

По дополнительному эффекту действия добавки являются ускорителями твердения и не снижающими морозостойкости и водонепроницаемости бетона.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добавки для бетонов. Общие технические условия: СТБ 1112–98.
2. Добавки для бетонов. Методы определения эффективности: ГОСТ 30459–96.
3. Бетоны. Ускоренные методы определения морозостойкости: ГОСТ 10060.2–95.
4. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости: ГОСТ 12730.5–84.

УДК 621.762; 691.002(032)

ВЛИЯНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЯЖЕЛОГО КОНСТРУКЦИОННОГО БЕТОНА

РЯБЧИКОВ П. В., БАТЯНОВСКИЙ Э. И., ЯКИМОВИЧ В. Д.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Введение. С 2006 г. в БНТУ проводились системные исследования на базе кафедры «Технология бетона и строительные материалы» и ее научно-исследовательской лаборатории по направлению эффективного использования углеродных наноматериалов в строительной отрасли. В результате многочисленных экспериментов был выделен ряд углеродных нановеществ («УНМ 1», «УНМ 2», «УНМ-осадок», «УНМ-суспензия» и др.), которые отличаются вещественным составом, способом получения, очистки и введения в цементные (бетонные) композиции. С помощью данных видов УНМ удалось добиться увеличения прочности (и плотности) цементного камня, а на этой основе – повышения различных физико-технических характеристик и свойств бетона.

С позиций эффективного воздействия УНМ на процессы структурообразования, твердения и на прочность цемента особую значимость имеют высочайшая потенциальная энергия ультрадисперсных УНМ, а также их свойство в определенных условиях получения формировать тончайшие волокна (трубки) значительной длины (до десятков микрон) [1–3, 7].

Эффективность введения вещества УНМ в цемент и цементные композиции в целом основывается на двух, взаимно дополняющихся эффектах.

Во-первых, вещество УНМ (по данным разработчиков) содержит значительное количество элементарных составляющих в виде отдельных ультрадисперсных элементов, одностенных и многостенных трубок, коротких волокон, их смесей и т. д., обладающих значительным зарядом поверхности, который концентрирован, сосредоточен в малых, по существу – нанообъемах. При этом их характеризует наибольшее количество энергии у окончаний (вершин) этих элементов, мест искривлений (отклонений от правильных геометрических размеров) и других «дефектов» их структуры [7]. Введение в реагирующую систему «цемент-вода» ультрадисперсного, обладающего значительным энергетическим потенциалом вещества УНМ может способствовать как ускоренному взаимодействию молекул воды с ионами клинкерных минералов, развивая процесс их гидролиза [11], так и процессы гидратации и формирования кристаллогидратных новообразований. В последнем случае эффект ускорения «провоцируют» собственно частицы УНМ, являясь своеобразной физико-энергетической подложкой-затравкой [9], понижающей энергетический порог работы, которую необходимо затратить реагирующей системе «цемент-вода» на образование отдельных кристаллогидратов и последующее формирование их множества в виде спонтанно-организующейся структуры.

Во-вторых, однослойные трубки из УНМ, сформировавшиеся в волокнообразные частицы, характеризуются значительной длиной (до 1000 нм и более при поперечном сечении, которое может быть менее 1,0 нм) [7]. А это предполагает возможность проявления эффекта «наноармирования» кристаллогидратной структуры новообразований цементного камня. Присутствие волокнообразных УНМ также может содействовать развитию процесса гидратации

по изложенной ранее схеме воздействия, за счет наличия энергетически активных окончаний (вершин), изломов и других «дефектов». Однако основной их эффект связан с тем, что при малом поперечном сечении их длина многократно превышает размеры кристаллогидратов клинкерных минералов ($\sim 8\text{--}25$ нм). Следствием этого, как мы считаем, является «зашемление» волоконобразных УНМ среди множества спонтанно формирующихся кристаллогидратов в новообразованиях реагирующего с водой цемента. Такое предположение не противоречит известным данным о размерах сечений пор новообразований (геля) цементного камня, достигающих $0,4\text{--}5,0$ нм [12]. При нагружении образцов затвердевшего цементного камня сжимающей нагрузкой эти волокна УНМ, «армирующие» в нем объемы новообразований, воспринимают часть усилий, возникающих в поперечной плоскости, и, соответственно, способствуют уменьшению поперечных деформаций при одновременном росте процесса прочности на сжатие. Более «грубые» многостенные трубки УНМ (поперечное сечение составляет $20\text{--}80$ нм), способствуя «микроармированию» цементного камня, дополняют и усиливают этот эффект.

После проведенных предварительных испытаний на цементном камне и установления оптимальных видов и дозировок УНМ [5, 6], были осуществлены эксперименты, целью которых являлось установление закономерностей влияния углеродных наноматериалов на физико-технические свойства тяжелого конструкционного (высокопрочного бетона), такие как прочность (на сжатие, при изгибе и осевое растяжение), модуль упругости, усадку, водопоглощение и водонепроницаемость, стойкость в растворах солей NaCl и Na_2SO_4 , и др.

Материалы для исследований. В исследованиях использовались материалы со следующими характеристиками.

Вяжущие – портландцемент ОАО «Красносельскстройматериалы» марки ПЦ 500-Д0, активностью: $R_{ц} \sim 50$ МПа; показателем нормальной плотности (НГ) $25\text{--}28$ %; ОАО «Кричевцементношифер» марки ПЦ 500-Д0, активностью: $R_{ц} \sim 45\text{--}48$ МПа; показателем нормальной плотности (НГ) $26\text{--}28$ %.

Песок – природный; с модулем крупности: $M_k \sim 2,8\text{--}3,0$; насыпной плотностью: $\rho_0 \sim 1580$ кг/м³.

Щебень гранитный (Микашевичи) фракции 5–10 и 5–20 мм; прочностью (по дробимости) 110–120 МПа, насыпной плотностью: $\rho_0 \sim 1380 \text{ кг/м}^3$; плотностью зерен: $\rho_3^0 \sim 2700 \text{ кг/м}^3$.

Щебень гранитный кубовидный фракции 2–4 и 4–6,2 мм; прочностью (по дробимости) 140 МПа, насыпной плотностью: $\rho_0 \sim 1360\text{--}1420 \text{ кг/м}^3$; плотностью зерен: $\rho_3^0 \sim 2700 \text{ кг/м}^3$.

Микрокремнезем – с содержанием аморфного диоксида кремния не менее 85 % по массе; удельная поверхность (по методу БЭТ) $\sim 15,0 \text{ м}^2/\text{г}$.

Гранитный отсев – насыпной плотностью: $\rho_0 \sim 1550 \text{ кг/м}^3$; плотность измельченной горной породы: $\sim 2740 \text{ кг/м}^3$; отсев для получения *каменной муки* мололи в лабораторной шаровой мельнице до удельной поверхности (по прибору типа ПСХ) $S_{\text{уд}} \sim 3000\text{--}3300 \text{ см}^2/\text{г}$; средняя насыпная плотность порошка: $\rho_{\text{к.п.}}^0 \sim 950 \text{ кг/м}^3$.

Химические добавки – добавка-гиперпластификатор «Стахемент 2000» и добавка-гиперпластификатор «SikaViscocrete». По эффективности пластифицирующего действия относятся к пластифицирующим добавкам I группы согласно СТБ 1112–98.

Добавка углеродного наноматериала – УНМ-1 использовалась на основании ранее полученных данных о ее эффективности [5, 6], предоставлялась институтом «ИТМО» им. А.В. Лыкова НАН Беларуси.

Разработанные с учетом зарубежного опыта [4] и данных собственных разработок [10], а также свойств отечественных материалов были подобраны составы тяжелого конструкционного бетона, обеспечивающие различный уровень его прочности на сжатие в диапазоне значений 100–150 МПа, которые частично приведены в табл. 1.

Некоторые эксперименты выполнены на образцах-призмах (40×40×160 мм) из мелкозернистого бетона состава: Ц:П = 1:3 при содержании цемента: Ц = 500 кг (портландцемент П500-Д0 ОАО «Кричевцементношифер»), добавка SikaViscocrete в дозировке 0,3 % от массы цемента по сухому веществу; В/Ц = 0,30–036.

Таблица 1

Номинальные составы бетона для исследований

Расход компонентов, кг, на 1 м ³ бетона:										Хим. добавка, % от МЦ	(В/Ц) _б	Расчетная прочность, МПа, в 28сут. $f_{cm,28}$
№ состава бетона	Ц	П	Обычный щебень		Кубовидный щебень		Мука каменная	МК	В			
			5–10	10–20	2–4	4–6						
1	500 ¹	630	–	–	350	750	75	75	150	1,0	0,26	100...110
2	550 ¹	550	1100	–	–	–	83	83	165	1,0	0,26	100...110
3	520 ¹	565 ²	–	–	350	750	102	102	150	1,5	0,24	120...130
4	600 ¹	540 ²	–	–	300	580	180	180	172	2,0	0,22	140...150
5	350	750	350	775	–	–	–	–	175	0-0,8 ³	0,50	–
6	480	650	430	710	–	–	–	–	168	0,6	0,35	60...70

Примечания: 1. При наличии микрокремнезема водоцементное отношение соответствует: $(В/Ц)_б = В: (Ц+МК)$. 2. Песок с размером зерна < 1,25 мм. 3. Дозировку добавки изменяли с целью обеспечения марки подвижности смеси от П1 (0 %, исходная) до П5 (0,8 %).

Методики исследований. Усадка бетона. Эксперименты провели в соответствии с ГОСТ 24544–81* на образцах бетона (призмы 40×40×160 мм; в серии три образца) состава № 1 (см. табл. 1) с подвижностью смеси марок П1–П5.

Углеродный наноматериал «УНМ-1» (в количестве 0,05 % от массы цемента по сухому веществу) вводили в бетон на стадии приготовления смеси после предварительного смешивания с песком. Образцы в процессе испытаний твердели в нормальных условиях помещения лаборатории ($t \sim (20 + 2) ^\circ\text{C}$; $\phi \sim (55-65) \%$). Отсчеты снимали в возрасте 1, 3, 7, 24, 21 и 28 суток.

Модуль упругости бетона. Определение модуля упругости проводили согласно ГОСТ 24452–80 и методике «НИИЖБа» [8] путем постепенного (ступенями) нагружения образцов-призм 100×100×400 мм, количество 3 шт. в каждой из серий испытаний, осевой сжимающей

нагрузкой до уровня 30 % предварительно определенной призмочной прочности бетона с измерением в процессе нагружения образцов их деформаций в продольном и поперечном направлениях.

Эксплуатационные свойства тяжелого бетона. Для оценки влияния УНМ на эксплуатационные свойства высокопрочного бетона были взяты его составы (№№ 1, 3 и 4 по табл. 1) характеризующиеся различной прочностью. Добавку углеродного наноматериала «УНМ-1» в оптимальной дозировке 0,05 % от массы цемента вводили в бетон предварительным смешиванием с песком. Условия твердения образцов бетона (возраст 28 суток) нормально-влажностные ($t \sim (20 \pm 3) ^\circ\text{C}$; $\varphi \geq 90 \%$).

Водопоглощение бетона. Водопоглощения бетона по массе определяли по ГОСТ 12730.3–78.

Воздухо-, водонепроницаемость бетона. В экспериментах водонепроницаемость высокопрочного бетона на образцах составов № 1, № 3 и № 5 (см. табл. 1) устанавливали в соответствии с положениями ГОСТ 12730.5–84 по воздухопроницаемости поверхностных слоев бетона, оцениваемой при помощи прибора типа «Агама-2Р».

Водостойкость бетона. Водостойкость оценивали по снижению прочности образцов бетона (для сравнительного состава Ц = 400 кг; В/Ц ~ 0,35; $f_{cm,28} \geq 60$ МПа) при циклическом насыщении в воде (~ 16 ч) с последующим высушиванием (~ 8 ч) при температуре до 60 °С. Ужесточение испытаний [8] с целью их ускорения было реализовано тем, что разогретые образцы помещали в воду без охлаждения, дополнительно подвергая их «термическому» удару при жидкостном охлаждении.

Коррозионная стойкость бетона в солевой среде. Выбор коррозионных испытательных сред в виде солей хлоридов и сульфатов учитывает их распространенность и опасность воздействия на бетон и железобетон. Сущность ускоренных испытаний [8] заключается в определении воздействия насыщенных растворов хлористого натрия и сернокислого натрия на изменение массы и прочности на сжатие, как отражения изменений (нарушений) структуры образцов тяжелого бетона исходной прочностью 60–70; 100–110; 120–130 и 140–150 МПа. Сравнительная оценка воздействия заключалась в определении изменений этих показателей, прошедших испытания в виде 10 циклов попеременного насыщения в растворе соли высокой концентрации и высушивания.

Испытаниям подвергались образцы бетона составов (см. табл. 1), как контрольные, так и с добавкой УНМ-1 в дозировке 0,05 % от МЦ, а также образцы «сравнительного» состава (прочностью в проектном возрасте $f_{cm,28} \sim 60\text{--}70$ МПа).

Морозостойкость бетона. Морозостойкость бетона определяли ускоренным методом по ГОСТ 10060–95 с насыщением, замораживанием (при $T = -(55\text{--}60)^\circ\text{C}$) и оттаиванием в 5 % растворе NaCl ($t \sim 18^\circ\text{C}$).

Защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре. Для оценки влияния УНМ на коррозионное состояние стали в бетоне в их присутствии, а также на защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре в агрессивной солевой среде, на начальном этапе использовали «рядовой» бетон состава № 5 табл. 1, в который вводили разное количество добавки «УНМ-1» – от 0 до 0,15 % от массы цемента. Затем для испытаний были взяты составы высокопрочного бетона (№ 1, № 3 и № 4 по табл. 1).

Основными задачами исследований являлись на первом этапе – выявление возможного влияния вещества углеродной нанодобавки на сохранность стальной арматуры в тяжелом бетоне, а затем – оценка защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре при внешней агрессии среды.

Для решения этих задач вначале оценили возможность коррозионного воздействия добавки УНМ на арматуру в бетоне по методике СТБ 1168–99 по «направлению 1» (при разовом насыщении бетона водой с последующим «снятием» поляризационных кривых). Затем оценили защитную способность бетона с УНМ по отношению к стальной арматуре (по «направлению 2») после 20-ти циклов насыщения-высушивания (при насыщении в 5 % растворе NaCl), т. е. при внешней агрессии солевой среды.

Огнестойкости высокопрочного бетона с УНМ. Задачей этих испытаний была сравнительная оценка «поведения» высокопрочного бетона не содержащего и содержащего (в дозировке 0,05 % от массы цемента) «УНМ-1» в своем составе.

Изготовление конструкций для испытаний на жаро-, огнестойкость бетона осуществлено в г. Борисове на предприятии ОАО «Завод сборного железобетона – Борисов». В соответствии с требованиями, предъявленными от испытательного полигона, были изготовлены железобетонные конструкции в виде плит, размерами

3300×3000×150 мм. Состав бетона номинально соответствовал составу № 1 табл. 1, со следующими отличиями:

- использован традиционный щебень фр. 5–20 мм, III-ей группы (содержание лещадных зерен до 35 %); при рекомендуемом – кубовидном или традиционном I группы (лещадных зерен – до 10 %);

- использован песок природный (Mк ~ 2,6), сеяный (при рекомендуемом – мытом);

- вода речная (р. Березина), удовлетворяющая требованиям СТБ 111–98.

Приготовление бетона осуществляли при автоматизированном дозировании основных компонентов: цемента, песка, щебня, воды. Дозирование и введение дополнительных компонентов: пластифицирующей добавки, микрокремнезема и углеродного наноматериала, осуществляли в ручном режиме. В результате этого время приготовления (перемешивания бетона) смеси: ОК ~ 12–15 см (марка ПЗ) составила ~ 6–8 мин, т. е. в 3 и более раза дольше традиционного (~ 2 мин), что обусловило повышенное воздуховлечение в бетон (~ 4–5 %). Добавку «УНМ-1» вводили вслед за пластификатором (интенсивно смешав с частью воды затворения).

Условия твердения бетона изделий – естественные (при диапазоне температур (ночная-дневная) (5–15) °С), под укрытием из полиэтиленовой пленки, с периодическим поливом водой поверхности конструкций. Контрольные образцы бетона для определения прочности хранили в аналогичных условиях.

Огневые испытания проводились на испытательном полигоне «НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций» Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, согласно ГОСТ 30247.0–94 и ГОСТ 30247.1–94 в течение 90 мин под несущей нагрузкой в 100 т для обеих панелей (контрольная и с УНМ). Указанный уровень нагрузки взят с учетом возможностей участка испытательного полигона, предназначенного для испытаний вертикальных конструкций.

Физико-технические свойства тяжелого конструкционного бетона. Основные результаты анализа и обобщения экспериментальных данных о влиянии отечественных углеродных наноматериалов на прочностные, упруго-деформативные и эксплуатационные свойства и характеристики тяжелого конструкционного бетона (на примере бетона с базовой прочностью ~ 100–110 МПа) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики и свойства тяжелого бетона с УНМ-1

Наименование свойств и характеристик бетона	Ед. изм.	Показатель уровня характеристик бетона		Прирост показателя, %
		Без УНМ	С УНМ-1 0,05 % от МЦ	
1	2	3	4	5
1. Прочность на сжатие (в 28 суток)	МПа	67,4	76,9	+14,1
1.1 Мелкозернистый бетон				
1.2 Высокопрочный бетон (состав № 1 по табл. 1)	МПа	107,8	122,0	+13,2
2. Прочность на растяжение при изгибе (мелкозернистый бетон)	МПа	8,22	10,20	+15,6
3. Прочность на осевое растяжение (раскалывание образцов: мелкозернистого бетона/ бетона состава по № 1 табл. 1)	МПа	<u>2,20</u>	<u>2,73</u>	<u>+24,1</u>
		4,55	5,68	+24,8
4. Призмная прочность высокопрочного бетона (состав № 1)	МПа	82,0	88,9	+8,4
5. Модуль упругости статический (состав № 1, подвижность марок П1–П5)	ГПа	47,3– 45,0	48,5– 46,4	+ 2–3
6. Коэффициент Пуассона (состав № 1)	Дол. ед.	0,22	0,20	–9,1
7. Усадка (в % к 28 суткам (состав №1 табл.1, подвижность марок П1–П5)	%	0,01075– 0,011725	0,010750– 0,01705	–
8. Водопоглощение по массе	%	4,0	3,6	–10,0
8.1 Мелкозернистый бетон				
8.2 Бетон прочностью на сжатие $f_{cm,28} \sim 60–70$ МПа				
$f_{cm,28} \sim 140–150$ МПа				
9. Воздухо-водонепроницаемость высокопрочного бетона:	m_c , с/см ³ (марка)	77,5 (W18);	85,0 (W18);	–
– для $f_{cm,28} \sim 100–110$ МПа;				
– для $f_{cm,28} \sim 140–150$ МПа		144,0 (>W20)	150,0 (>W20)	–

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5
10. Водо- и солестойкость высокопрочного бетона (снижение прочности бетона после циклических испытаний) – для $f_{cm,28} \sim 100\text{--}110$ МПа;	%	7,8	6,2	20,5
– для $f_{cm,28} \sim 140\text{--}150$ МПа		4,0	3,4	15,0
11. Морозостойкость высокопрочного бетона состава №1 в солевой среде	марка	F500	F500	–
12. Коррозионное состояние арматуры (состав № 1) для подвижности марок П1–П5 при введении УНМ-1 (0,05–0,1) % от МЦ	I, Мк А/см ²			
12.1 Для водной среды		До 2,5	До 2,0	–
12.2 После 20 циклов в 5 % растворе NaCl		До 3,6	До 2,8	
13. Огнестойкость при испытании панелей из высокопрочного бетона состава №1 (3300×3000×150) мм в течение 90 мин, под нагрузкой 1000 кН	испытания	Выдержал	Выдержал	–
13.1 Температура прогрева с противоположной от огня стороны	°С	125	109	–
13.2 Прогиб по вертикальной оси	%	8	4	–
13.3 Образование сквозных трещин	–	Нет	Нет	–

Из результатов экспериментальных данных очевидна общая закономерность повышения качественных характеристик тяжелого конструкционного бетона при введении в его состав добавки отечественного углеродного наноматериала УНМ-1.

Выводы. Введение в бетон углеродного наноматериала УНМ-1 в оптимальной дозировке 0,05 % от массы цемента обеспечивает существенное улучшение качественных характеристик конструкционных тяжелых бетонов (мелкозернистого и с крупным заполнителем) разного уровня прочности на сжатие: от 40–60 МПа, до 100–150 МПа, включая прочностные, упруго-деформативные и эксплуатационные характеристики и свойства бетона.

Экспериментально установлено, что под влиянием УНМ-1 прочностные характеристики мелкозернистого тяжелого (цементно-пес-

чаного) бетона в 28 суточном возрасте возрастают: до ~ 14 % прочность на сжатие, до ~ 16 % прочность при изгибе, до ~ 24 % прочность на осевое растяжение и срез (определены на основе испытаний раскалыванием), а также на ~ 10 % снизилось водопоглощение бетона по массе. При этом больший (в 1,5 раза) рост прочности бетона (как мелкозернистого, так и бетона с крупным заполнителем) на осевое растяжение, например, в сравнении с ее ростом при изгибе, подтверждает правомерность исходной гипотезы о нано-, микроармировании структуры цементного камня в бетоне одно- и многослойными трубчатым углеродным наноматериалом, что является основой данного явления.

Выявлены закономерности развития усадочных явлений в высокопрочном бетоне в зависимости от консистенции бетонной смеси (от марки П1 до марки П5) и влияния вещества УНМ на этот процесс и величину усадки. Выявлено, что введение 0,05 % УНМ-1 от МЦ в бетон (как мы считаем – за счет ранее установленного повышения плотности цементного камня) снижает усадку на ~ 5–6 % в первые сутки твердения и до 2 % к проектному возрасту. Следовательно, понижает отрицательный эффект от «непроявившейся» и микроусадки, т. е. уменьшает количество будущих центров концентрации напряжений при «работе» бетона под нагрузкой, способствуя росту его прочности.

Определено, что введение в высокопрочный бетон добавки УНМ-1 в дозировке 0,05 % от МЦ сопровождается незначительным (на 2–3 %) ростом модуля упругости бетона, который, на наш взгляд, взаимосвязан с повышением плотности и прочности бетона под влиянием этой добавки. Влияние собственно вещества УНМ, элементарные частицы которого «встраиваются» в структуру кристаллогидратных новообразований, может снизить модуль упругости бетона, что подтверждают экспериментальные данные при увеличении дозировки УНМ-1 сверх оптимальной (до 0,1 от МЦ, т. е. в два раза). Снижение, в последнем случае, модуля упругости бетона составило ~3,5 %, для образцов из литой бетонной смеси (марки П5).

Выявлено, что добавка УНМ способствует снижению до 6–7 % водопоглощения по массе высокопрочного бетона; повышает сопротивление бетона проникновению воздуха до 9,0 %, при обеспечении его водонепроницаемости марок: $W \geq 18$; существенно повышает водо- и коррозионную (в солях NaCl и Na₂SO₄) устойчивость бетона, а

также способствует росту его морозостойкости (соответствующей для бетона прочностью $f_{cm,28} \geq 100$ МПа марке «F500», установленной в солевой (NaCl) среде, и превышает марку «F1000» для бетона общестроительного назначения), а также повышает защитную способность бетона по отношению к стальной арматуре.

Прямыми испытаниями на огнестойкость бетона в изделиях выявлена положительная роль углеродного наноматериала, введенного в состав бетона в оптимальной дозировке, проявившаяся в следующем соотношении показателей при огневом воздействии, в течение 90 минут под нагрузкой на панель 1000 кН (100 т): локальная температура (с противоположной от огня стороны – $T_{лок} = 125$ °С без УНМ и $T_{лок} = 109$ °С с УНМ; прогиб по вертикальной оси – $L \sim 8$ % без УНМ и $L \sim 4$ % с УНМ; потерь устойчивости не было у обеих панелей и обе они выдержали испытания в целом («предельных состояний» (по терминологии данных испытаний) не обнаружено).

Кроме этого, был произведен поиск наиболее оптимального способа введения УНМ в цементные бетоны с позиций равномерного распределения малых дозровок его по объему приготавливаемой бетонной смеси. Решение этой задачи было реализовано различными приемами: через водные дисперсии с водой затворения; с цементом, после совместного высокоинтенсивного перемешивания; с мелким заполнителем для бетона – песком, а также с химической добавкой в бетон (сульфатом натрия Na_2SO_4 (CH)) или комплексной, включающей добавку суперпластификатор (С-3) и сульфат натрия.

Экспериментально установлено, что при тщательной реализации указанных приемов эффективность введения УНМ в цементные бетоны, отраженная в росте прочности бетона, практически одинакова.

Однако, наиболее эффективный вариант введения УНМ, особенно в «рядовых» по прочностным свойствам характеристикам бетонов, это введение его в составе комплексной химической добавки на стадии приготовления бетонной смеси, так как эффективность от введения УНМ дополняется эффектами от снижения начального водосодержания за счет пластифицирующего компонента, повышения темпа роста прочности в начальный период твердения бетона за счет ускорителя твердения, а также эффективности собственно вещества УНМ.

С целью минимизации затрат на компоненты добавки, содержащей углеродный наноматериал УНМ-1, в комплексной химической

добавке, получившей название «УКД-1» (углеродсодержащая комплексная добавка), использованы широко применяемые в строительной практике суперпластификатор «С-3» и ускоритель твердения – сульфат натрия (Na_2SO_4). Добавка готовится в сухом (порошкообразном) виде путем высокоинтенсивного механического смешивания компонентов. Стабильная адсорбционная «фиксация» частиц УНМ на поверхности зерен сульфата натрия обеспечивает последующее равномерное распределение вещества УНМ в воде затворения и далее в бетоне.

По данным ОАО «Завод сборного железобетона – Борисов» применение добавки «УКД-1» в дозировке 0,75–1,0 % от массы цемента позволило на 10 % снизить расход цемента и сократить до 2 ч (вместо 4 ч и более) подачу пара при тепловой обработке (одновременно понизив ее температуру до ~ 50–55 °С) с соответствующим экономическим эффектом, который составляет разницу между снижением затрат за счет экономии цемента и тепла и стоимостью добавки на 1 м³ бетона в сумме ~ 5,0–5,5 ден. руб. Это свидетельствует о вполне приемлемой экономической эффективности данной добавки, содержащей отечественный структурированный углеродный наноматериал.

Обобщение результатов всей совокупности экспериментов о влиянии вещества УНМ-1 на физико-технические характеристики и свойства тяжелого конструкционного бетона, отраженное данными табл. 2, свидетельствуют о стабильном и достаточно высоком эффекте его применения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ebbesen, T. W. Large-scale synthesis of carbon nanotubes / T. W. Ebbesen, P. M., Ajayan // *Nature*. – 1992. – Vol. 358, № 6383. – P. 220–222.
2. Iijima, S. Helical microtubules of graphitic carbon / S. Iijima // *Nature*. – 1991. – Vol. 354, № 6348. – P. 56–58.
3. Krätschmer, W. Solid C60: a new form of carbon / W. Krätschmer, Lowell D. Lamb, K. Fostiropoulos & Donald R. Huffman // *Nature*. – 1990. – Vol. 347, № 6291. – P. 354–358.
4. Yamada, K. Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer / K. Yamada, T. Takahashi,

S. Hanehara, M. Matsuhisa// Cement and Concrete Research. – 2000. – V. 30. – № 2. – P. 197–207.

5. Батяновский, Э.И. Нанотехнологии и углеродные наноматериалы в строительном материаловедении / Э.И. Батяновский, П.В. Рябчиков, В.Д. Якимович // Строительная наука и техника. - №3(24). – 2009. – С. 22–29.

6. Батяновский Э.И. Влияние углеродных наноматериалов на свойства цемента и цементного камня / Э.И. Батяновский, А.В. Крауклис, П.П. Самцов, П.В. Рябчиков, П.П.Самцов // Строительная наука и техника. № 1–2 (28–29), 2010. – С. 3–10.

7. Елецкий, А.В. Углеродные нанотрубки / А.В. Елецкий // Успехи физических наук. – 1997. – Т. 167, № 9. – С. 945–972.

8. Лещинский, М.Ю. Испытания бетона: Справочное пособие / М.Ю. Лещинский. – М.: Стройиздат, 1980. – 360 с.

9. Линников, О.Д. Закономерности кристаллизации неорганических солей из водных растворов: дис. докт. химич.наук: 02.00.04/ О.Д. Линников. –Екатеринбург, 2011. – С. 32–46.

10. Рябчиков, П.В. Составы и свойства высокопрочного бетона, содержащего углеродные наноматериалы / П.В. Рябчиков, В.Д. Якимович, Э.И. Батяновский. //Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. трудов /Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. РУП «Институт БелНИИС»; редкол. М.Ф. Марковский (председатель) [и др.]. – Минск: издатель А.Н. Вараксин, 2014. – № 6. – С. 343–359.

11. Староверов, В. Д. Структура и свойства наномодифицированного цементного камня: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.05. / В. Д. Староверов; ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет». – С-Пб., 2009. – 20 с.

12. Тейлор, Х. Химия цемента. Пер. с англ. / Х. Тейлор. – М.: Мир, 1996. – 560 С.