. В. Дорожные асфальтобетонные покрытия / А. В. Руденский. – Москва : Транспорт, 1992. – 254 с. – Текст : непосредственный.
6. Иваньски, М. Асфальтобетон как композиционный материал с нанодисперсными и полимерными материалами / М. Иваньски, Н. Б. Урьев. – Москва : Технополиграфцентр, 2007. – 668 с. – Текст : непосредственный.
7. Золотарев, В. А. Перспективы повышения долговечности асфальтобетона / В. А. Золотарев. – Текст : непосредственный // Автомобильный транспорт и дорожное хозяйство на рубеже 3-го тысячелетия. – Харьков : ХНАДУ, 2000. – С. 58–61.
8. Калгин, Ю. И. Дорожные битумоминеральные материалы на основе модифицированных битумов : монография / Ю. И. Калгин. – Воронеж : Изд-во ВГУ, 2006. – 272 с. – Текст : непосредственный.
9. Носов, В. П. Увеличение сроков службы дорожных одежд – стратегическая задача дорожной науки / В. П. Носов. – Текст : непосредственный // Автомобильные дороги. – 2006. – № 12. – С. 81–86.
10. Полимерно-битумные вяжущие материалы на основе СБС для дорожного строительства. Обзорная информация / Л. М. Гохман, Е. И. Гурарий, А. Р. Давыдова, К. И. Давыдова. – Москва : Информавтор, 2002. – 112 с. – Текст : непосредственный.
11. Dinnen, A. Bitumen-thermoplastic rubber blends in road applications / A. Dinnen. – Текст : непосредственный // Bitumen flexible and durable : Third Eurobitumen Symposium, September 11–13, 1985. – Haque : [S. n.], 1985. – Volume 1. Summaries and papers. – P. 645–651.
12. Counturier, Y. Amelioration des proprietes des betons bitumineux pour couches de roulement par l'emploi d'un bitumen polymere a hautes performance / Y. Counturier, E. Lopez, J. B. Prudhomme. – Текст : непосредственный // Bitumen flexible and durable : Third Eurobitumen Symposium, September 11–13, 1985. – Haque : [S. n.], 1985. – Volume 1. Summaries and papers. – P. 665–671.
13. Velkamp, L. J. T. Hochwertige dunne Deckschichten aus Splittmastixasphalt 0/6 und 0/3 / L. J. T. Velkamp, H. Ezzlen. – Текст : непосредственный // Asphalt. – 1997. – № 7/8. – P. 36–39.
14. Martinie, G. D. Wet efficiencies of bitumen mixtures for various organic substances and the identities of residual matter / G. D. Martinie, A. A. Schilt. – 3. Bakhrah, G. S. Model for estimating the service life of non-rigid pavement. – Text : direct. – In: *Science and technology in the road industry*. – 2013. – № 3. – P. 35–41. (in Russian)
4. Gezentsvey, L. B.; Gorelyshev, N. V.; Boguslavsky, A. M.; Korolev, I. V. Road asphalt concrete. – Moscow : Transport, 1985. – 350 p. – Text : direct. (in Russian)
5. Rudensky, A. V. Road asphalt concrete pavements. – Moscow : Transport, 1992. – 254 p. – Text : direct. (in Russian)
6. Ivanski, M.; Uryev, N. B. Asphalt concrete as a composite material with nano-dispersed and polymer materials. – Moscow : Tekhnopoligrafstentr, 2007. – 668 p. – Text: direct. (in Russian)
7. Zolotarev, V. A. Prospects for increasing the durability of asphalt concrete. – Text : direct. – In: *Automobile transport and road facilities at the turn of the 3rd millennium*. – Kharkiv : KNAHU, 2000. – P. 58–61. (in Russian)
8. Kalgin, Yu. I. Road bitumen-mineral materials based on modified bitumen : monograph. – Voronezh : Publishing House VSU, 2006. – 272 p. – Text : direct. (in Russian)
9. Nosov, V. P. Extending the service life of pavements is a strategic challenge for road science. – Text : direct. – In: *Highways*. – 2006. – № 12. – P. 81–86. (in Russian)
10. Gokhman, L. M.; Gurary, Ye. I.; Davydova, A. R.; Davydova, K. I. Polymer-bitumen binders based on SBS for road construction. Overview information. – Moscow : Informavtodor, 2002. – 112 p. – Text : direct. (in Russian)
11. Dinnen, A. Bitumen-thermoplastic rubber blends in road applications. – Text : direct. – In: *Bitumen flexible and durable : Third Eurobitumen Symposium*. – Haque : [S. n.], 1985. – Volume 1. Summaries and papers. – P. 645–651. (in English)
12. Counturier, Y.; Lopez, E.; Prudhomme, J. B. Amelioration des proprietes des betons bitumineux pour couches de roulement par l'emploi d'un bitumen polymere a hautes performance. – Text : direct. – In: *Bitumen flexible and durable : Third Eurobitumen Symposium*. – Haque : [S. n.], 1985. – Volume 1. Summaries and papers. – P. 665–671. (in French)
13. Velkamp, L. J. T.; Ezzlen, H. Hochwertige dunne Deckschichten aus Splittmastixasphalt 0/6 und 0/3. – Text : direct. – In: *Asphalt*. – 1997. – № 7/8. – P. 36–39. (in English)
14. Martinie, G. D.; Schilt, A. A. Wet efficiencies of bitumen mixtures for various organic substances and the identities of residual matter. – Text : direct. – In: *Analytical Chemistry*. – 1976. – № 48(1). – P. 70–74. (in English)
15. Gragger, F. Stand, Aussichten und Probleme der Wiederverwendung von Asfaltstoffen und Nebenprodukten im Strassenbau. – Text : direct. – In: *Stal. Mischwerk*. – 1981. – № 1. – P. 19–29. (in German)
16. Mozgovoy, V. V.; Merzlikin, A. Ye.; Mozgovaya, L. A. [et. al.] Progressive technologies for the overhaul of

- Текст : непосредственный // Analytical Chemistry. – 1976. – № 48(1). – P. 70–74.
15. Gragger, F. Stand, Aussichten und Probleme der Wiederverwendung von Asphaltstoffen und Nebenprodukten im Strassenbau / F. Gragger. – Текст : непосредственный // Stal. Mischwerk. – 1981. – № 1. – P. 19–29.
 16. Прогрессивные технологии капитального ремонта дорожных одежд / В. В. Мозговой, А. Е. Мерзликин, Л. А. Мозговая [и др.] // Дорожная техника : каталог-справочник. – Санкт-Петербург : ООО «Славутич», 2007. – С. 126–139. – Текст : непосредственный.
 17. Золотарев, В. А. Долговечность асфальтобетона при совместном действии нагрузок и агрессивных сред / В. А. Золотарев. – Текст : непосредственный // Дорожная техника. – 2011. – № 11. – С. 30–39.
 18. Печеный, Б. Г. Долговечность битумных и битумо-минеральных покрытий / Б. Г. Печеный. – Москва : Стройиздат, 1981. – 123 с. – Текст : непосредственный
 19. Углова, Е. В. Усталостная долговечность эксплуатируемых асфальтобетонных покрытий / Е. В. Углова, С. К. Илиополов, М. Г. Селезнев. – Ростов-на-Дону : РГСУ, 2009. – 244 с. – Текст : непосредственный.
 20. Братчун, В. И. Теоретико-методологические положения формирования оптимальных структур комплексно-модифицированных дорожных асфальтобетонов повышенной долговечности / В. И. Братчун, В. Л. Беспалов. – Текст : непосредственный // Строитель Донбасса. – 2018. – № 1. – С. 17–23.
 21. Гохман, Л. М. Обоснование нормативных требований к полимерасфальтобетону по ГОСТ 9128-2013 / Л. М. Гохман. – Текст : непосредственный // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2017. – Выпуск 79. – С. 22–27.
 22. Золотарев, В. А. Долговечность дорожных асфальтобетонов / В. А. Золотарев. – Харьков : Вища школа, 1977. – 114 с. – Текст : непосредственный.
 23. Вознесенский, В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. – Москва : Статистика, 1974. – 192 с. – Текст : непосредственный.
 24. Термоокислительная деструкция дивинилстирольного термоэластопласта ДСТ-30 / Л. Н. Маклакова, И. З. Ибрагимов, А. Н. Болдин [и др.]. – Текст : непосредственный // Межвуз. сб. науч. тр. – Казань, 1985. – С. 37–40.
 25. Модификация свойств эластомерных композиций : монография / Н. Р. Прокопчук, Ж. С. Шашок, А. В. Касперович, И. С. Ташлыков. – Минск : БГТУ, 2012. – 218 с. – Текст : непосредственный.
 26. Беллами, Л. Д. Инфракрасные спектры сложных молекул / Л. Д. Беллами ; перевод с англ. В. М. Акимова [и др.] ; под ред. Ю. А. Пентина. – [2-е изд., перераб. и расшир.]. – Москва : Изд-во иностр. лит., 1963. – 590 с. – Текст : непосредственный.
 - road pavements. – In: *Road equipment : directory-reference*. – St. Petersburg : LLC «Slavutich», 2007. – P. 126–139. – Text : direct. (in Russian)
 17. Zolotarev, V. A. Durability of asphalt concrete under the combined action of loads and aggressive environments. – Text : direct. – In: *Road machinery*. – 2011. – № 11. – P. 30–39. (in Russian)
 18. Pecheny, B. G. Durability of bituminous and bitumen-mineral coatings. – Moscow : Stroyizdat, 1981. – 123 p. – Text : direct. (in Russian)
 19. Uglova, Ye. V.; Iliopolov, S. K.; Seleznev, M. G. Fatigue life of used asphalt-concrete pavements. – Rostov-on-Don : RSCU, 2009. – 244 p. – Text : direct. (in Russian)
 20. Brachun, V. I.; Bepalov, V. L. Theoretical and methodological provisions for the formation of optimal structures of complex-modified road asphalt concrete of increased durability. – Text : direct. – In: *Donbas builder*. – 2018. – № 1. – P. 17–23. (in Russian)
 21. Gokhman, L. M. Justification of regulatory requirements for polymer asphalt concrete in accordance with GOST 9128-2013. – Text : direct. – In: *Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Highway University*. – 2017. – Issue 79. – P. 22–27. (in Russian)
 22. Zolotarev, V. A. Durability of road asphalt concrete. – Kharkiv : Higher school, 1977. – 114 p. – Text : direct. (in Russian)
 23. Voznesensky, V. A. Statistical methods of experiment planning in feasibility studies. – Moscow : Statistics, 1974. – 192 p. – Text : direct. (in Russian)
 24. Maklakova, L. N.; Ibragimov, I. Z.; Boldin, A. N. [et. al.]. Thermo-oxidative destruction of divinyl styrene thermoplastic DST-30. – Text : direct. – In: *Interuniversity collection of scientific papers*. – Kazan, 1985. – P. 37–40. (in Russian)
 25. Prokopchuk, N. R.; Shashok, Zh. S.; Kasperovich, A. V.; Tashlykov, I. S. Modification of the properties of elastomeric compositions: monograph. – Minsk : BSTU, 2012. – 218 p. – Text : direct. (in Russian)
 26. Bellami, L. D.; translation from English Akimov, V. M. [et. al.]; edited by Pentin, Yu. A. Infrared spectra of complex molecules. – [2nd ed., revised and expanded]. – Moscow : Foreign Literature Publishing House, 1963. – 590 p. – Text : direct. (in Russian)

Братчун Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: физико-химическая механика формирования оптимальной структуры комплексно-модифицированных дорожных асфальтобетонов.

Беспалов Виталий Леонидович – доктор технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: синтез органических вяжущих для производства композиционных дорожно-строительных материалов, используемых в строительстве конструктивных слоев нежестких дорожных одежд автомобильных дорог повышенной долговечности.

Ромасюк Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: получение технологичных и долговечных дорожных бетонов для строительства конструктивных слоев нежестких дорожных одежд на основе модифицирования органических вяжущих.

Загородняя Анастасия Викторовна – старший преподаватель кафедры проектирования и технологии строительства ГОУ ВО ЛНР «Луганский национальный университет им. В. Даля». Научные интересы: разработка теоретических положений о закономерностях формирования структуры и физико-механических свойств дорожного асфальтополимерсеробетона повышенной долговечности.

Пшеничных Олег Александрович – ассистент кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: комплексно-модифицированные асфальтополимербетоны, армированные полимерными волокнами.

Братчун Валерій Іванович – доктор технічних наук, професор; завідувач кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: фізико-хімічна механіка формування оптимальної структури комплексно-модифікованих дорожніх асфальтобетонів.

Беспалов Віталій Леонідович – доктор технічних наук, доцент кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: синтез органічних в'язучих для виробництва композиційних дорожньо-будівельних матеріалів, використовуваних при будівництві конструктивних шарів нежорстких дорожніх одягів автомобільних доріг підвищеної довговічності.

Ромасюк Євген Олександрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: отримання технологічних і довговічних дорожніх бетонів для будівництва конструктивних шарів нежорстких дорожніх одягів на основі модифікування органічних в'язучих.

Загородня Анастасія Вікторівна – старший викладач кафедри проектування та технології будівництва, ДОУ ВО ЛНР «Луганський національний університет ім. В. Даля». Наукові інтереси: розробка теоретичних положень про закономірності формування структури і фізико-механічних властивостей дорожнього асфальтополімерсіробетону підвищеної довговічності.

Пшеничних Олег Олександрович – асистент кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: комплексно-модифіковані асфальтополімербетони, армовані полімерними волокнами.

Bratchun Valery – D. Sc. (Eng.), Professor; Head of the Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: physicochemical mechanics of the formation of the optimal structure of complex-modified road asphalt concrete.

Bespalov Vitaly – D. Sc. (Eng.), Associate Professor, Highways and Air Fields Department, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: synthesis of organic binders for the production of composite road-building materials used in the construction of structural layers of non-rigid road pavements of high-durability highways.

Romasyuk Evgeniy – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Highways and Air Fields Department, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: production of technological and durable road concretes for the construction of structural layers of non-rigid road pavements based on the modification of organic binders.

Zagorodnyaya Anastasia – Senior Lecturer, Design and Construction Technology Department, V. Dahl Lugansk National University. Scientific interests: development of theoretical provisions on the laws of formation of the structure and physicommechanical properties of road asphalt polymer silver concrete with increased durability.

Pshenichnykh Oleg – Assistant, Highways and Air Fields, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: complex-modified asphalt-polymer concrete reinforced with polymer fibers.