

А.А. ИГНАТЬЕВ^{1,2}, П.Б. РАЗГОВОРОВ¹, В.М. ГОТОВЦЕВ¹¹ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Россия²ФАУ «РОСДОРНИИ», г. Москва, Россия

СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И ПОТРЕБИТЕЛЬСКИЕ СВОЙСТВА ГРАНУЛИРОВАННЫХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ С ВКЛЮЧЕНИЕМ ФОСФОГИПСА И ВТОРИЧНОГО ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА

Аннотация. Рассмотрены эффекты структурообразования в дисперсных системах, получаемых путем гранулирования окатыванием при изготовлении асфальтобетонных смесей с включением до 30% фосфогипса. При изучении физико-химических и потребительских свойств битума с добавкой полиэтилентерефталата использован метод измерения краевого угла смачивания. Микрофотографии модифицированного вяжущего позволяют судить об изменении состояния поверхности битума. Зарегистрированы тепловые эффекты как результат модифицирования свойств таких материалов. Установлено, что получение асфальтобетонной смеси методом гранулирования окатыванием обеспечивает высокие показатели прочности на сжатие отвержденного материала. Выявлен рост водоустойчивости асфальтобетона при одновременном введении в дисперсную систему полиэтилентерефталата и порошка промышленного отхода – фосфогипса. Обнаружено синергетическое влияние указанных добавок на достижение положительного эффекта структурообразования в асфальтовяжущих материалах, что выявляет новые перспективы их использования в производстве строительных работ.

Ключевые слова: композиционные материалы, асфальтобетонные смеси, модификация вяжущего, фосфогипс, полиэтилентерефталат, гранулирование окатыванием.

А.А. IGNATYEV^{1,2}, P.B. RAZGOVOROV¹, V.M. GOTOVTSEV¹,¹Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia²FAI "ROSDORNI", Moscow, Russia

STRUCTURE FORMATION AND CONSUMER PROPERTIES OF GRANULAR ASPHALT-CONCRETE MIXTURES WITH PHOSPHOGYPSUM INCLUSION AND SECONDARY POLYETHYLENE TEREPHTHALATE

Abstract. The effects of structure formation in disperse systems obtained by pelletizing in the manufacture of asphalt concrete mixtures with the inclusion of up to 30% phosphogypsum have been considered. In studying the physical-chemical and consumer properties of bitumen with polyethylene terephthalate additive they used the method of measuring the wetting edge angle. Microphotographs of modified binder make it possible to judge about the change of bitumen surface state. Thermal effects occurring as a result of modifying properties of such materials were registered. It was found that production of asphalt-concrete mixture by pelletizing provides high indicators of compressive strength of the hardened material. We found an increase in asphalt concrete water resistance at simultaneous introduction of polyethylene terephthalate and industrial waste phosphogypsum powder into the disperse system. Synergetic effect of the above additives on the achievement of positive effect of structure formation in asphalt-binding materials has been revealed, which reveals new prospects for their use in the production of construction works.

Keywords: composite materials, asphalt-concrete mixtures, binder modification, phosphogypsum, polyethylene terephthalate, pelletizing.

© Игнатьев А.А., Разговоров П.Б., Готовцев В.М., 2023

Введение

Под термином «структура» в дисперсных материалах понимается пространственный каркас, образованный связями атомов, ионов, молекул, мицелл, кристаллических сростков и частиц коллоидных размеров [1].

По типу контактов различают коагуляционные (коагуляционно-тиксотропные) и конденсационные (конденсационно-кристаллизационные) дисперсные системы. В коагуляционных дисперсных системах частицы взаимодействуют через прослойку жидкой дисперсной среды и связаны действием Ван-дер-Ваальсовых сил притяжения. Конденсационные дисперсные системы формируются в процессе выделения новой фазы из перенасыщенных паров, расплавов и растворов [2].

Эффект структурообразования и детальное изучение коллоидно-химических свойств [3] лежат в основе создания большинства композиционных материалов, используемых в современном строительстве и при реконструкции зданий и сооружений. Основная идея получения идеальных композитов сформулирована П.А. Ребиндером: «Самый простой путь повышения прочности любого твердого тела почти до идеального потолка состоит в измельчении его до частиц, по порядку величины соответствующих расстояниям между опасными слабыми местами. Если такие частицы плотно упаковать или склеить тончайшими прослойками, полученный материал будет плотным, непроницаемым для жидкостей и газов, высокопрочным и долговечным» [4].

Асфальтобетон представляет собой композиционный материал, в котором в качестве наполнителя используют каменный материал, отсеvy дробления каменного материала или песок и минеральный порошок, а в качестве вяжущего применяют битум или полимерно-битумное вяжущее. Основным структурообразующим компонентом смеси является минеральный порошок – мелкодисперсная фракция, обладающая высокоразвитой удельной поверхностью. На смачивание поверхности минерального порошка расходуется до 95% вводимого в асфальтобетонную смесь битума [5] – наиболее дорогостоящего компонента смеси.

Выполнение требований П.А. Ребиндера оказывается возможным за счет использования приема гранулирования окатыванием минерального порошка (с битумом в качестве связующего) [6]. Проведенные исследования [6] показали, что гранулированное асфальтовяжущее обладает высокими показателями прочности, минимальным водонасыщением, отсутствием склонности к слеживанию. На этой базе разработаны основы технологии [7], направленной на решение глобальной экологической проблемы – утилизации фосфогипса (отхода производства фосфорной кислоты и удобрений). Накопленные объемы этого продукта в России исчисляются сотнями миллионов тонн и ежегодно увеличиваются, занимая огромные полезные площади и создавая угрозу окружающей среде.

Первые попытки использования фосфогипса в качестве минерального порошка для асфальтобетонной смеси, полученной по технологии гранулирования окатыванием, позволили получить материал, удовлетворяющий требованиям отечественных стандартов для асфальтобетонных смесей по большинству физико-химических и потребительских свойств, за исключением водостойкости. Образцы разрушились после длительного водонасыщения. В результате продолжительных поисков удалось подобрать подходящую модифицирующую добавку для битума, действие которой обеспечило необходимый уровень водостойкости асфальтобетона. Подходящим техническим решением указанной задачи является использование отходов пластиковой тары – полиэтилентерефталата (ПЭТФ) [7]. Промышленное внедрение разработанной технологии, как ожидается, позволит не только повысить качество дорожных покрытий, но и будет способствовать решению экологической проблемы – утилизации бытовых отходов ПЭТФ. Отдельные вопросы утилизации ПЭТФ в асфальтобетон обсуждались данных работах [8-12]. Следует отметить, что механизмы реализации эффектов структурообразования в таких сложных системах к настоящему времени изучены еще недостаточно. В связи с этим получение новой информации по данному вопросу представляется весьма актуальным.

Цель работы – научное обоснование ранее описанного [6, 7] эффекта повышения водоустойчивости асфальтобетона с использованием фосфогипса в качестве минерального порошка при модифицировании битума полиэтилентерефталатом.

Применение полимерно-битумных вяжущих относят к числу активно внедряемых мировых технологий строительства и ремонта покрытий автомобильных дорог. В России для модифицирования битумов применяют сополимеры бутадиена и стирола, растворы синтетических каучуков [13]. Результатом введения полимеров в битумы является повышение их деформативности при температурах около 0°C, теплоустойчивости и эластичности. Улучшение эксплуатационных свойств битумов может быть достигнуто в случае, если полимер растворяется или набухает в среде битума, образуя структурную сетку. Однако, в отличие от термоэластичных полимеров, молекулярная структура ПЭТФ представляется линейной. Кроме того, в процессе гранулирования окатыванием частицы минерального порошка формируют упорядоченную структуру с прослойками связующего минимальной толщины между ними. Это вызывает необходимость изучения характера взаимодействия битума с полимером, обеспечивающего повышение водоустойчивости асфальтобетона с включением фосфогипса. Практическая значимость таких исследований объясняется необходимостью разработки передовых технологий производства новых асфальтобетонных смесей с получением высокого экологического и экономического эффекта от внедрения. Специфические особенности разработанной технологии представлены в работе [14].

Модели и методы

Для достижения цели исследования использованы современные методы исследования структуры получаемых материалов. На заключительном этапе оценивали стабильность при хранении эксплуатационных (потребительских) свойств полученной гранулированной асфальтобетонной смеси по ГОСТ 12801-98. Процесс формирования асфальтобетонной смеси предполагает учет взаимного влияния друг на друга множества факторов, степень воздействия которых на конечный результат не вполне очевидна.

В качестве минерального порошка для приготовления гранулированной асфальтобетонной смеси применяли фосфогипс, предоставленный АО «Апатит» (Балаково, Саратовская обл.). Удельную поверхность образцов фосфогипса из полугидрата сульфата кальция ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$, марка Б), ТУ 2141-693-00209438-2015 «Гипс технический», оценивали различными методами (см. таблицу 1).

Таблица 1 - Площадь удельной поверхности фосфогипса марки Б, по различным методам

Метод БЭТ	
Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$	10.3 ± 0.3
Удельный объем монослоя, мл НТД/г	2.5
Константа БЭТ	62.0
Наклон k прямой $f = k \cdot h + b$, г/мл НТД	$4.0 \cdot 10^{-1} \pm 1.3 \cdot 10^{-2}$
Отсекаемый отрезок b прямой $f = k \cdot h + b$, г/мл НТД	$6.6 \cdot 10^{-3} \pm 1.8 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент корреляции	0.9984
Метод STSA	
Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$	10.8 ± 1.2
Наклон k прямой $V = k \cdot t + b$, мл НТД/ (г·нм)	$7.0 \cdot 10^{-1} \pm 7.7 \cdot 10^{-2}$
Отсекаемый отрезок b прямой $V = k \cdot t + b$, мл НТД/г	$-1.4 \cdot 10^{-1} \pm 3.5 \cdot 10^{-2}$
Коэффициент корреляции	0.9823

Технические характеристики фосфогипса марки Б отвечают требованиям ГОСТ 32761-2014 для МП-3, а по ряду показателей они схожи с традиционно применяемым доломитовым минеральным порошком МП-1.

Проведенный анализ фосфогипса методами низкотемпературной адсорбции БЭТ и статистических толщин STSA в среде азота на приборе Sorbi-MS (Россия) свидетельствует о достаточно заметной удельной поверхности частиц, составляющей 10.3-10.8 $\text{м}^2/\text{г}$ (таблица 1). Изучение микрофотографий, полученных на сканирующем электронном микроскопе Tescan VEGA 3 SBH (Чехия), подтвердило относительно высокую дисперсность данного материала: основной размер его частиц составляет 25-35 мкм, хотя в отдельных случаях наблюдаются

включения до 150-250 мкм (рисунок 1). В то же время отмечается умеренная пористость полуводного сульфата кальция марки Б, что является результатом процесса перекристаллизации.

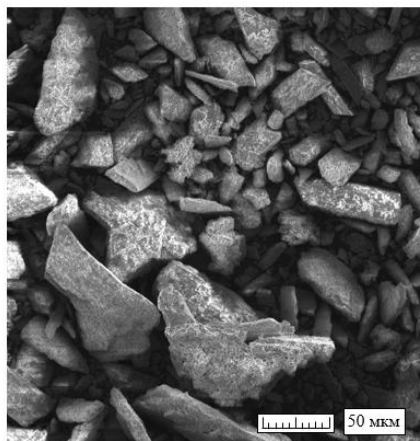


Рисунок 1 – Микрофотографии фосфогипса марки Б ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$); напряжение 5000 эВ.

С целью повышения водоустойчивости гранулированной смеси с применением фосфогипса принимали решение о модификации битумного вяжущего.

В качестве модифицируемой основы отобран нефтяной дорожный битум марки 60/90 по ГОСТ 22245-90 ПАО АНК «БашНефть» г. Уфа, а в качестве модификатора – очищенный вторичный ПЭТФ-флекс фр. 10-12 мм ООО «Ярфлекс» г. Ярославль. Данный модификатор, являющийся распространённым полимером в производстве одноразовой тары для розлива и хранения жидких сред, отличается высокими технико-эксплуатационными характеристиками.

Для получения нового вяжущего использовали физико-механическую модификацию при температуре 230-235 °С без высокотемпературной деструкции полимера. В ходе исследований допустимую концентрацию ПЭТФ определили на уровне 10% от массы битума. Предварительно результаты модификации битума оценивали с применением дифференциально-сканирующей калориметрии на приборе DSC 200 Phoenix фирмы NETZSCH (Германия) (рисунок 2).

Теплота, мДж/мг

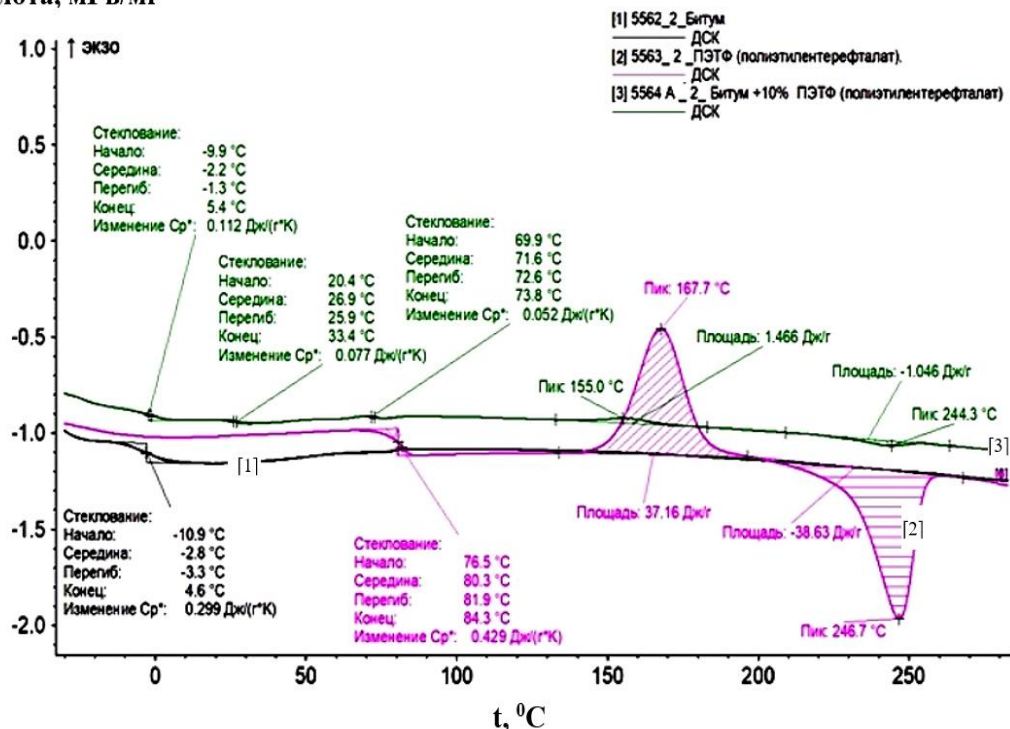


Рисунок 2 – Термограммы, снятые для образцов битума (1), модификатора ПЭТФ (2) и системы битум – модификатор ПЭТФ (3).

Метод заключался в регистрации тепловых эффектов в исследуемом образце с ПЭТФ при нагревании его с постоянной скоростью и сравнении полученных результатов с эталоном (в данном случае – тиглем без включения добавки).

Замеры краевых углов смачивания осуществляли на предметных стеклах (рисунок 3).

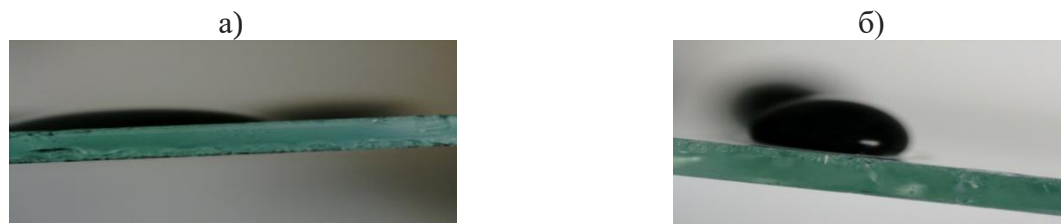


Рисунок 3 – Фотографии каплей битума с включением 5 (а) и 20 мас% ПЭТФ (б).

Капли битума с включением ПЭТФ (5, 10, 15, 20 мас%) выдерживали на них при температуре 100°С в течение 20 мин, после чего производили съемку поверхности и фиксировали значения краевых углов смачивания.

Результаты исследования и их анализ

Исследования водоустойчивости асфальтобетона на основе фосфогипса проводили при комнатной температуре, при этом анализируемые образцы не отвечали необходимым требованиям (ГОСТ 9128-2013). Прочности образцов с включением традиционного минерального порошка и таковых с добавкой фосфогипса оказались сопоставимы, однако водоустойчивость последних – ниже, что, вероятно, обусловлено природой добавки (в частности, растворимостью).

Напротив, повышение водоустойчивости материала, наблюдаемое при введении в битум ПЭТФ, может объясняться, во-первых, образованием истинного раствора битума с полиэтилентерефталатом, устойчивого термодинамически и обладающего гидрофобными свойствами. Вторая гипотеза предполагает, что смесь битума с ПЭТФ при охлаждении разделяется на фазы и при этом, возможно, формируется новая структура материала, которая отвечает повышению в системе внутреннего давления, препятствующего диффузии воды в структуру композита.

Простым методом исследования поверхностных эффектов является измерение краевого угла смачивания θ_0 [3]. Его значение позволяет определить соотношение сил когезии в жидкой фазе и адгезии в области контакта жидкой и твердой фаз.

Повышение содержания ПЭТФ в битуме приводит к резкому росту равновесного краевого угла смачивания поверхности (таблица 2).

Таблица 2 - Изменение краевого угла смачивания поверхности при повышении содержания ПЭТФ в капле.

Концентрация полимера, %	0	5	10	15	20
Равновесный краевой угол, град.	6	28	30	30	120

Возможны следующие варианты объяснения подобного явления:

- рост содержания ПЭТФ снижает адгезию битума к твердой поверхности или усиливает когезию жидкости;
- оба фактора действуют одновременно.

Отметим, что температура плавления ПЭТФ составляет 260°С, а размягчение битума происходит раньше. При введении ПЭТФ в битум, разогретый до температуры его плавления, в результате перемешивания образуется визуально однородная масса. Это позволяет первоначально предполагать возможность образования истинного раствора ПЭТФ в битуме. Также важно знать, в каком состоянии будет находиться ПЭТФ при охлаждении смеси в области ниже температуры его плавления.

При остывании ПЭТФ может образовать в битуме гомогенную смесь или же дисперсию в матрице. Эксперимент в среде циклогексанона, выступающего хорошим растворителем для указанного полимера, указывает на получение при нагревании гомогенного раствора, превращающегося при последующем охлаждении в дисперсию (см. рисунок 4). Максимальный размер частиц диспергированного ПЭТФ составляет 5-8 мкм.

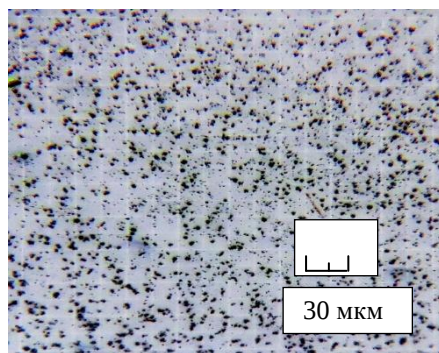


Рисунок 4 – Общий вид дисперсии ПЭТФ в циклогексаноне (30 мкм).

При этом коагуляция мелких частиц с образованием укрупненных агрегатов является фактором, негативно влияющим на однородность продукта. На первый взгляд, использование битума в качестве растворителя затрудняет коагуляцию, так как могут создаваться условия для равномерного распределения мелких частиц ПЭТФ в объеме связующего. Однако эта гипотеза не нашла подтверждения при наблюдении за поведением модифицированного битума в процессе его остывания. Межмолекулярное взаимодействие между частицами ПЭТФ протекает более интенсивно, чем их взаимодействие с битумом при модифицировании, несмотря на непосредственный контакт фаз. При этом становится объяснимым рост равновесного краевого угла смачивания с повышением в битуме добавки ПЭТФ.

Следовательно, подтвердилась гипотеза о том, что введение в связующее ПЭТФ активизирует действие сил когезии. Однако вопрос о конкретизации формы присутствия указанной органической добавки в связующем (дисперсия или раствор) по-прежнему оставался открытым. Для его разрешения проведено исследование образцов битума, ПЭТФ и модифицированного битума (добавка ПЭТФ 10 %) методом дифференциально-сканирующей калориметрии.

Как видно из термограммы (рисунок 2), для образца ПЭТФ (кривая 2) характерны три перехода. Первый переход наблюдается в диапазоне температур, соответствующих началу стеклования (76.5°C). Он осуществляется с затратами энергии, обусловленными увеличением подвижности молекул полимера при его переходе из аморфного состояния в стеклообразное. Второй переход (155°C), отвечающий началу кристаллизации полимера, сопровождается выделением энергии за счет упорядочения расположения молекул в решетке, ограничивающего их подвижность. Третий переход (с поглощением тепловой энергии) начинается при температуре 200°C и завершается в области 260°C . Он отвечает интервалу плавления данного полимера, сопровождаемого снятием ограничений на подвижность молекул. Существенным моментом является почти полная тождественность площадей пиков при кристаллизации материала и его плавлении, что указывает на аморфное состояние модификатора (ПЭТФ) и неупорядоченное расположение макромолекул.

На кривой 1 выделяется переход, определяющий температуру стеклования битума в интервале температур (от -10.9 до 4.6°C). Термограмма образца битума с добавкой ПЭТФ (кривая 3) интересна тем, что на ней имеются переходы, отвечающие температурам стеклования битума и ПЭТФ, а также температурам кристаллизации и плавления модификатора. Последние выражены неявно, что объясняется незначительным (1 мас%) содержанием добавки в системе (композиционном материале). Особенностью этой термограммы является также наличие нового перехода в интервале $20.4-33.4^{\circ}\text{C}$, отвечающем стеклованию.

Анализ рисунка 2 позволяет сделать ряд важных выводов. Во-первых, присутствие на кривой 3 характерных переходов, присущих исходным компонентам, указывает на отсутствие качественного их смешения. Истинный раствор не образуется; модификатор распределяется в битуме в виде дисперсии, как это описывается в трудах известных ученых [15]. Во-вторых, снижение количества энергии для обеспечения заданного режима изменения температуры

свидетельствует о возникновении дополнительных связей, ограничивающих внутреннюю подвижность системы. В-третьих, температура стеклования смеси (20.4-33.4°C) отвечает моменту коагуляции дисперсных частиц ПЭТФ с образованием осадка в битуме [16].

Этот процесс можно представить следующим образом. При диспергировании ПЭТФ в битуме совершается работа, связанная с образованием новых межфазных поверхностей и ростом внутренней энергии системы. С остыванием смеси при коагуляции частиц ПЭТФ выделяется энергия, определяя переход к стеклованию [17]. В дисперсной фазе модификатора (ПЭТФ), распределенной в объеме битума, имеются своеобразные силовые центры. Силовые центры, в свою очередь, создают в системе дополнительное внутреннее давление, препятствующее проникновению жидкости в связующее. В теории поверхностных явлений это называют «структурированием», которое лежит в основе проявления большинства наноэффектов и взаимодействий, описанных авторами в [18].

Проведенные исследования позволили прояснить механизм воздействия ПЭТФ на битум, обеспечивающий повышение водостойкости асфальтобетона. Микрофотографии образцов асфальтовяжущего вещества с включением порошка фосфогипса, полученного на основе битума без добавки ПЭТФ (рисунок 5 а) и в ее присутствии (рисунок 5 б) служат в пользу гипотезы о диспергировании указанного модификатора в системе.

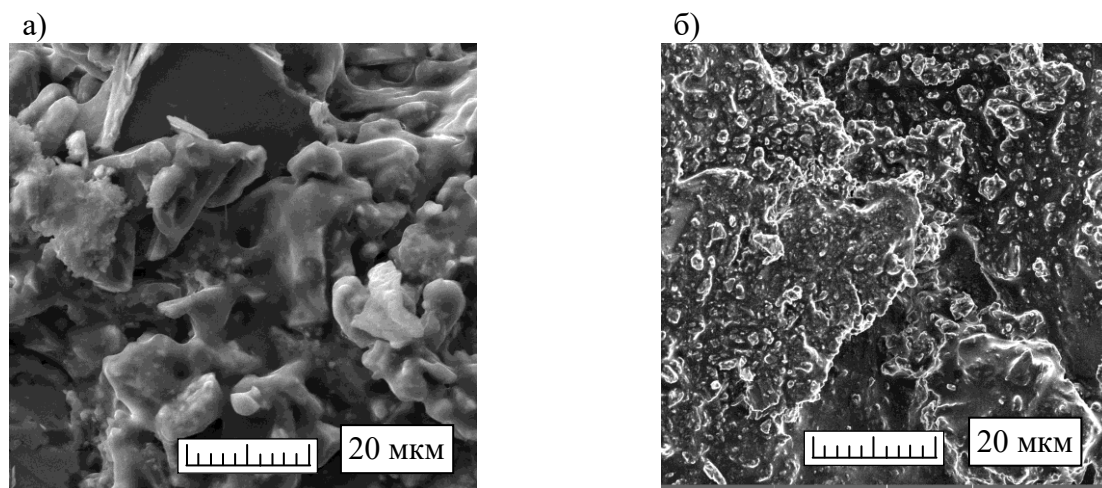


Рисунок 5 – Микрофотографии систем: битум – фосфогипс (30 мас%) (а), напряжение 20000 эВ; битум – добавка ПЭТФ – фосфогипс (32 мас%) (б), напряжение 5000 эВ.

Кристаллы фосфогипса равномерно смочены битумом, и поверхность их гладкая (рисунок 5 а). Введение ПЭТФ в состав строительного материала приводит к появлению большого числа мелких включений модифицирующей добавки на окристаллизованной поверхности (рисунок 5 б). Результаты исследований по модификации битума различными полимерами и техническим углеродом [19, 20] дают схожую картину. Таким образом, указанный модификатор распределяется в объеме асфальтовяжущего в виде дисперсных образований, взаимодействующих друг с другом на расстоянии дополнительно формируемого поля межмолекулярных сил, препятствующего диффузии влаги от поверхности к центру нового строительного материала.

Установлено, что полученный по способу [6] гранулированный строительный материал – асфальтобетонная смесь с введением в нее до 10-20 мас% ПЭТФ может храниться не менее 3 лет в охлажденном состоянии без потери важнейших эксплуатационных свойств (в частности, при водоустойчивости не менее 0.9 и прочности образцов на сжатие 3.2-4.0 МПа). Это значительно расширяет возможности успешной реализации разработанного материала через торговую сеть и особенно ценно с позиций повышения качества восстановленных дорожных покрытий в РФ.

Выводы

1. Предлагается использовать полиэтилентерефталат в качестве модификатора (до 10-20 мас%) строительного дорожного битума и впервые рассмотрены вопросы физико-химической механики гранулированных асфальтобетонных смесей с одновременным присутствием в них указанной органической добавки и фосфогипса.
2. Впервые выявлены причины повышения водоустойчивости гранулированных асфальтобетонных смесей, полученных при введении полиэтилентерефталата в строительный битум.
3. Установлено, что полученный материал – гранулированная асфальтобетонная смесь может храниться не менее 3 лет в охлажденном состоянии без потери водоустойчивости и прочности на сжатие. Результаты исследований имеют высокую практическую значимость для развития технологий современного дорожного строительства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прокофьев В.Ю., Разговоров П.Б., Ильин А.А. Основы физико-химической механики экструдированных катализаторов и сорбентов. М.: КРАСАНД. 2012. 314 с.
2. Тадмор З. и Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. М.: Химия. 1984. 632 с.
3. Ignat'yev A.A., Gotovtsev V.M., Gersimov D.V., Razgovorov P.B. The Modeling of Interfacial Contacts in Composites Using the Sitting Drop - Solid Body System as an Example. New Polymer Composite Materials II Selected peer-reviewed full text papers from XVI International Scientific and Practical Conference "New Polymer Composite Materials". Key Engineering Materials Submitted: 2020-04-12 ISSN: 1662-9795. Vol. 869. Pp. 400-407. Accepted: 2020-05-07 doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.869.400 Online: 2020-10-27 © 2020 Trans Tech Publications Ltd, Switzerland.
4. Ребиндер П.А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Ч. Физико-химическая механика. М.: Наука. 1979. 469 с.
5. Румянцев А.Н., Наненков А.А., Ломов А.А., Готовцев В.М., Сухов В.Д. Структурированный асфальтобетон – новое дорожное покрытие // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. Воронеж: Воронеж. гос. лесотехн. ун-т. 2013. С. 23-25.
6. Патент РФ № 2182136. Способ получения асфальтобетонной смеси. 10.05.2002 г.
7. Патент РФ № 2701007. Способ получения гранулированного асфальтобетона на основе фосфогипса. 24.09.2019 г.
8. Al-Mulla J., Makky S. Preparation of sustainable asphalt pavements using polyethylene terephthalate waste as a modifier // Zast. Mater. 2017. Vol. 58. No. 3. Pp. 394-399.
9. Khan I. M., Kabir S., Alhussain M.A., Almansoor F.F. Asphalt Design Using Recycled Plastic and Crumb-rubber Waste for Sustainable Pavement Construction // Procedia Eng. 2016. Vol. 145. Pp. 1557-1564.
10. Hassani A., Ganjidoust H., Maghanaki A.A. Use of plastic waste (poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement // Waste Manag. Res. 2005. Vol. 23. No. 4. Pp. 322-327.
11. Modarres A., Hamed H. Developing laboratory fatigue and resilient modulus models for modified asphalt mixes with waste plastic bottles (PET) // Constr. Build. Mater. 2014. Vol. 68. Pp. 259-267.
12. Leng Z., Padhan R. K., Sreeram A. Production of a sustainable paving material through chemical recycling of waste PET into crumb rubber modified asphalt // J. Clean. Prod. 2018. Vol. 180. Pp. 682-688.
13. Худякова Т.С., Масюк А.Ф., Калинин В.Н. Особенности структуры и свойств битумов, модифицированных полимерами // Дорожная техника и технологии. 2003. № 4. С. 174-181.
14. Герасимов Д.В., Игнатьев А.А., Готовцев В.М., Голиков И.В. Перспективы использования фосфогипса в производстве асфальтобетона // Дороги и мосты. 2018. № 40. С. 304-315.
15. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. М.: Научный мир, 2007. 576 с.
16. Кочнев А.М. Физикохимия полимеров. Казань: Изд. "ФЭН". 2003. 512 с.
17. Gotovtsev V.M., Ignat'yev A.A. The effect of structuring composite building materials. IOP Conf. Ser.: Mat. Sci. Eng. V. 666 (1). (2019). doi:10.1088/1757-899X/666/1/012079 Retrieved from www.scopus.com. 2019.
18. Разговоров П.Б., Игнатьев А.А., Абрамов М.А., Нагорнов Р.С. Переработка алюмосиликатного сырья и отходов строительства метрополитена в композиционные сорбенты для очистки водных и маслосодержащих сред // Умные композиты в строительстве. 2020. Т. 1. Вып. 1. С. 10-26. http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020.
19. Котенко Н.П., Щерба Ю.С., Евфорицкий А.С.. Влияние полимерных и функциональных добавок на свойства битума и асфальтобетона // Пластические массы. 2019. № 11-12. С.47-49.
20. Беляев К.В., Чулкова И.Л. Модификация битума техническим углеродом. Вестник СибАДИ / Строительство и архитектура. 2019. Т. 16. № 4. С. 472-484.

REFERENCES

1. Prokofiev V.Yu., Razgovorov P.B., Iliyn A.A. Osnovy fiziko-khimicheskoi mekhaniki ekstrudirovannykh katalizatorov i sorbentov. [Basics of physical and chemical mechanics of extruded catalysts and sorbents.] Moscow: KRASAND. (2012). 314 p. (in Russian).
2. Tadmor Z, Gogos C.G. Teoreticheskie osnovy pererabotki polimerov. [Principles of Polymer Processing.] Moscow: Khimiya. (1984). 632 p. (in Russian).
3. Ignat'yev A.A., Gotovtsev V.M., Gersimov D.V. and Razgovorov P.B. The Modeling of Interfacial Contacts in Composites Using the Sitting Drop - Solid Body System as an Example. New Polymer Composite Materials II Selected peer-reviewed full text papers from XVI International Scientific and Practical Conference "New Polymer Composite Materials". Key Engineering Materials Submitted: 2020-04-12 ISSN: 1662-9795. Vol. 869. Pp. 400-407/ Accepted: 2020-05-07 doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.869.400 Online: 2020-10-27 © (2020) Trans Tech Publications Ltd, Switzerland.
4. Rebinder P.A. Izbrannye trudy. Poverkhnostnye yavleniya v dispersnykh sistemakh. Fiziko-khimicheskaya mekhanika. [Selected Works. Surface Phenomena in Disperse Systems. Physical and Chemical Mechanics.] Moscow: Nauka. 1979. 469 p. (in Russian).
5. Rumyantsev A.N., Nanenkov A.A., Lomov A.A., Gotovtsev V.M., Sukhov V.D. Strukturirovannyi asfal'tobeton — novoe dorozhnoe pokrytie [Structured Asphalt Concrete — the New Road Surface]. // Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika. [Recent research trends of the XXI century: Theory and Practice]. Voronezh: Voronezh State University of Forestry and Technologies. 2013. Pp. 23-25. (in Russian).
6. Patent RU2182136C2. Method of asphalt concrete mixture producing. 10.05.2002.
7. Patent RU2701007C1. Method of producing granulated asphalt-binding based on phosphogypsum 24.09.2019.
8. Al-Mulla J., Makky S. Preparation of sustainable asphalt pavements using polyethylene terephthalate waste as a modifier // Zast. Mater. 2017. Vol. 58. No. 3. Pp. 394-399.
9. Khan I. M., Kabir S., Alhussain M.A., Almansoor F.F. Asphalt Design Using Recycled Plastic and Crumb-rubber Waste for Sustainable Pavement Construction // Procedia Eng. 2016. Vol. 145. Pp. 1557-1564.
10. Hassani A., Ganjidoust H., Maghanaki A.A. Use of plastic waste (poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement // Waste Manag. Res. 2005. Vol. 23. No. 4. Pp. 322-327.
11. Modarres A., Hamed H. Developing laboratory fatigue and resilient modulus models for modified asphalt mixes with waste plastic bottles (PET) // Constr. Build. Mater. 2014. Vol. 68. Pp. 259-267.
12. Leng Z., Padhan R. K., Sreeram A. Production of a sustainable paving material through chemical recycling of waste PET into crumb rubber modified asphalt // J. Clean. Prod. 2018. Vol. 180. Pp. 682–688.
13. Khudyakova T.S., Masyuk A.F., Kalinin V.N. Osobennosti struktury i svoystv bitumov, modifitsirovannykh polimerami [Features of the structure and properties of bitumens modified by polymers]. Road Engineering and Technology. 2003. No. 4. Pp. 174-181. (in Russian).
14. Gerasimov D.V., Ignat'yev A.A., Gotovtsev V.M., Golikov I.V. Perspektivy ispol'zovaniya fosfogipsa v proizvodstve asfal'tobetona [Prospects for using phosphogypsum in asphalt concrete production]. Dorogi i mosty [Roads and Bridges]. 2018. No. 40. Pp. 304-315.
15. Tager A.A. Fiziko-khimiya polimerov [Physics and chemistry of polymers]. Moscow: Nauchny mir, 2007. 576 p. (in Russian).
16. Kochnev A.M. Fizikokhimiya polimerov [Physics and chemistry of polymers]. Kazan: "FEN" Publ. House. 2003. 512 p. (in Russian)
17. Gotovtsev V.M., Ignat'yev A.A. The effect of structuring composite building materials. IOP Conf. Ser.: Mat. Sci. Eng. V. 666 (1). (2019). doi:10.1088/1757-899X/666/1/012079 Retrieved from www.scopus.com. 2019.
18. Razgovorov P.B., Ignatyev A.A., Abramov M.A., Nagornov R.S. Processing of raw aluminosilicates and subway construction dumps into composite sorbents for purification of water and oil-containing media. Smart Composite in Construction, 2020. Vol. 1. No. 1. Pp. 10-26. http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020 (in Russian).
19. Kotenko N.P., Shcherba Y.S., Evforitsky A.S. Vliyanie polimernykh i funktsional'nykh dobavok na svoystva bituma i asfal'tobetona [Influence of polymeric and functional additives on the properties of bitumen and asphalt concrete]. Plastic masses, 2019. No. 11-12. Pp. 47-49. (in Russian).
20. Belyaev K.V., Chulkova I.L. Modifikatsiya bituma tekhnicheskimi uglerodami [Modification of bitumen with technical carbon]. Vestnik SibADI // Construction and Architecture. 2019. Vol. 16. No. 4. Pp. 472-484. (in Russian).

Информация об авторах:

Игнатьев Алексей Александрович

ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Россия,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры гидротехнического и дорожного строительства.
Управление развития отраслевого образования, ФАУ «РОСДОРНИИ», г. Москва, Россия,
начальник управления развития отраслевого образования.
E-mail: ignatyevaa@ystu.ru

Разговоров Павел Борисович

ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Россия,
зам. ректора по научной работе ЯГТУ, начальник Управления организации научно-исследовательской и
интеллектуальной деятельности, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологий
строительного производства.
E-mail: razgovorovpb@ystu.ru

Готовцев Валерий Михайлович

ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Россия,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры управления предприятием.
E-mail: gotovtsev_vm@ystu.ru

Information about authors:

Ignatyev Alexey Al.

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia,
candidate of technical sciences, associate professor, associate professor department of Hydrotechnical and Road
Construction.
Department of Industry Education Development, FAI «ROSDORNII», Moscow, Russian,
head of the department of Industry Education Development.
E-mail: ignatyevaa@ystu.ru

Razgovorov Pavel B.

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia,
head of the department of Organization of Research and Intellectual Activity, doctor of technical sciences, professor
department of Construction Production Technologies.
E-mail: razgovorovpb@ystu.ru

Gotovtsev Valery M.

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia,
doctor of technical sciences, professor Enterprise Management Department.
E-mail: gotovtsev_vm@ystu.ru

Уважаемые авторы!
Просим Вас ознакомиться с основными требованиями
к оформлению научных статей

- Представляемый материал должен быть **оригинальным, не опубликованным ранее** в других печатных изданиях.
- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется числом знаков с учетом пробелов. Рекомендуемый объем статей: **от 15000 до 45000 знаков с пробелами**.
- Статья должна быть набрана на листах формата А4 шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и сверху – 2 см; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья предоставляется в электронном виде по электронной почте или через систему электронной редакции.
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна статья одного автора**, включая соавторство.
- Если статья возвращается автору на доработку, исправленный вариант следует прислать в редакцию повторно, приложив письмо с ответами на замечания рецензента. Доработанный вариант статьи рецензируется и рассматривается редакционной коллегией вновь. Датой представления материала считается дата поступления в редакцию окончательного варианта исправленной статьи.
- Аннотации всех публикуемых материалов, ключевые слова, информация об авторах, списки литературы будут находиться в свободном доступе на сайте соответствующего журнала и на сайте Российской научной электронной библиотеки – РУНЭБ (Российский индекс научного цитирования).

В тексте статьи не рекомендуется применять:

- обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
- для одного и того же понятия различные научные термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
- произвольные словообразования;
- сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.

Обязательные элементы:

- **заглавие (на русском и английском языке)** публикуемого материала должно быть точным и емким, слова, входящие в заглавие, должны быть ясными сами по себе, а не только в контексте; следует избегать сложных синтаксических конструкций, новых словообразований и терминов, а также слов узкопрофессионального и местного значения;
- **аннотация (на русском и английском языке)** кратко описывает объект исследования, мотивацию к проведению исследования, результаты исследования (рекомендуется указывать конкретные результаты и зависимости, полученные в исследовании), выводы (кратко); рекомендуемый объем – от 200 до 250 слов;
- **ключевые слова (на русском и английском языке)** – это текстовые метки, по которым можно найти статью при поиске и определить предметную область текста; обычно их выбирают из текста публикуемого материала, достаточно 5-10 ключевых слов.
- **список литературы**, на которую автор ссылается в тексте статьи; рекомендуемый объем списка литературы – не менее 20 источников.

В информации об авторах рекомендуется указывать ORCID, Scopus ID и SPIN-код, присвоенный в РИНЦ.

Редакция не взимает плату с авторов за подготовку, рецензирование и размещение в открытом доступе статей.

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

С полной версией требований к оформлению научных статей
Вы можете ознакомиться на сайте <https://construction.elpub.ru/jour/index>
