

DOI: 10.15593/2224-9826/2022.3.08

УДК 678.073: 665.775

ТОНКОДИСПЕРСНАЯ БИТУМНАЯ ЭМУЛЬСИЯ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ЦЕМЕНТНОГО БЕТОНА ДОРОЖНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А.Р. Гарипов, Д.Б. Макаров, В.Г. Хозин, С.В. Степанов

Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 20 июня 2022
Одобрена: 01 сентября 2022
Принята к публикации:
15 сентября 2022

Ключевые слова:

бетон, дорожный бетон, битумная эмульсия, анионоактивный эмульгатор, прочность.

АННОТАЦИЯ

Основной задачей при разработке дорожных бетонов является увеличение прочности бетона при изгибе, что позволит повысить срок службы покрытия до 50 лет. Этому могут способствовать новые типы цементного бетона, например, укатываемый бетон с пониженным модулем упругости в основаниях автомобильных дорог. Укатываемый бетон с минимально возможным содержанием воды и связующего обладает максимальной степенью уплотнения материала, при этом обеспечивается формирование плотной структуры. Такие бетоны могут быть получены при использовании демпфирующих анионоактивных битумных эмульсий с определенными свойствами.

Важную роль в получении анионоактивных битумных эмульсий с требуемыми свойствами играет тщательный подбор эмульгатора. При получении битумных эмульсий к эмульгаторам предъявляются особые требования, поскольку они во многом определяют структуру и свойства битумной эмульсии. Механизм действия эмульгатора состоит в снижении поверхностного натяжения на границе раздела между битумной и водной фазами и в образовании защитной оболочки вокруг битумных частиц. В качестве исходного продукта для производства анионоактивного эмульгатора предлагается использование флотогудрона.

В данной работе определены оптимальная рецептура и технология комбинированного эмульгирования для приготовления тонкодисперсной битумной эмульсии; исследованы основные эксплуатационные свойства дорожных бетонов, модифицированных тонкодисперсной анионоактивной битумной эмульсией.

Выявлено, что битумная эмульсия с 2 % флотогудрона, полученная комбинированным способом, более структурирована и имеет меньший размер битумных частиц. Доказано, что по показателю однородности битумная эмульсия, полученная комбинированным эмульгированием, в 5 раз лучше, чем битумная эмульсия, приготовленная традиционным способом. Модификация жестких бетонов разработанной анионоактивной битумной эмульсией позволила увеличить прочность бетона на сжатие на 30 %, на изгиб на 40 %, увеличить морозостойкость в два раза. Также определена оптимальная концентрация модифицирующей добавки, которая составляет 5 % анионоактивной битумной эмульсии от массы цемента для жестких бетонных смесей.

© ПНИПУ

© Гарипов Айдар Равилевич – соискатель, e-mail: aid-28@mail.ru

Макаров Дмитрий Борисович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: makarov@kgasu.ru, ORCID: 0000-0001-6879-0369

Хозин Вадим Григорьевич – доктор технических наук, профессор, e-mail: khozin.vadim@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0874-316X

Степанов Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: stepanov@kgasu.ru, ORCID: 0000-0003-4926-8537

Aidar R. Garipov – applicant, e-mail: aid-28@mail.ru

Dmitry B. Makarov – Ph. D. in Technical Science, Associate Professor, e-mail: makarov@kgasu.ru, ORCID: 0000-0001-6879-0369

Vadim G. Khozin – Doctor of Technical Science, Professor, e-mail: khozin.vadim@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0874-316X

Sergey V. Stepanov – Ph. D. in Technical Science, Associate Professor, e-mail: stepanov@kgasu.ru, ORCID: 0000-0003-4926-8537

FINELY DISPERSED BITUMEN EMULSION FOR THE MODIFICATION OF CEMENT CONCRETE FOR ROAD USE

A.R. Garipov, D.B. Makarov, V.G. Khozin, S.V. Stepanov

Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 20 June 2022
Approved: 01 September 2022
Accepted for publication:
15 September 2022

Keywords:

concrete, road concrete, bitumen emulsion, anionic emulsifier, strength.

ABSTRACT

The main task in the development of road concrete is to increase the strength of concrete in bending, which will increase the service life of the coating up to 50 years. This can be facilitated by new types of cement concrete, for example, compacted concrete with a reduced modulus of elasticity in the foundations of highways. Rolled concrete with the lowest possible content of water and binder has the maximum degree of compaction of the material, while ensuring the formation of a dense structure. Such concretes can be obtained using damping anionic bituminous emulsions with certain properties.

Careful selection of an emulsifier plays an important role in obtaining anionic bitumen emulsions with the required properties. When obtaining bitumen emulsions, special requirements are imposed on emulsifiers, since they largely determine the structure and properties of the bitumen emulsion. The mechanism of action of the emulsifier is to reduce the surface tension at the interface between the bitumen and water phases and to form a protective shell around the bitumen particles. The use of flotation tar is proposed as an initial product for the production of an anionic emulsifier.

In this work: the optimal formulation and technology of combined emulsification for the preparation of a finely dispersed bitumen emulsion are determined; The main operational properties of road concretes modified with a finely dispersed anionic bitumen emulsion have been studied.

It was revealed that the bitumen emulsion with 2 % flotation tar, obtained by the combined method, is more structured and has a smaller size of bituminous particles. It has been proven that, in terms of uniformity, the bitumen emulsion obtained by combined emulsification is 5 times better than the bitumen emulsion prepared in the traditional way. Modification of rigid concrete, developed with an anionic bitumen emulsion, made it possible to increase the compressive strength of concrete by 30 %, bending strength by 40 %, and increase frost resistance by 2 times. The optimal concentration of the modifying additive was also determined, which is 5 % of the anionic bitumen emulsion by weight of cement for rigid concrete mixtures.

© PNRPU

Введение

В последние годы в Российской Федерации существенно увеличилась интенсивность дорожного движения, возросло количество большегрузных автомобилей, вследствие чего возрастают требования к дорожным конструкциям. Они должны удовлетворять повышенным требованиям по прочности, стойкости к длительному нагружению, морозостойкости и долговечности [1–7].

Использование укатываемого бетона в качестве основания дорожной конструкции позволит увеличить эксплуатационно-технические характеристики самого асфальтобетонного покрытия, поэтому конструкции данного типа целесообразно применять при устройстве дорог с высокой интенсивностью движения транспортных средств с большой осевой и механической нагрузкой, например, при строительстве крупных магистральных дорог, а также дорог с повышенной прочностью и сопротивляемостью жестким климатическим условиям.

Однако, само основание из укатываемого бетона имеет ряд недостатков, ограничивающих его применение, таких, как низкая ударная прочность и деформативность, невысокая трещиностойкость и морозостойкость.

Решению этих задач могут способствовать новые типы укатываемого бетона, получаемые при использовании демпфирующих битумных и битумно-полимерных эмульсий. Укатываемый бетон, модифицированный битумной эмульсией (БЭ), будет обладать пониженным модулем упругости в основаниях автомобильных дорог, низким показателем водопоглощения, высокой прочностью на изгиб и сжатие, морозостойкостью, деформативностью и, как следствие, повышенной долговечностью.

В соответствии с этим, высокие требования предъявляются и к компонентам укатываемого бетона, в частности, к битумным эмульсиям. Так, при производстве тонкодисперсной битумной эмульсии в качестве эмульгатора используются смеси высших жирных кислот. Концентрация кислот варьируется от 0,5 до 5 % от массы эмульсии [8–10]. Соотношение воды и битума зависит от области применения эмульсии. В данном исследовании концентрация битума в эмульсии составляет 55 %.

Количественная доля и внешний вид битума, воды, эмульгатора и щелочи, а также степень разделения битума определяют эксплуатационно-технические и физико-химические свойства битумной эмульсии [11–13]. Критерием эффективности процесса эмульгирования и оценки стабильности эмульсий может служить дисперсность, характеризующаяся распределением массы дисперсной фазы по фракциям – каплям различных размеров [14, 15]. Битумные эмульсии отличаются высокой полидисперсностью, на которую оказывает влияние молекулярная природа составляющих компонентов [16, 17]. Битум, образуя дисперсную фазу в эмульсиях прямого типа, обладает различной способностью к эмульгированию. Это объясняется физико-химической природой битума, его составом и свойствами. Парафино-нафтеновые углеводороды коагулируют асфальтены, а ароматические – пептизируют их. Существует определенное соотношение ароматических и парафино-нафтеновых углеводородов, при котором дисперсность асфальтенов и их эмульгирующее действие по отношению к воде максимальны.

На основе сравнительного анализа имеющихся технологий приготовления битумных эмульсий выявлено, что наиболее эффективным способом получения анионоактивных эмульсий является комбинированное эмульгирование, при котором эмульгатор необходимо вводить как в битум, так и в водную фазу до приготовления эмульсии [18, 19]. Это позволяет получить тонкодисперсные эмульсии на любых, даже на малоактивных битумах.

Целью настоящего исследования является получение тонкодисперсных, устойчивых к расслоению битумных эмульсий на анионоактивном эмульгаторе, а также рассмотрение возможности битуминирования жестких бетонных смесей и его влияние на физико-механические характеристики дорожного бетона.

Характеристика материалов и методы исследования

Флотогудрон выпускается в качестве технической продукции на предприятии химической промышленности «НэфисКосметикс» (г.Казань) по ТУ 9147-146-00336562-2008. Физико-химические показатели флотогудрона представлены в табл. 1.

Комбинированная технология получения битумных эмульсий заключается в следующем: готовится водный раствор эмульгатора, т.е. в воду, нагретую до 80 °С, при перемешивании со скоростью 150 об/мин вводится щелочь (NaOH или KOH) в количестве, необходимом для прохождения реакции омыления и создания рН среды не менее 9 [20]. В полученный щелочной раствор добавляется половина от всего количества флотогудрона, а другая половина вводится в битум, разогретый до 140 °С.

Таблица 1

Физико-химические показатели флотогудрона

Table 1

Physical and chemical parameters of flotation tar

Наименование показателей	Характеристика и нормы	Фактическое значение
Внешний вид	Густая мазеобразная масса	Соответствует
Цвет	От темно-коричневого до черного цвета	Соответствует
Кислотное число, мг КОН/г	50–70	64,2
Температура застывания жирных кислот (титр), не более, °С	23	22,8
Массовая доля воды и летучих веществ, не более, %	5	4,0
Число омыления, не менее, мг КОН/г	140	144
Массовая доля золы, не более, %	1	0,9

В данном исследовании использовались известные методы оценки структуры и свойств битумных эмульсий.

Условная вязкость определялась по ГОСТ Р 58952.6-2020, она характеризующуюся временем истечения 50 мл эмульсии из вискозиметра через отверстие диаметром 4 мм при температуре эмульсии 40 °С.

Определение содержания битума с эмульгатором. Осуществлялась посредством выпаривания воды из эмульсии с последующим взвешиванием остатка по ГОСТ Р 58952.5-2020. Массовую долю битума с эмульгатором ($V_э$), %, вычисляли по формуле с погрешностью 0,1 %.

$$V_э = \frac{M_3 - M_1}{M_2} \cdot 100, \quad (1)$$

где M_1 – масса чашки, г;

M_2 – масса эмульсией, г;

M_3 – масса чашки с образцом после выпаривания, г.

Определение однородности (остатка на сите N 014). Данный показатель определялся по остатку битума на сите после процеживания через него эмульсии и выражался в процентах от массы эмульсии по ГОСТ Р 58952.7-2020. Однородность (H) вычисляли по формуле с погрешностью 0,01 %:

$$M_{014} = \frac{M_5 - M_1}{M_2 - (M_4 - M_2)} \cdot 100, \quad (2)$$

где M_1 – масса сита N 014 и фарфоровой чашки (металлического поддона), г;

M_2 – масса лабораторного стеклянного стакана, г;

M_3 – масса эмульсии в лабораторном стеклянном стакане (без его учета), г;

M_4 – масса лабораторного стеклянного стакана с остатком эмульсии, г;

M_5 – масса сита N 014, фарфоровой чашки (металлического поддона) с остатком эмульсии после высушивания, г.

Определение устойчивости при хранении. Устойчивость битумной эмульсии определяется процеживанием эмульсии после 7 сут хранения при температуре $(21 \pm 4) ^\circ\text{C}$ через сито с металлической сеткой N 014 и определении массы остатка эмульсии на данном сите (ГОСТ Р 58952.8-2020).

Оптическая микроскопия использовалась для установления механизма влияния разработанных эмульгаторов на различные характеристики битумных эмульсий. Микроструктуру битумной эмульсии изучали на микроскопе Axioskop40. Наблюдение битумной эмульсии проводили в проходящем свете при увеличении в 1000 раз.

Для получения цементобетона, модифицированного битумными эмульсиями были выбраны следующие материалы:

1. Портландцемент 500-ДО-Н производитель АО «Мордовцемент».
2. Эмульсия битумная дорожная анионная медленнораспадающаяся на основе флотогудрона [21].
3. Щебень фракции 5–10 М400.
4. Песчано-гравийная смесь (ПГС).

Испытание бетона на сжатие и испытание на растяжение при изгибе осуществлялось по стандартным нормативным методикам Российской Федерации.

Результаты и обсуждение

Для получения тонкодисперсных, устойчивых битумных эмульсий очень важно правильно определить процентное содержание щелочи в эмульсии. В работах П.А. Ребиндера [10] показана кинетика распада битумной эмульсии при взаимодействии с минеральными материалами в зависимости от наличия свободной щелочи в системе. Повышение содержания щелочи в системе приводит к возрастанию дисперсности, которая, достигая максимума, снижается при дальнейшем увеличении концентрации щелочи в эмульсии.

Кроме того, переизбыток щелочи, адсорбируясь на поверхности каменного материала, приводит к пассивации последнего, что значительно замедляет процессы взаимодействия битумной эмульсии с минеральными материалами и снижает адгезию битума к ним [22–24]. Наряду с замедлением распада эмульсий избыток щелочи оказывает влияние на их свойства и свойства выделенного из них битума, снижая адгезию каменного материала в результате адсорбции щелочи на его поверхности. Поэтому необходимо правильно рассчитать оптимальное содержание щелочи.

Количество едкого натра A , требуемого для омыления одного грамма эмульгатора, было рассчитано по формуле:

$$A = \frac{a \cdot 0,714}{1000} + C, \quad (3)$$

где a – число омыления эмульгаторов (мг КОН на 1 г);

0,714 – коэффициент пересчета молекулярного веса от едкого натра к едкому калию;

C – избыток едкого натра в водном растворе эмульгатора, 30 %.

В качестве эмульгатора был использован флотогудрон. Флотогудрон представляет собой смесь вторичных гудронов, получаемых от дистилляции жирных кислот или из выделенных гудронов первичных растительных масел, и по химическому составу близок к анионоактивным эмульгаторам.

В результате расчета было определено, что для полного протекания реакции омыления необходимо ввести 0,13 г NaOH для полного эмульгирования 1 г флотогудрона. Качество и полнота реакции влияет на такие свойства БЭ, как условная вязкость, однородность и устойчивость.

Для определения оптимального содержания флотогудрона в битумной эмульсии изучались её основные технологические и эксплуатационно-технические характеристики в зависимости от концентрации эмульгатора от 0,5 до 5 %. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики битумной эмульсии

Table 2

Characteristics of bitumen emulsion

№ п/п	Показатель	Способ приготовления эмульсии											
		комбинированный способ						традиционный способ					
1	Концентрация эмульгатора, %	0,5	1	2	3	4	5	0,5	1	2	3	4	5
2	Условная вязкость, не более, с	21,4	22,6	25	24,4	24,1	23,5	21	22,1	23,8	23	22,8	22,5
3	Остаток на сите 0,14 мм, не более, %	0,5	0,22	0,05	0,1	0,18	0,25	0,8	0,58	0,33	0,25	0,3	0,37
4	Остаток на сите 0,14 мм после хранения 7 сут, не более, %	0,75	0,3	0,1	0,15	0,25	0,32	1,5	0,9	0,5	0,4	0,55	0,67

Из табл. 2 видно, что зависимость условной вязкости битумных эмульсий от концентрации флотогудрона с 0,5 до 5 % имеет максимальные значения при 2%-ном содержании эмульгатора до 25 с при комбинированной технологии эмульгирования и до 23,8 с в случае с традиционным эмульгированием, где эмульгатор вводится только в водный щелочной раствор. Можно предположить, что битумная эмульсия с 2 % флотогудрона, полученная комбинированным способом, более структурирована и имеет меньший размер битумных частиц.

Однородность битумных эмульсий определяется путем прохождения частиц битума через сито с размерами отверстий 0,14 мм. Из табл. 2 видно, что минимальные значения остатка на сите у битумной эмульсии, полученной комбинированным эмульгированием, при концентрации флотогудрона в 2 % абсолютная величина остатка не превышает значения 0,05 % от массы БЭ, т.е. практически полностью проходит через сито. Битумная эмульсия, полученная традиционным способом, имеет минимальные значения при 3%-ном содержании эмульгатора и характеризуется большим остатком на сите, равным 0,25 %.

Таким образом, по показателю однородности БЭ, полученная комбинированным эмульгированием, в пять раз лучше, чем битумная эмульсия, приготовленная традиционным способом. Результаты по однородности полностью коррелируют с показателями условной вязкости эмульсии, чем выше вязкость битумной эмульсии, тем выше ее однородность.

Также была проведена оценка изменения устойчивости эмульсий, которая определяется путем прохождения частиц битума через сито с размерами отверстий 0,14 мм после семисуточного хранения. Как видно из табл. 2, значения имеют также экстремальный ха-

рактен с минимумами при тех же концентрациях эмульгаторов, что и в случае изучения однородности. Устойчивость эмульсии при оптимальном содержании эмульгатора 2 % практически не изменилась и составляет 0,1 % остатка на сите битумных частиц в случае приготовления комбинированным способом. Битумная эмульсия, приготовленная традиционным способом, обладает меньшей устойчивостью и при оптимальной концентрации в 3 % имеет значение устойчивости 0,4 % остатка на сите битумных частиц. Значение устойчивости данных эмульсий полностью согласуется со значениями по однородности.

Следует отметить, что эмульсия, обладающая меньшими размерами частиц, более структурированная, и обладает высокой устойчивостью при хранении, также можно отметить, что хорошо зарекомендовала себя технология комбинированного эмульгирования – по истечении 7 сут прирост остатка на сите оказался незначительным и соответствующим требованиям нормативных стандартов, за исключением состава с содержанием флотогудрона 0,5 %.

На основании полученных результатов определены оптимальные составы битумных эмульсий (табл. 3).

Таблица 3

Оптимальные составы битумных эмульсий

Table 3

Optimal compositions of bitumen emulsions

Компоненты	Битумная эмульсия на флотогудроне (комбинированный способ), %	Битумная эмульсия на флотогудроне (традиционный способ), %
Битум дорожный БНД 70/100	55,0	55,0
Флотогудрон	2,0	3,0
Щелочь (NaOH)	0,26	0,39
Вода	42,74	41,61

Одним из основных методов изучения структуры и свойств битумных эмульсий является оптическая микроскопия. Для изучения была выбрана битумная эмульсия, полученная комбинированным способом с 2%-ным содержанием эмульгатора – флотогудрона.

На рисунке представлена микрофотография (увеличение $\times 1000$) исходной битумной эмульсии. Наблюдается густая сетка частиц битума различных размеров – дисперсная фаза, составляющая 55 % в эмульсии. Представлено изображение битумных частиц, которые в реальных условиях осуществляют хаотичные движения.

Эмульсия является полидисперсной системой, то есть состоит из частиц различных размеров, определяемых крайними значениями их величины, равными от 2 до 5 мкм, это доказывает, что вся битумная эмульсия – 100 % проходит через сито № 014, по которому проводится оценка однородности и устойчивости эмульсий при хранении.

Следующим этапом исследования было определение влияния полученной тонкодисперсной битумной эмульсии на основные эксплуатационные свойства укатываемого бетона.

Битуминирование укатываемого бетона, осуществлялось путем введения в бетонную смесь анионоактивных битумных эмульсий (от 2,5 до 7,5 % от массы цемента), что позволило повысить эксплуатационные свойства отвердевшего бетона. Выбор концентрации БЭ согласуется с другими работами [25–27].

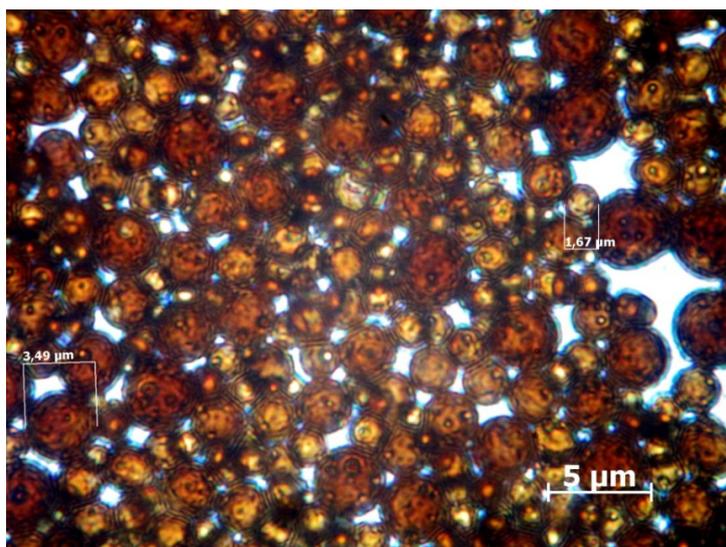


Рис. Оптическая микрофотография битумной эмульсии (увеличение $\times 1000$)
 Fig. Optical micrography of a bitumen emulsion (a magnification of $\times 1000$)

Свойства цементного бетона в зависимости от концентрации битумной эмульсии оценивались по истечении 28 сут твердения в нормально-влажностных условиях. Результаты исследования приведены в табл. 4. Как видно из табл. 4, наблюдается возрастание прочности бетона на сжатие на 32 %, с 11,5 до 15,2 МПа и прочность на растяжение при изгибе с 3,14 до 4,35 МПа (38 %) при 5 % концентрации анионоактивной битумной эмульсии в модифицированном бетоне. С дальнейшим возрастанием концентрации битумной эмульсии в бетоне наблюдается спад механической прочности бетона.

Также при 5%-ной концентрации анионоактивной битумной эмульсии в модифицированном бетоне достигается наивысшая плотность бетона. Создание более однородной и плотной структуры бетона объясняет его большую прочность на сжатие и на изгиб.

Таблица 4

Свойства цементного бетона от концентрации битумной эмульсии

Table 4

Properties of cement concrete from the concentration of bitumen emulsion

№ п/п	Состав	Свойства цементного бетона			
		прочность на сжатие, МПа	прочность на растяжение при изгибе, МПа	плотность, г/см ³	марка по морозостойкости
1	Контрольный состав, немодифицированный	11,5	3,14	2,09	F 50
2	Состав, модифицированный 2,5 % БЭ	12,0	3,64	2,11	F 75
3	Состав, модифицированный 5,0 % БЭ	15,2	4,35	2,14	F 100
4	Состав, модифицированный 7,5 % БЭ	11,2	3,9	2,09	F 100

Введение битумной эмульсии в бетонную смесь позволяет повысить морозостойкость цементобетона. Это происходит за счет кольматации пор бетона частицами битумной эмульсии, снижения водотвердого отношения за счет увеличения подвижности бетонной смеси, что приводит к снижению пористости и водопоглощения бетона. Из табл. 4 также

видно, что показатель морозостойкости увеличивается в два раза с 50F циклов замораживания и оттаивания до F75 при 2,5%-ной и до F100 при 5%-ной концентрации анионоактивной битумной эмульсии соответственно. Дальнейшее увеличение концентрации битумной эмульсии в структуре бетона не приводит к увеличению морозостойкости вследствие падения прочностных характеристик и меньшей плотности бетона.

Выводы

1. В результате исследования определены оптимальная рецептура и технология комбинированного эмульгирования для приготовления тонкодисперсной битумной эмульсии.
2. Доказано, что битумные эмульсии, полученные комбинированным способом, в значительной мере превосходят по однородности и устойчивости эмульсии, полученные традиционным способом, и полностью отвечают требованиям стандартных норм Российской Федерации.
3. Методами оптической микроскопии показана полидисперсная структура разработанной тонкодисперсной эмульсии и определен размер битумных частиц (от 2 до 5 мкм).
4. Доказана возможность битуминирования цементобетона, путем введения в бетонную смесь тонкодисперсной анионоактивной битумной эмульсии.
5. Введение битумной эмульсии (от 2,5 до 7,5 % от массы цемента) улучшает эксплуатационно-технические характеристики бетона, повышаются: прочность на сжатие на 32 %, прочность на растяжение при изгибе на 38 %, морозостойкость в два раза.
6. Найдена оптимальная концентрация модифицирующей добавки, так, с введением 5%-ной концентрации анионоактивной битумной эмульсии в модифицированном бетоне, создается более однородная и плотная структура бетона с наилучшими эксплуатационно-техническими характеристиками.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Yang M., Paudel S.R., Gao Z.J. Snow-proof roadways using steel fiber-reinforced fly ash geopolymers mortar-concrete // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 33, no. 2. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003537
2. Cement concrete modified by fine-dispersed anionactive bitumen emulsion for road construction / A. Garipov, D. Makarov, V. Khozin, S. Stepanov, D. Ayupov // 2020 International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering, 29 April – 15 May. – Kazan, Virtual, 2020. – P. 012107. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012107
3. Разработка дорожно-строительного материала на основе обработанной цементом щебеночно-песчаной смеси оптимального гранулометрического состава / Л.Ф. Мавлиев, Е.А. Вдовин, Н.В. Коновалов, К.Р. Хузиахметова, Н.Б. Шарапова // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2019. – Вып. 4 (60). – С. 435–443.
4. Фомин А.Ю., Аскарова Р.Н., Хозин В.Г. Высокопрочный серощебень из карбонатных пород для устройства оснований в конструкциях дорожных одежд // Известия Казан-

ского государственного архитектурно-строительного университета. – 2022. – Т. 59, № 1. – С. 54–63. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_54

5. Wathiq Hammodat W. Investigate road performance using polymer modified concrete // 3rd International Conference on Materials Engineering and Science, 28–30 December. – Kuala Lumpur, 2020. – P. 2089–2094.

6. Морозов Н.М., Красиникова Н.М., Боровских И.В. Факторы, влияющие на разрушение бетона дорожных плит // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – Т. 59, № 7. – С. 30–38.

7. Смирнов А.В. Дорожные конструкции с асфальтобетонными покрытиями для тяжёлого движения // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2010. – Т. 18, № 4. – С. 32–35.

8. Абрамзон А.А. Поверхностно-активные вещества: свойства и применение. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1981. – 304 с.

9. Кучма М.И. Поверхностно-активные вещества в дорожном строительстве. – М.: Транспорт, 1980. – 191 с.

10. Ребиндер П.А. Поверхностно активные вещества. – М.: Знание, 1961. – 46 с.

11. Aboutalebi Esfahani M., Khoddami S.M.N. Evaluation and identification of parameters affecting the penetration of emulsion bitumen on aggregates // Australian Journal of Civil Engineering. – 2022. – Vol. 20, no. 1. – P. 195–207. DOI: 10.1080/14488353.2021.1945258

12. Esfahani M.A., Khatayi A. Effect of type and quantity of emulsifier in bitumen polymer emulsion on microsurfacing performance // International Journal of Pavement Engineering. – 2022. – Vol. 23, no. 4. – P. 957–971. DOI: 10.1080/10298436.2020.1784416

13. Наномодифицированные битумные эмульсии строительного назначения / А.В. Мурафа, Д.Б. Макаров, М.А. Нуриев, В.Г. Хозин // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2010. – Вып. 2 (14). – С. 245–249.

14. Antonova I., Ayupov D. Anionic bitumen emulsions for waterproofing // 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering, 21–28 April. – Kazan, 2021. – P. 04007. DOI: 10.1051/e3sconf/202127404007

15. Теоретические аспекты расслаиваемости битумполимерных вяжущих / Д.А. Аюпов, Ю.Н. Хакимуллин, Д.Б. Макаров, Р.И. Казакулов // Вестник Технологического университета. – 2016. – Вып. 19 (23). – С. 50–52.

16. Gong Y., Shao T., Chen L. Preparation and characterization of fluorine-containing soap-free acrylic emulsion // Pigment and Resin Technology. – 2021. – No. 50. – P. 41–47. DOI: 10.1108/PRT-02-2020-0015

17. Wu Y.F., Qu X. Influence of Different Types of Emulsifiers on Properties of Emulsified Asphalt Binder and Its Evaporation Residue by Molecular Dynamics Simulation // Advances in Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 2021. – P. 3313460. DOI: 10.1155/2021/3313460

18. Almohammedawi A., Mollenhauer K. Current Research and Challenges in Bitumen Emulsion Manufacturing and Its Properties // Materials. – 2022. – Vol. 15, no. 6. – P. 2026. DOI: 10.3390/ma15062026

19. Bitumen emulsion in malaysia-a conspectus / H. Yaacob, M.R. Hainin, Md.M.A. Aziz, M.N.M. Warid, F-L. Chang, N.A. Hassan // Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering). – 2013. – No. 65. – P. 97–104. DOI: 10.11113/jt.v65.2153

20. Relationship between stability of anionic asphalt emulsion and oil-water interfacial tension. Zhongguo Shiyou Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban) / P.H. Zhao, W.Y. Fan, S. Dong,

G.Z. Nan, S.J. Zhang // *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*. – 2012. – No. 36. – P. 175–179. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2012.03.030

21. Битумная эмульсия: пат. Рос. Федерация / В.Г. Хозин, Д.Б. Макаров, А.В. Мурафа, А.П. Рахматуллина, Р.А. Ахмедьянова, А.Г. Лиакумович, Т.К. Гибадуллин, В.И. Мошков. – № 2185878; заявл. 13.09.2001; опубл. 27.07.2002. – 7 с.

22. Experimental investigation of optimum adhesion properties for anionic emulsions in road maintenance applications / S. Ignatavicius, A. Kavanagh, M. Brennan, D. Colleran, J. Sheahan, S. Newell // *Construction and Building Materials*. – 2021. – No. 304. – P. 124678. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124678

23. Influence of bitumen emulsion on the curing behaviour of standardised cold bitumen emulsion mortars / L. Meknaci, A. Graziani, C. Mignini, A.D. Henni, M. Miljković // *Road Materials and Pavement Design*. – 2021. – Vol. 23, no. S1. – P. 99–115. DOI: 10.1080/14680629.2021.2017329

24. Modification of harsh cement pavement concretes with bitumen emulsion / A. Garipov, D. Makarov, V. Khozin, S. Stepanov // 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering, 21–28 April. – Kazan, 2021. – P. 351–363. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8_38

25. Dareyni M., Mohammadzadeh M.A., Delarami A. Effect of cationic asphalt emulsion as an admixture on transport properties of roller-compacted concrete // *Construction and Building Materials*. – 2018. – No. 163. – P. 724–733. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.156

26. Effects of cement contents on the performance of cement asphalt emulsion mixtures with rapidly developed early-age strength / Y. Tian, D. Lu, R. Ma, J. Zhang, W. Li, X. Yan // *Construction and Building Materials*. – 2020. – No. 244. – P. 118365. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118365

27. Dareyni M., Mohammadzadeh M.A. Fresh and mechanical properties of roller compacted concrete containing Cationic Asphalt Emulsion admixture // *Construction and Building Materials*. – 2019. – No. 198. – P. 226–236. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.186

References

1. Yang M., Paudel S.R., Gao Z.J. Snow-proof roadways using steel fiber-reinforced fly ash geopolymer mortar-concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2021, vol. 33, no. 2. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003537

2. Garipov A., Makarov D., Khozin V., Stepanov S., Ayupov D. Cement concrete modified by fine-dispersed anionactive bitumen emulsion for road construction. *2020 International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering*, 29 April – 15 May, Kazan, Virtual, 2020, с. 012107. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012107

3. Mavliev L.F., Vdovin E.A., Konovalov N.V., Huziahmetova K.R., Sharapova N.B. Razrabotka dorozhno-stroitel'nogo materiala na osnove obrabotannoy tsementom shchebenochno-peschanoy smesi optimal'nogo granulometricheskogo sostava [Development of road-building material based on gravel-sand-cement mixture with optimal granulometric composition]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2019, iss. 4 (50), pp. 435-443.

4. Fomin A.Y., Askarova R.N., Khozin V.G. Vysokoprochnyy seroshcheben' iz karbonatnykh porod dlya ustroystva osnovaniy v konstruktsiyakh dorozhnykh odezhd [igh-strength crushed stone from carbonate rocks for the arrangement of bases in road pavement structures]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2022, vol. 59, no. 1, pp. 54-63. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_54

5. Wathiq Hammodat W. Investigate road performance using polymer modified concrete. *3rd International Conference on Materials Engineering and Science*, 28–30 December, Kuala Lumpur, 2020, pp. 2089–2094.
6. Morozov N.M., Krasinikova N.M., Borovskikh I.V. Faktory, vliyayushchiye na razrusheniye betona dorozhnykh plit [Factors affecting the destruction of concrete road slabs]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal*, 2015, vol. 59, no. 7, pp. 30-38.
7. Smirnov A.V. Dorozhnyye konstruksii s asfal'tobetonnyimi pokrytiyami dlya tyazhologo dvizheniya [Road structures with asphalt concrete pavements for heavy traffic]. *Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobil'no-dorozhnoy akademii*, 2010, vol. 18, no. 4, pp. 32-35.
8. Abramzon A.A. Poverkhnostno-aktivnyye veshchestva: Svoystva i primeneniye. Izd. 2, pererab. i dop. [Surfactants: Properties and uses. Ed. 2, revised. and additional]. Leningrad, Khimiya, 1981, 304 p.
9. Kuchma M.I. Poverkhnostno-aktivnyye veshchestva v dorozhnom stroitel'stve [Surfactants in road construction]. Moscow, Transport, 1980, 191 p.
10. Rebinder P.A. Poverkhnostno aktivnyye veshchestva [Surfactants]. Moscow, Znaniye, 1961, 46 p.
11. Aboutalebi Esfahani M., Khoddami S.M.N. Evaluation and identification of parameters affecting the penetration of emulsion bitumen on aggregates. *Australian Journal of Civil Engineering*, 2022, vol. 20, no. 1. pp. 195-207. DOI: 10.1080/14488353.2021.1945258
12. Esfahani M.A., Khatayi A. Effect of type and quantity of emulsifier in bitumen polymer emulsion on microsurfacing performance. *International Journal of Pavement Engineering*, 2022, vol. 23, no. 4. pp. 957-971. DOI: 10.1080/10298436.2020.1784416
13. Murafa A.V., Makarov D.B., Nuriev M.A., Khozin V.G. Nanomodifitsirovannyye bitumnyye emul'sii stroitel'nogo naznacheniya [Nanomodified bitumen emulsions for building purposes]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2010, iss. 2 (14), pp. 245-249
14. Antonova I., Ayupov D. Anionic bitumen emulsions for waterproofing. *2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering*, 21-28 April, Kazan, 2021, c. 04007. DOI: 10.1051/e3sconf/202127404007
15. Ayupov D.A., Khakimullin Yu.N., Makarov D.B., Kazakulov R.I. Teoreticheskiye aspekty rasslaivayemosti bitumpolimernykh vyazhushchikh [Theoretical aspects of delamination of bitumen polymer binders]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, iss. 19 (23), pp. 50-52.
16. Gong Y., Shao T., Chen L. Preparation and characterization of fluorine-containing soap-free acrylic emulsion. *Pigment and Resin Technology*, 2021, no. 50, pp. 41-47. DOI: 10.1108/PRT-02-2020-0015
17. Wu Y.F., Qu X. Influence of Different Types of Emulsifiers on Properties of Emulsified Asphalt Binder and Its Evaporation Residue by Molecular Dynamics Simulation. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 2021, pp. 3313460. DOI: 10.1155/2021/3313460
18. Almohammedawi A., Mollenhauer K. Current Research and Challenges in Bitumen Emulsion Manufacturing and Its Properties. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 6, pp. 2026. DOI: 10.3390/ma15062026
19. Yaacob H., Hainin M.R., Aziz Md.M.A., Warid M.N.M., Chang F-L., Hassan N.A. Bitumen emulsion in malaysia-a conspectus. *Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering)*, 2013, no. 65, pp. 97-104. DOI: 10.11113/jt.v65.2153

20. Zhao P.H., Fan W.Y., Dong S., Nan G.Z., Zhang S.J. Relationship between stability of anionic asphalt emulsion and oil-water interfacial tension. *Zhongguo Shiyou Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban). Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2012, no. 36, pp. 175-179. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2012.03.030
21. V.G. Khozin, D.B. Makarov, A.V. Murafa, A.P. Rakhmatullina, R.A. Akhmedyanova, A.G. Liakumovich, T.K. Gibadullin, V.I. Moshkov. Bitumnaya emul'siya [Bituminous emulsion]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2185878 (2002).
22. Ignatavicius S., Kavanagh A., Brennan M., Colleran D., Sheahan J., Newell S. Experimental investigation of optimum adhesion properties for anionic emulsions in road maintenance applications. *Construction and Building Materials*, 2021, no. 304, pp. 124678. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124678
23. Meknaci L., Graziani A., Mignini C., Henni A.D., Miljković M. Influence of bitumen emulsion on the curing behaviour of standardised cold bitumen emulsion mortars. *Road Materials and Pavement Design*, 2021, vol. 23., no. S1, pp. 99-115. DOI: 10.1080/14680629.2021.2017329
24. Garipov A., Makarov D., Khozin V., Stepanov, S. Modification of harsh cement pavement concretes with bitumen emulsion. *2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering*, 21-28 April, Kazan, 2021, pp. 351-363. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8_38
25. Dareyni M., Mohammadzadeh M.A., Delarami A. Effect of cationic asphalt emulsion as an admixture on transport properties of roller-compacted concrete. *Construction and Building Materials*, 2018, no. 163, pp. 724-733. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.156
26. Tian Y., Lu D., Ma R., Zhang J., Li W., Yan X. Effects of cement contents on the performance of cement asphalt emulsion mixtures with rapidly developed early-age strength. *Construction and Building Materials*, 2020, no. 244, pp. 118365. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118365
27. Dareyni M., Mohammadzadeh M.A. Fresh and mechanical properties of roller compacted concrete containing Cationic Asphalt Emulsion admixture. *Construction and Building Materials*, 2019, no. 198, pp. 226-236. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.186