

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ



УДК 691.16.001

С.Ю. ШЕХОВЦОВА, Е.В. КОРОЛЕВ

АГРЕГАТИВНАЯ И СЕДИМЕНТАЦИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ НАНОСУСПЕНЗИИ НА ОСНОВЕ ИНДУСТРИАЛЬНОГО МАСЛА В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИМЕРНО-БИТУМНЫХ ВЯЖУЩИХ

Введение углеродных первичных наноматериалов в полимерно-битумные вяжущие значительно улучшает показатели их свойств, однако до настоящего времени не предложен эффективный метод распределения их в объеме битумного вяжущего. В данной работе предлагается вводить углеродные наноматериалы в неполярные среды-носители, которые являются средством для модифицирования битумно-полимерного вяжущего. Для обеспечения равномерного распределения в битумном вяжущем необходимо сформировать агрегативно- и седиментационно-устойчивую дисперсную систему наноразмерных первичных материалов. Для исследования однородности распределения и эффективности диспергирования углеродных наноматериалов в неполярной среде-носителе при приготовлении углеродных наносuspензий предложен экспресс-метод, основанный на определении оптической плотности и коэффициента преломления. Расчетным методом доказана достоверность полученных данных.

Ключевые слова: наносuspензия, углеродный наноматериал, агрегация, седиментация, диффузия, стабильность, промышленное масло, полимерно-битумное вяжущее.

DOI 10.32683/0536-1052-2020-742-10-5-16

Введение. Передовой опыт отечественных и зарубежных ученых показывает, что введение углеродных наноматериалов (УНМ) положительно влияет на физико-механические свойства полимерно-битумного вяжущего [1–3]. Однако до настоящего времени не предложен эффективный метод распределения УНМ в объеме битума.

Согласно современным представлениям, введение пластификатора в битум увеличивает растворяющую способность дисперсионной среды, что ингибирует уменьшение толщины сольватной оболочки в асфальтовых комплексах и увеличивает технологичность производства продукта и его свойства, что не всегда наблюдается при введении полимера в битум и отсутствии пластификатора. В настоящее время накоплен большой опыт теоре-

© Шеховцова С.Ю., Королев Е.В., 2020

тических и экспериментальных исследований основных закономерностей устойчивости и структурообразования дисперсных систем с водной (полярной) дисперсионной средой, который представлен фундаментальными работами отечественных исследователей Б.В. Дерягина, П.А. Ребиндера, И.Ф. Ефремова, В.Д. Щукина, В.М. Муллера, Н.Б. Урьева, Ю.Г. Фролова, А.А. Абрамзона и др. [4–7].

В значительно меньшей степени изучены системы с неполярной дисперсионной средой, хотя для таких систем характерна низкая агрегативная, и как следствие, седиментационная устойчивость. Поэтому для обеспечения устойчивости дисперсных наносистем с неполярной средой необходима разработка технологии достижения их стабильности. Решение данной проблемы является целью настоящей работы.

Материалы и методы. В качестве носителя углеродных нанообъектов использовалась пластифицирующая среда – индустриальное масло марки И-40. Это светлая, маловязкая жидкость, представляющая собой сложную смесь углеводородов парафинового, нафтенового и ароматических рядов, является неполярной средой производства ООО «Лукойл Волгограднефтепереработка». Индустриальное масло отвечает требованиям ГОСТ 20799–88.

В качестве углеродного первичного наномодификатора использовался различный углеродный наноматериал (УНМ): одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ), синтезированные в РАН г. Черноголовка; многостенные углеродные нанотрубки «Таунит» (МУНТ) – одномерные наномасштабные нитевидные образования поликристаллического графита производства ООО «НаноТехЦентр», г. Тамбов.

Приготовление наносuspензий в лабораторных условиях осуществлялось с помощью ультразвукового диспергатора УЗ-ИЛ100-6/4, с частотой ультразвуковых волн 22 кГц и мощностью 750 Вт.

Однородность наносuspензии на основе пластифицирующей среды с углеродными наноматериалами определялась по показателям оптической плотности и коэффициента преломления с помощью фотометра КФК-3 и рефрактометра ИРФ-22 соответственно. Оптическая плотность регистрировалась при длине волны 400 нм. Отбор проб производился из разных слоев (верхний, средний, нижний), в каждом слое отбиралось не менее трех проб с помощью калиброванной делительной воронки. Стоит отметить, что в пробах, отобранных из одного слоя, разницы в показателях оптической плотности и коэффициента преломления зафиксировано не было. Для оценки влияния ультразвукового воздействия на пластифицирующую среду она была подвергнута «холостой» (без наномодификатора) обработке. Изменений в оптической плотности и коэффициенте преломления до и после воздействия зафиксировано не было.

Дисперсный состав и удельная поверхность углеродных наноматериалов определялись методом лазерной дифракции в исследуемом диапазоне размера частиц от 0,0008 до 6,5 мкм на приборе фирмы «Microtrac Inc.», в котором в качестве источника когерентного монохроматического излучения используется лазерный диод с длиной волны 780 нм. Смачиваемость (краевой угол смачивания) пластифицирующей средой углеродных нанотрубок уста-

навливалась на процессорном тензиометре фирмы KRUSS с применением метода Вашбурна.

На основе анализа научно-технической литературы [8–10], а также опыта применения и рекомендаций производителя был принят диапазон варьирования углеродных наноматериалов в интервале 0,00005–0,01 % от массы битума.

Результаты и обсуждение. Для обеспечения агрегативной и седиментационной устойчивости суспензии на первом этапе необходимо достичь однородности распределения углеродного наноматериала в пластифицирующей среде. Установление рациональных параметров приготовления однородных углеродных наносuspензий выполнялось с использованием комплексного экспресс-подхода, основанного на определении оптической плотности и коэффициента преломления (табл. 1), с учетом варьирования концентраций УНМ и временем ультразвукового диспергирования (УЗД).

В ходе эксперимента было установлено, что концентрация УНМ в используемом диапазоне не оказывает влияния на технологические параметры, обеспечивающие достижение однородности наномодифицированных пластифицированных сред. Во всем диапазоне концентраций наблюдается аналогичная динамика изменения показателей оптической плотности и коэффициента преломления. Анализ полученных результатов показал, что стабильность в показаниях оптической плотности и коэффициента преломления по объему пробы достигается при времени диспергирования ОУНТ – 2 мин, МУНТ – 3 мин. Также было установлено, что это время соответствует максимальным значениям по исследуемым показателям (см. табл. 1). Дальнейшее увеличение обработки приводит к снижению оптической плотности, что очевидно связано с агрегированием нанообъектов и их сегрегацией и седиментацией.

Учитывая полученные результаты, можно предположить, что данное время УЗД будет оптимальным как для однородного распределения, так и эффективного диспергирования углеродных первичных наноматериалов в объеме пластифицирующей среды. Что было подтверждено при анализе данных по гранулометрическому составу УНМ в пластифицирующей среде с помощью анализатора размера частиц Zetatrac методом лазерной дифрактометрии.

Для оценки степени диспергирования УНМ проба подбиралась экспериментальным путем, с учетом чувствительности прибора, для обеспечения необходимой воспроизводимости не менее 95 %. Результаты зависимости удельной поверхности и среднего приведенного диаметра от времени ультразвукового диспергирования УНМ представлены на рис. 1.

На основе обработки и анализа полученных данных было установлено, что для ОУНТ время эффективного диспергирования составляет 2 мин, для МУНТ – 3 мин. В указанных временных интервалах наблюдается максимальная удельная поверхность 80 000 м²/кг (ОУНТ) и 75 860 м²/кг (МУНТ), и минимальный средний диаметр – 41 и 62 нм соответственно, что коррелирует с результатами по оптической плотности и коэффициенту преломления. Полученные результаты характеризуют данные системы как коллоидные.

Таблица 1. Влияние времени ультразвуковой обработки (УЗО) в пластифицирующей среде на оптическую плотность и коэффициент преломления УНМ

Концентрация, % по массе	Показатель	Время УЗО, мин									
		1	2	3	4	5					
ОУНТ											
0,005	Оптическая плотность	1,907 1,920 1,923	0,00644*	1,931 1,925 1,934	0,00333*	1,949 1,949 1,949	0,0000*	1,937 1,923 1,942	0,007333*	1,907 1,918 1,909	0,00444*
	Коэффициент преломления	1,4827 1,4831 1,4824	0,00024*	1,4857 1,4845 1,4856	0,00051*	1,4895 1,4895 1,4995	0,0000*	1,4854 1,4857 1,4860	0,0002*	1,4818 1,4807 1,4829	0,00073*
0,0005	Оптическая плотность	1,413 1,409 1,416	0,00244*	1,434 1,441 1,446	0,00422*	1,485 1,485 1,485	0,0000*	1,463 1,447 1,459	0,006222*	1,423 1,417 1,429	0,00400*
	Коэффициент преломления	1,4814 1,4829 1,4830	0,00069*	1,4837 1,4841 1,4838	0,00016*	1,4881 1,4881 1,4881	0,0000*	1,4853 1,4857 1,4859	0,000222*	1,4813 1,4819 1,4821	0,00031*
	Оптическая плотность	0,631 0,637 0,642	0,00378*	0,638 0,639 0,641	0,00111*	0,644 0,644 0,644	0,0000*	0,641 0,636 0,639	0,001778*	0,631 0,636 0,628	0,00289*
0,00005	Коэффициент преломления	1,4817 1,4824 1,4825	0,00033*	1,4831 1,4834 1,4852	0,00087*	1,4855 1,4855 1,4855	0,0000*	1,4821 1,4817 1,4819	0,000133*	1,4803 1,4813 1,4816	0,00051*

МУНТ												
0,005	Оптическая плотность	1,927	0,00467*	1,967	0,00000*	1,952	0,00444*	1,947	0,00956*	1,916	0,00578*	
		1,939		1,967		1,943		1,923		1,918		
		1,936		1,967		1,954		1,942		1,904		
0,0005	Коэффициент преломления	1,4837	0,00020*	1,4899	0,00000*	1,4887	0,00442*	1,4838	0,00031*	1,4818	0,00033*	
		1,4841		1,4899		1,4884		1,4847		1,4811		
		1,4836		1,4899		1,4985		1,4843		1,4819		
0,0005	Оптическая плотность	1,453	0,01089*	1,503	0,00000*	1,485	0,00489*	1,463	0,00956*	1,430	0,00489*	
		1,479		1,503		1,472		1,447		1,417		
		1,456		1,503		1,481		1,474		1,426		
0,00005	Коэффициент преломления	1,4833	0,00040*	1,4885	0,00000*	1,4881	0,00011*	1,4861	0,00038*	1,4823	0,00027*	
		1,4826		1,4885		1,4878		1,4853		1,4827		
		1,4837		1,4885		1,4879		1,4862		1,4831		
0,00005	Оптическая плотность	0,645	0,00200*	0,653	0,00000*	0,643	0,00267*	0,637	0,00200*	0,631	0,00533*	
		0,651		0,653		0,639		0,641		0,644		
		0,648		0,653		0,647		0,636		0,633		
0,00005	Коэффициент преломления	1,4819	0,00020*	1,4858	0,00000*	1,4845	0,00022*	1,4832	0,00020*	1,4813	0,00013*	
		1,4822		1,4858		1,4843		1,4827		1,4813		
		1,4825		1,4858		1,4849		1,4828		1,4816		

* Среднеквадратическое отклонение.

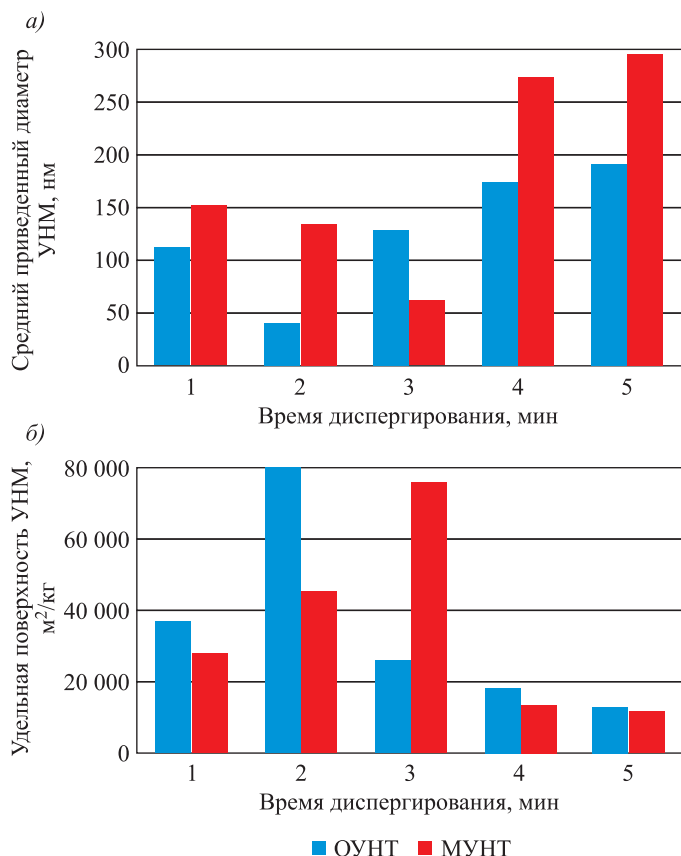


Рис. 1. Динамика изменения среднего приведенного диаметра УНМ (а) и площади удельной поверхности УНМ (б) от времени диспергирования в пластифицирующей среде

Для подтверждения экспериментально установленных зависимостей достижения однородных углеродных наносuspензий и определения равномерности распределения УНМ в объеме пластифицирующей среды (табл. 2) использовался показатель гипсометрического распределения Лапласа, который вычисляли по формуле [10]

$$\frac{n_1}{n_2} = \exp\left(g \frac{(\rho_f - \rho_c)}{kT} \cdot \frac{\pi}{6} d^3 \Delta h\right), \quad (1)$$

где n_1 и n_2 – количество частиц на высоте столба образца наносuspензии, соответственно h_1 и h_2 , $\Delta h = h_2 - h_1$;

ρ_f – плотность материала частицы (УНМ), кг/м³;

Таблица 2. Равномерность распределения УНМ в объеме пластифицирующей среды

Вид УНМ	Соотношение n_1/n_2 при УЗД, мин				
	1	2	3	4	5
ОУНТ	12,30	1,08	29,27	109,12	213,12
МУНТ	213,12	39,60	1,30	87,15	260,91

ρ_c – плотность среды носителя (пластифицирующей среды), кг/м³;
 d – диаметр частицы, нм;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 T – температура, °С;
 k – постоянная Больцмана ($1,386 \cdot 10^{-23}$ Дж · К⁻¹).

Из формулы логично следует, что равномерное распределение УНМ в объеме пластифицирующей среды достигается в случае, когда $n_1/n_2 \approx 1$.

Анализ результатов расчета n_1/n_2 для образцов суспензий с различным временем ультразвукового диспергирования показал, что равномерность распределения ОУНТ достигается при 2 мин, МУНТ – при 3 мин, что согласуется с результатами, полученными экспериментальным путем.

Согласно молекулярно-статической теории броуновского движения (А. Эйнштейн, М. Смолуховский) [10], молекулы дисперсионной среды размером менее 1 мкм находятся в непрерывном тепловом хаотическом движении. Для частиц крупнее 1–3 мкм броуновское движение прекращается, что инициирует процессы седиментации – свободное оседание частиц в вязкой среде под действием гравитационного поля. Стабильность получаемых коллоидных растворов характеризуется способностью сохранять постоянными как однородность, так и равномерность распределения в течение времени. Таким образом, седиментационная устойчивость – способность системы сохранять неизменным во времени распределение частиц по своему объему. Ее достижение возможно в том случае, когда диффузия (броуновское движение) будет преобладать над седиментацией.

Количество вещества, диффундирующего через единицу площади, определяется коэффициентом диффузии, из уравнения Эйнштейна [10]

$$D = \frac{kT}{3\pi\eta d}, \quad (2)$$

где d – диаметр частицы, нм;
 T – температура, К;
 k – постоянная Больцмана ($1,386 \cdot 10^{-23}$ Дж · К⁻¹);
 η – вязкость пластифицирующей среды, Па · с.

Расстояние, которое проходит частица за время $t = 3600$ с

$$\Delta x^2 = 2Dt, \quad (3)$$

где Δx – среднее расстояние смещения частицы.

Результаты расчета коэффициента диффузии и среднего расстояния смещения частицы в пластифицирующей среде при различном времени ультразвукового диспергирования представлены в табл. 3.

Полученные данные свидетельствуют о большой активности нанодисперсной фазы (ОУНТ и МУНТ) и их перемещении на расстояния, значительно превышающие их размеры, что положительно отразится на седиментационной устойчивости наносuspензий, в которых процесс осаждения компенсируется встречной диффузией частиц.

Для подтверждения полученных результатов оценивалась стабильность наносuspензии по динамике изменения скорости седиментации

Таблица 3. Коэффициент диффузии и среднее расстояние смещения нанодисперсной фазы в пластифицирующей среде

Вид УНМ	Продолжительность УЗД, мин				
	1	2	3	4	5
ОУНТ	$\frac{7,93 \cdot 10^{-14}}{2,39 \cdot 10^{-5}}$	$\frac{5,42 \cdot 10^{-13}}{6,25 \cdot 10^{-5}}$	$\frac{2,95 \cdot 10^{-13}}{4,61 \cdot 10^{-5}}$	$\frac{3,98 \cdot 10^{-13}}{5,35 \cdot 10^{-5}}$	$\frac{4,70 \cdot 10^{-13}}{5,82 \cdot 10^{-5}}$
МУНТ	$\frac{6,16 \cdot 10^{-14}}{2,11 \cdot 10^{-5}}$	$\frac{1,56 \cdot 10^{-13}}{3,36 \cdot 10^{-5}}$	$\frac{6,53 \cdot 10^{-13}}{6,86 \cdot 10^{-5}}$	$\frac{4,05 \cdot 10^{-13}}{5,40 \cdot 10^{-5}}$	$\frac{4,64 \cdot 10^{-13}}{5,78 \cdot 10^{-5}}$

Примечание. В числителе приведены значения коэффициента диффузии, част./см, в знаменателе – среднее смещение частицы, м; температурная зависимость вязкости среды $\eta = 0,374 \cdot e^{-0,043T}$.

($U_{\text{сед}}$), по формуле (4) и удельного седиментационного потока ($i_{\text{сед}}$) по формуле (5)

$$U_{\text{сед}} = \frac{2gr^2(\rho - \rho_0)}{9\eta}, \quad (4)$$

где r – радиус сферической частицы, нм;

ρ – плотность материала частицы (УНМ), кг/м³;

ρ_0 – плотность среды носителя, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

η – вязкость пластифицирующей среды, Па · с.

$$i_{\text{сед}} = U_{\text{сед}} \nu, \quad (5)$$

где ν – концентрация частиц в дисперсной системе.

Результаты расчета удельного потока седиментации и скорости седиментации приведены в табл. 4.

Анализ полученных данных (см. табл. 3, 4) показал, что при 2 мин диспергирования для ОУНТ и 3 мин для МУНТ диффузионный поток превышает седиментацию, что свидетельствует о седиментационной устойчивости. Так, в системе с ОУНТ при 2 мин диспергирования диффузионный поток равен $5,42 \cdot 10^{-13}$, тогда как седиментационный поток $1,01 \cdot 10^{-13}$. В системе с МУНТ эти показатели составили $6,53 \cdot 10^{-13}$ и $5,33 \cdot 10^{-13}$ соответственно. Для таких систем характерна диффузия, возникающая вследствие теплового движения молекул пластифицирующей среды, обеспечи-

Таблица 4. Удельный поток седиментации и скорость седиментации

Вид УНМ	Продолжительность УЗД, мин				
	1	2	3	4	5
ОУНТ	$\frac{9,24 \cdot 10^{-13}}{0,006}$	$\frac{1,01 \cdot 10^{-13}}{0,001}$	$\frac{3,76 \cdot 10^{-12}}{0,027}$	$\frac{9,40 \cdot 10^{-12}}{0,049}$	$\frac{1,43 \cdot 10^{-11}}{0,065}$
МУНТ	$\frac{1,53 \cdot 10^{-12}}{0,010}$	$\frac{1,81 \cdot 10^{-12}}{0,016}$	$\frac{5,33 \cdot 10^{-13}}{0,005}$	$\frac{1,36 \cdot 10^{-12}}{0,047}$	$\frac{1,36 \cdot 10^{-12}}{0,047}$

Примечание. В числителе указаны значения удельного потока седиментации, част./см; в знаменателе – скорость седиментации см/год.

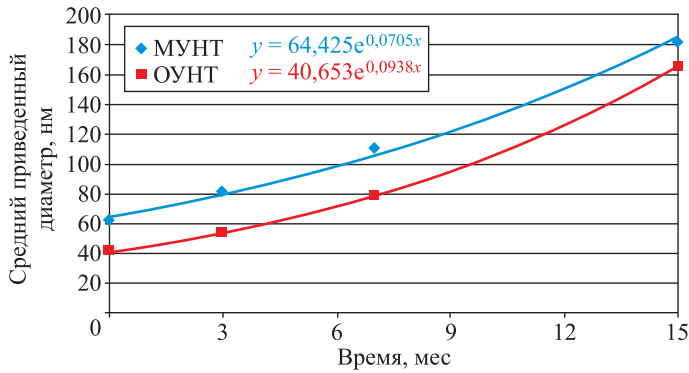


Рис. 2. Кинетика изменения среднего диаметра частиц УНМ

вающая равномерное распределение нанодисперсной фазы по ее объему и компенсирующая обратный процесс осаждения частиц.

Для определения стойкости дисперсионной системы к изменениям во времени на основе результатов измерения средних диаметров частиц сразу после УЗД и через промежутки времени равные 3, 7 и 15 мес (рис. 2) была исследована кинетика изменения равномерности распределения УНМ в объеме системы.

По формуле (1) рассчитывалась равномерность распределения в кинетике, результаты представлены на рис. 3.

Анализ рис. 3 показал, что дисперсионная система с МУНТ будет характеризоваться стабильностью равномерного распределения нанофазы в объеме не менее 2 мес, далее наблюдается начало процесса агрегирования (увеличение величины n_1/n_2), через 6 мес происходит значительное ухудшение стабильности, которое приводит к седиментации. При изучении наносuspензии с ОУНТ установлено, что стабильность равномерного распределения нанофазы в объеме будет наблюдаться не менее 7 мес. На протяжении полученных временных интервалов нанодисперсные системы будут находиться в стабильном состоянии и характеризоваться постоянством показателей свойств.

Агрегативная устойчивость дисперсных систем, т.е. их способность сохранять во времени степень дисперсности, является важным показателем,

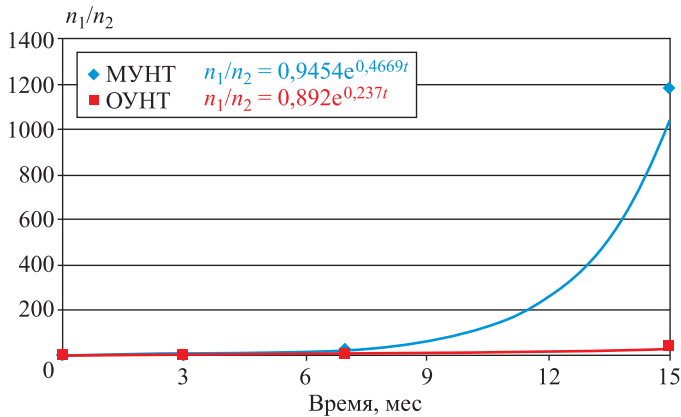


Рис. 3. Кинетика изменения равномерности распределения УНМ в объеме пластифицирующей среды

необходимым для обеспечения стабильности системы и воспроизводимости показателей свойств при использовании наносuspензий в технологии приготовления полимерно-битумного вяжущего (ПБВ).

Согласно теории М. Смолуховского [11], величиной, позволяющей определить скорость агрегирования частиц, является время половинной коагуляции, за которое концентрация частиц в системе уменьшится в 2 раза

$$\theta = \frac{t}{n_0/n - 1}, \quad (6)$$

где t – время, мес;

n_0/n – относительное изменение концентрации частиц в системе.

С учетом кинетики изменения среднего диаметра частиц УНМ (см. рис. 2) рассчитывалось время половинной коагуляции, которое составило для суспензий с ОУНТ – 22,2 мес, с МУНТ – 29,5 мес, что свидетельствует о высокой агрегативной устойчивости систем. Полученное время значительно превышает необходимые сроки хранения суспензий при производстве ПБВ.

Коллоидные системы с ОУНТ и МУНТ могут быть относительно термодинамически устойчивы в том случае, если они представляют собой лиофильные дисперсные системы. Для установления межмолекулярного взаимодействия в бинарной системе «пластифицирующая среда – УНМ» был определен краевой угол смачивания на процессорном тензиометре. Ввиду того, что процесс диспергирования сопровождается увеличением температуры среды, дальнейшие исследования целесообразно было проводить при температурах, соответствующих времени их эффективного диспергирования, для ОУНТ – 65 °С, для МУНТ – 78 °С. В ходе испытания установлено, что угол смачивания для ОУНТ составил 28,98°, для МУНТ – 25,36°, что характеризует эти дисперсные системы как олеофильные.

Согласно [10], такие системы характеризуются образованием на границе раздела фаз сольватного слоя дисперсионной среды (среды-носителя), что может инициировать самопроизвольное диспергирование, интенсифицируемое броуновским движением, что подтверждает результаты, полученные ранее, а также способствует увеличению агрегативной стабильности системы и сокращению энергетических затрат.

Выводы. 1. Для исследования однородности распределения и эффективности диспергирования нанообъектов в среде-носителе при приготовлении углеродных наносuspензий предложен экспресс-метод, базирующийся на комплексном подходе, основанном на определении оптической плотности и коэффициента преломления. Расчетным методом доказана достоверность полученных данных.

2. Установлено оптимальное время ультразвукового диспергирования углеродных наноматериалов в индустриальном масле: ОУНТ – 2 мин; МУНТ – 3 мин, при котором достигается минимальный диаметр УНМ, равный 41 и 62 нм соответственно. Это время соответствует условиям, когда диффузионный поток превышает седиментацию, что свидетельствует о седиментационной устойчивости наносuspензий. В системе с ОУНТ при 2 мин УЗД диффузионный поток равен $5,42 \cdot 10^{-13}$, тогда как поток седиментации $1,01 \cdot 10^{-13}$, в системе с МУНТ эти показатели составляют $6,53 \cdot 10^{-13}$

и $5,33 \cdot 10^{-13}$ соответственно, что характеризует данные системы как стабильные, способные сохранять постоянными как однородность, так и равномерность распределения УНМ в объеме среды-носителя, осуществляемое посредством диффузии, за счет компенсации осаждения частиц нанодисперсной фазы.

3. Доказано, что полученная дисперсионная система с МУНТ будет стабильной, с равномерно распределенной в объеме нанофазой, не менее 2 мес, далее наблюдается начало процесса агрегирования, через 6 мес произойдет ухудшение стабильности, которое будет способствовать закономерной седиментации. В дисперсионной системе с ОУНТ стабильность равномерного распределения нанофазы в объеме будет наблюдаться не менее 7 мес. На протяжении полученных временных интервалов нанодисперсные системы будут находиться в стабильном состоянии и характеризоваться постоянством показателей свойств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhang P., Zhou T., He L., Zhang S., Sun J., Wang J., Qin C., Da L. Dispersion of multi-walled carbon nanotubes modified by rosemary acid into poly (vinyl alcohol) and preparation of their composite fibers // RSC Advances. 2015. Vol. 5, No. 68. P. 55492–55498.
2. Vysotskaya M.A., Shekhovtsova S.Yu., Barkovskiy D.V. Nanosized carbon modifier used to control plastic deformations of asphalt concrete // IOP Conference Series-Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 32, No. 032060.
3. Vysotskaya M.A., Shekhovtsova S.Yu. Nanotubes as a modifier polymer modified binder and asphalt concrete // Aer-advances in engineering research. 2016. Vol. 19. P. 177–179.
4. Дерягин Б.В., Абрикосова И.И., Лифшиц Е.М. Молекулярное притяжение конденсированных тел // Успехи физических наук. 2015. Вып. 8. С. 947–979.
5. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах // Физико-химическая механика. М.: Наука, 1979. 384 с.
6. Щукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. Учеб. для ун-тов и хим.-технол. вузов. 5-е изд., испр. М.: Высш. шк., 2007. 444 с.
7. Абрамзон А.А. Поверхностно-активные вещества. Свойства и применение. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Химия, 1981. 304 с.
8. Saltan M., Terzi S., Karahancer S. Performance analysis of nano modified bitumen and hot mix asphalt // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 173. P. 228–237.
9. Yang Q., Li X., Zhang L., Qian Y., Qi Y., Sadegh H., Wan D., Zhong J. Performance evaluation of bitumen with a homogeneous dispersion of carbon nanotubes // Carbon. 2020. Vol. 158. P. 465–471.
10. Гельфман М.И., Ковалевич О.В., Юстратов В.П. Коллоидная химия. СПб.: Лан, 2010. 336 с.

Шеховцова Светлана Юрьевна, канд. техн. наук, доц.;

E-mail: SHehovtsovaSYU@mgsu.ru

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Королев Евгений Валерьевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: korolev@nocnt.ru

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 01.09.2020

Shekhovtsova Svetlana Yuryevna, PhD, Ass. Professor;

E-mail: SHehovtsovaSYU@mgsu.ru

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia

Korolev Evgeniy Valer'evich, DSc, Professor; E-mail: korolev@nocnt.ru

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

AGGREGATION AND SEDIMENTATION STABILITY OF NANOSUSPENSIONS BASED ON INDUSTRIAL OIL IN THE TECHNOLOGY OF POLYMER MODIFIED BINDERS

The introduction of carbon primary nanomaterials into polymer modified binders significantly improves their properties but so far, no effect method for distributing them in the volume of bitumen binders has been proposed. In this research it is proposed to introduce carbon nanomaterials into nonpolar media carrier and to ensure uniform distribution in the bituminous binder, it is necessary to form an aggregate and sedimentation-stable dispersed nano system. To ensure the stability of dispersed nano systems with a nonpolar medium, it is necessary to solve the problem of developing a technology to achieve their stability. To study the uniformity of distribution and efficiency of dispersion of carbon nanomaterials in a nonpolar medium carrier in the preparation of carbon nanosuspensions an express method based on determining the optical density and refractive index is proposed.

Key words: nanosuspension, carbon nanomaterial, aggregation, sedimentation, diffusion, stability, industrial oil, polymer modified bonders.

REFERENCES

1. Zhang P., Zhou T., He L. Zhang S., Sun J., Wang J., Qin C., Da L. Dispersion of multi-walled carbon nanotubes modified by rosemary acid into poly (vinyl alcohol) and preparation of their composite fibers. *RSC Advances*, 2015. Vol. 5, No. 68. Pp. 55492–55498.
2. Vysotskaya M.A., Shekhovtsova S.Yu., Barkovskiy D.V. Nanosized carbon modifier used to control plastic deformations of asphalt concrete. *IOP Conference Series- Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 32, No. 032060.
3. Vysotskaya M.A., Shekhovtsova S.Yu. Nanotubes as a modifier polymer modified binder and asphalt concrete. *Aer-advances in engineering research*. 2016. Vol. 19. Pp. 177–179.
4. Deryagin B.V., Abrikosova I.I., Lifshits E.M. Molekulyarnoe prityazhenie kondensirovannykh tel [Molecular attraction of condensed bodies]. *Uspekhi fizicheskikh nauk [Advances in physical Sciences]*. 2015. Vol. 8. Pp. 947–979. (in Russian)
5. Rebinder P.A. Poverkhnostnye yavleniya v dispersnykh sistemakh [Surface phenomena in dispersed systems]. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika [Physical and chemical mechanics]*. Moscow, Nauka, 1979. 384 p. (in Russian)
6. Shchukin E.D., Pertsov A.V., Amelina E.A. Kolloidnaya khimiya: Uchebnik dlya universitetov i khimiko-tekhnologicheskikh vuzov [Colloidal chemistry. Textbook for universities and chemical-technological universities]. Moscow, 2007. 444 p. (in Russian)
7. Abramzon A.A. Poverkhnostno-aktivnye veshchestva. Svoystva i primeneniye [Surfactants. Properties and applications]. Leningrad, 1981. 304 p. (in Russian)
8. Saltan M., Terzi S., Karahancer S. Performance analysis of nano modified bitumen and hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 173. Pp. 228–237.
9. Yang Q., Li X., Zhang L., Qian Y., Qi Y., Sadegh H., Wan D., Zhong J. Performance evaluation of bitumen with a homogeneous dispersion of carbon nanotubes. *Carbon*. 2020. Vol. 158. Pp. 465–471.
10. Gelfman M.I., Kovalevich O.V., Yustratov V.P. Kolloidnaya khimiya [Colloidal chemistry]. St. Petersburg, 2010. 336 p. (in Russian)