

Смесь подвергалась механоактивации при низком водотвердом отношении (0,3–0,45). Водопотребность вяжущей системы возрастала с увеличением количества минеральных добавок. После механоактивации образуется гомогенная упруговязкопластичная система. Осадка конуса на приборе для определения подвижности раствора составляла 3–6 см. Из приготовленной смеси формовались образцы-кубы с ребром длиной 70 мм. Образцы изготавливались способом виброформования с кратковременным уплотнением. Средняя плотность образцов составляла 1200–1400 кг/м³, предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток составил 2,5–4,5 МПа. Особенность разработанной технологии состоит в том, что она позволяет получать изделия по энергосберегающей технологии из фосфогипсового отхода, не подвергающегося обжигу. Фосфогипсовые стеновые материалы рекомендуется использовать в малоэтажном строительстве.

УДК 621.762; 691.002(032)

ТЯЖЕЛЫЙ КОНСТРУКЦИОННЫЙ БЕТОН С УГЛЕРОДНЫМ НАНОМАТЕРИАЛОМ

РЯБЧИКОВ П. В., БАТЯНОВСКИЙ Э. И.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Введение. С появлением и развитием в 2000-х гг. отечественного производства углеродных наноматериалов, характеризующихся уникальным структурным строением и свойствами, возникла актуальность исследований с целью их практического применения для повышения качественных характеристик цементного бетона. Предстояло выявить возможную эффективность отечественных УНМ в конструкционном цементном тяжелом бетоне с позиций повышения его качественных характеристик, установить причинно-следственную связь возможных изменений в развитии химических реакций цемента с водой в присутствии УНМ и в продуктах гидратации цемента, как следствия этих изменений. Следовало определить эффективность разновидностей УНМ, полученных разными способами, их рациональные дозировки и приемы введения в бе-

тонные смеси. Предстояло дать оценку изменений не только технологии получения бетона, «модифицированного» УНМ, но и определить наиболее рациональную область его применения, особенно с учетом достаточно высокой стоимости УНМ на момент начала исследований.

Анализ литературных источников о развитии с началом 2000-х годов по настоящее время проблематики использования углеродных наноматериалов (УНМ) в странах «постсоветского» пространства (в основном в Российской Федерации) и за рубежом (работы Аубакировой И. У., Пухаренко Ю. В., Староверова В. Д., Ковалева А. Ю. и др.; Яковлева Г. И., Пудова И. Н., Пислегина А. В., Лушникова А. А. и др.; Гусева Б. В., Петрунина С. Ю., Ваганова В. Г. и др.; Соловьевой Т. К., Акчурина Т. К., Пушкарской А. Ю. и др.), а также интернет источников о результатах работ Xie X. L. и др., Makar J. M. и др., Shah S. H. и др., Swirzen A. и др., Konsta-Gdoutos M. S. и др., Li G. Y. и др., Sanchez F. и др., [1–7 и др.] выполнявшихся практически одновременно (в период с 2005 г.), показал, что:

– исследования на «постсоветском» пространстве выполняли на углеродных наноматериалах зарубежного производства (в основном французского) в виде многослойных нанотрубок, характеризующихся поперечным сечением в диапазоне преимущественно от 70 до 170 нм (700–1700 Å), в то время как сечения пор геля (кристаллогидратных новообразований) цементного камня по общепризнанным данным не превышают 40–50 Å, что исключает эффект наноармирования структуры кристаллогидратных новообразований (обеспечивая при этом эффект микроармирования) цементного камня;

– подавляющий объем исследований выполнен на цементном камне с частичным переходом к мелкозернистому (цементно-песчаному) бетону и одиночными данными, относящимися к бетону с крупным заполнителем (в зарубежных источниках отсутствуют), т.е. влияние УНМ на технологические свойства бетонных смесей и физико-технические свойства бетона (кроме прочности на сжатие и, в отдельном случае, – на морозостойкость) не изучались;

– весь объем исследований сосредоточен на варианте введения УНМ в цементное тесто с водой затворения в виде дисперсий, полученных высокоинтенсивной гидрокавитационной обработкой их с затратами времени до 60 и более минут на приготавливаемую пор-

цию дисперсии, без рассмотрения иных вариантов введения УНМ в цементное тесто и бетонные смеси, что ограничивает возможность их применения в технологии бетона;

– отсутствуют данные о возможном влиянии вещества УНМ на изменения в морфологии продуктов взаимодействия цемента с водой в их присутствии.

Результаты исследований с цементным камнем.

На начальном этапе работ были проведены экспериментальные исследования влияния разновидностей (твердофазных и суспензионных) углеродных наноматериалов на стандартизированные свойства цемента (нормальную плотность, сроки схватывания, активность и равномерность изменения объема), на кинетику роста и уровень прочности цементного камня, а также на структурно-фазовые изменения в затвердевшем цементном камне, т. е. на возможные морфологические изменения в продуктах его гидратации. В результате выявлена наиболее эффективная разновидность отечественного углеродного наноматериала, получившего маркировку «УНМ-1» (рис. 1) и содержащего структурированный углерод в виде ультрадисперсных углеродных наночастиц до 5 %, до 45 % однослойных трубок (волокон), многослойных трубок до 45 % (длиной 100–5000 нм), до 1,5 % дисперсных частиц металла и до 5 % аморфного углерода по массе вещества. Установлена оптимальная дозировка вещества «УНМ-1», составляющая 0,05 % от массы цемента (рис. 1, б), и выявлено, что это вещество не вступает в химическое взаимодействие с цементом и продуктами его гидролиза – гидратации, а повышение темпа роста и уровня прочности цементного камня связаны со следующим.

Во-первых, с ускоренным и большим количественно формированием традиционных (по данным рентгенофазового и дериватографического анализов) кристаллогидратных новообразований в твердеющем цементном камне, как мы считаем, за счет влияния ультрадисперсных частиц, а также окончаний и изломов трубчатых элементов УНМ, характеризующихся высоким энергетическим («сосредоточенным») потенциалом, играющих роль «квазицентров» кристаллизации, (что согласуется с данными докторской диссертации Линникова О. Д.), способствующих понижению «порога» энергетических затрат от реагирующей системы «цемент-вода» на образование кристаллогидратов, что сопровождается ростом плотности

структуры и прочности цементного камня. Во-вторых, связано с эффектом «наноармирования» структуры кристаллогидратных новообразований однослойными и микроармирования структуры цементного камня в целом многослойными трубчатыми элементами УНМ, что подтверждает более значительный (в 1,5–2 раза) относительный рост прочности цементного камня и бетона на осевое растяжение, чем на изгиб и сжатие.

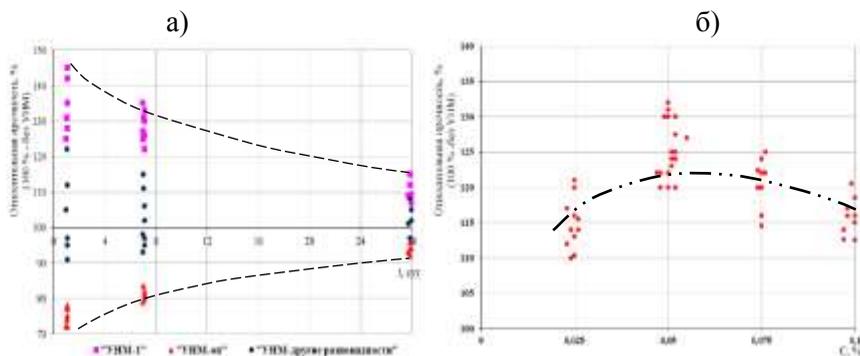


Рис. 1. Влияние разновидностей УНМ (дозировка 0,05 % от МЦ) на прочность (сжатие) цементного камня (а) и дозировки «УНМ-1» (б) на прочность цементного камня (28 суток нормально-влажностного твердения)

Снижение эффекта роста прочности цементного камня при введении «УНМ-1» сверх 0,05 % от МЦ (рис. 1, б) очевидно связано с двумя причинами, действующими одновременно с отмеченными положительными эффектами. Во-первых, УНМ – гидрофобное вещество и, не смотря на контакт с водой, в затвердевшем цементном камне на поверхности его частиц имеются участки с адсорбированным воздухом, т.е. в объем кристаллогидратных новообразований привносится пористость. Во-вторых, имеет место частичное замещение молекул гидратной воды в межплоскостных пространствах между кристаллогидратами встраивающихся в их структуру тончайших однослойных трубчатых УНМ, что в совокупности (с превышением дозировки УНМ над оптимальной) понижает их эффективность.

Экспериментальная оценка влияния всех исследованных разновидностей УНМ на стандартизированные свойства цемента показала, что в дозировке от 0,001 % до 0,1 % от массы цемента они не

оказывают практического воздействия на нормальную плотность (водопотребность) цемента и равномерность изменения его объема. При этом сокращаются сроки схватывания (на 5–10 %) для УНМ-1 (твердофазного и суспензионного) и увеличиваются (на 10–15 %) для других разновидностей, особенно для УНМ-торф 2 и УНМ-оп, полученных из органического сырья по оригинальной технологии (отличающейся от технологии получения УНМ-1).

Для «УНМ-1» возросла «активность» цемента (твердение в воде) до ~ 16,5 %, а, например, УНМ-торф 2 и УНМ-оп снизили ее на ~ 9,0 % и ~ 25,0 % соответственно.

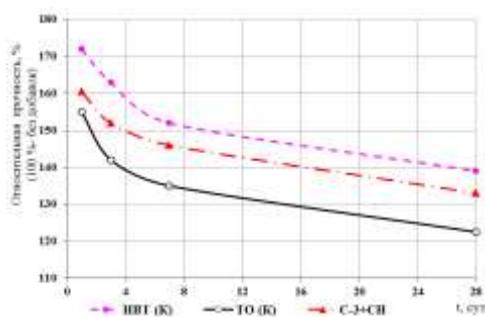


Рис. 2. Прочность цементного камня с комплексной добавкой «УНМ-1+С-3 +СН» (К) при различных условиях твердения

Экспериментальная оценка эффективности комплексного сочетания добавок в цемент (и, следовательно, в цементный бетон), содержащих УНМ и ускоритель твердения (сульфат натрия – Na_2SO_4 ; СН); УНМ и пластификатор (С-3), а также комплекс: пластификатор (С-3) – ускоритель твердения (СН) – «УНМ-1», показала, что наиболее эффективна последняя (рис. 2), обеспечивающая рост прочности цементного камня к проектному для бетона возрасту – 28 суток, до 30–40 %.

Рост плотности структуры цементного камня с введением 0,05 % «УНМ-1» экспериментально подтвержден возросшим до ~ 7 % количеством химически связанной воды и степенью гидратации цемента, повышением скорости распространения ультразвука, в образцах цементного камня с «УНМ-1» (на ~ 8,0 %) и данными электронной микроскопии структуры сколов образцов, характеризующейся более организованным и плотным строением в присутствии угле-

родного наноматериала, что согласуется с аналогичными данными анализировавшихся источников. А также результатами рентгенофазового и дериватографического анализов, свидетельствующих, во-первых, о возросшем количестве традиционных для портландцемента кристаллогидратных новообразований в присутствии 0,05 % «УНМ-1», а, во-вторых, об отсутствии новых, с измененной морфологией, фаз новообразований.

Одновременно выявлены изменения (рис. 3) в дериватограммах проб цементного камня с УНМ при нагреве до температуры ≥ 650 °С; выразившиеся в переходе от эндотермического эффекта, характерного для «чистого» цементного камня (рис. 3, а), к некоторой совокупности последовательных эндотермического и экзотермического эффектов для цементного камня с УНМ (рис. 3, б). При этом суммарная площадь эндотермических эффектов проб с 0,05 % «УНМ-1» больше, чем аналогичная для «чистого» цементного камня, что свидетельствует о большем количестве разлагающихся новообразований. В дальнейшем выявилось положительное влияние экзотермических эффектов на огнестойкость конструкционного бетона при соответствующих испытаниях. Можно предположить, что выгорающие элементарные трубчатые частицы УНМ создают полости (каналы), обеспечивающие частичное испарение гидратной воды из системы кристаллогидратных новообразований, минимизируя взрывообразное, резко разрушающее структуру цементного камня ее удаление при огневом воздействии на бетон.

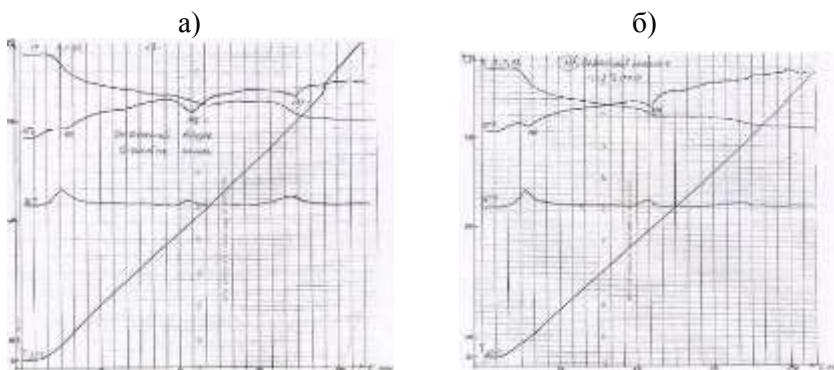


Рис. 3. Дериватограмма пробы «чистого» цементного камня (а) и содержащего 0,05 % «УНМ-1» от массы цемента (б)

Анализ и обработка результатов исследований, полученных при изучении влияния углеродных наноматериалов на физико-технические характеристики и свойства цемента и цементного камня, выявленные положительные эффекты этого влияния создали необходимые предпосылки для исследования их эффективности в бетоне.

Результаты оценки влияния УНМ на свойства бетона. На следующем этапе были проведены эксперименты по оценке влияния углеродного наноматериала («УНМ-1») на технологические свойства бетонных смесей «рядового» тяжелого бетона («стандартизированного») (ГОСТ 30459-96) состава и высокопрочного (класс С70/85 по СТБ 1544-2005 или класс С90/105 по СТБ EN 206-1-2011, прочностью на сжатие в 28 суток ~ 105 – 110 МПа) в диапазоне консистенций марок П1–П5.

При этом было выявлено, что при тщательной подготовке и реализации разных приемов введения УНМ, его эффективность, выраженная в росте прочности цементного камня и мелкозернистого (цементно-песчаного) бетона, при соблюдении прочих равных условий, практически одинакова. Более устойчивый эффект характерен для введения УНМ в виде водных дисперсий и после предварительного смешивания с песком, а наибольший эффект достигается при совместном «смешивании-домоле» с цементом и при введении в виде комплексной (пластифицирующе-ускоряющего действия) добавки (рис. 4, *а* и *б*; рис. 5, *а* и *б*).

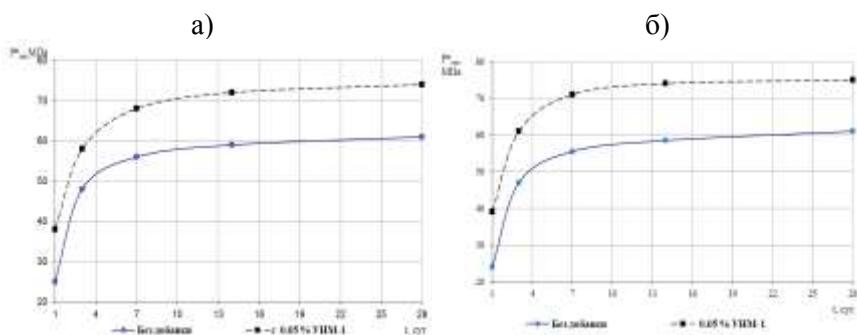


Рис. 4. Кинетика роста прочности цементного камня в нормально-влажностных условиях твердения: при введении УНМ с водой затворения (*а*) и (*б*) – с «домолом» цемента

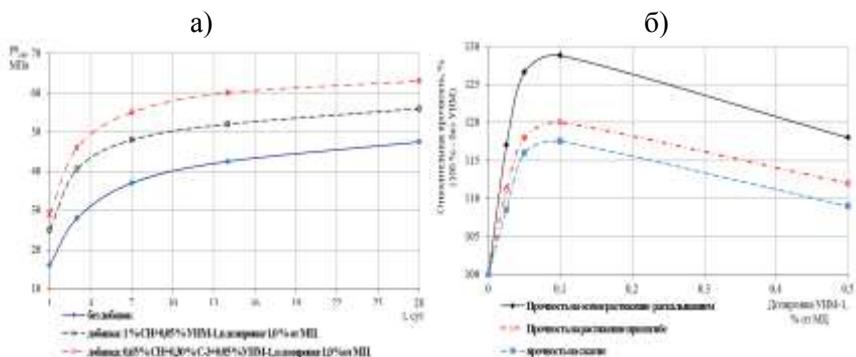


Рис. 5. Кинетика роста прочности на сжатие мелкозернистого (цементно-песчаного) бетона и ее уровень при нормально-влажностном твердении: *а* – при введении «УНМ-1» с химическими добавками; *б* – в возрасте 28 суток в зависимости от дозировки «УНМ-1» при смешивании с песком

Таблица 1

Номинальные составы бетона для исследований

№ состава бетона	Расход компонентов, кг, на 1 м ³ бетона:									Хим добавка, %	(В/Ц) _б
	Ц	П	Обычный щебень		Кубовидный щебень		Мука каменная	МК	В		
			5–10	10–20	2–4	4–ёб					
1	500 ¹	630	–	–	350	750	75	75	150	1,0	0,26
2	550 ¹	550	1100	–	–	–	83	83	165	1,0	0,26
3	520 ¹	565 ²	–	–	350	750	102	102	150	1,5	0,24
4	600 ¹	540 ²	–	–	300	580	180	180	172	2,0	0,22
5	350	750	350	775	–	–	–	–	175	0–0,8 ³	0,50
6	480	650	430	710	–	–	–	–	168	0,6	0,35
1,1	500	630	–	–	350	750	75	75	150	0,6	0,26
1,2	500	630	–	–	350	750	75	75	150	1,0	0,26
1,3	500	630	–	–	350	750	75	75	160	2,0	0,28
1,4	500	630	–	–	350	750	75	75	160	2,5	0,28
1,5	500	560	–	–	300	700	150	150	170	3,0	0,26
5,1–5,5	350	750	–	–	–	–	–	–	175	0–0,8	0,50

Примечания: 1. При наличии микрокремнезема водоцементное отношение составляет: (В/Ц)_б = В:(Ц+МК); в качестве химдобавки успешно апробированы пластификаторы: «Стахемент 2000», «Sika Viscocrete», «Реламикс-ПК». 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 %). 4. Для составов бетона № 5 и 6 – фактическое соотношение фракций щебня при изготовлении образцов (фр. 5–20 мм).

Экспериментальная оценка изменений формуемости (рис. 6, а), водо- и раствоороотделения (рис. 6, б), средней плотности бетонных смесей разной консистенции, показала, что в нормальных ($t \sim 20 \pm 5^\circ\text{C}$) температурных условиях бетонные смеси литой консистенции, содержащие УНМ, способны сохранять формуемость на уровне исходной марки П5 в течение 30–45 мин; с понижением на одну марку – в течение 60–75 мин, а также сохранять способность к «вибрационному формованию» до 2–3 ч при дозировке пластификатора в 2–3 % от массы цемента ((0,6–1,0) % по сухому веществу). В целом влияние УНМ предсказуемо и сокращение времени сохранения «равноподвижности» бетонных смесей может быть учтено поправочными коэффициентами в диапазоне 0,9–0,7, доли ед., для, соответственно, марок по подвижности П1–П5 без этой добавки.

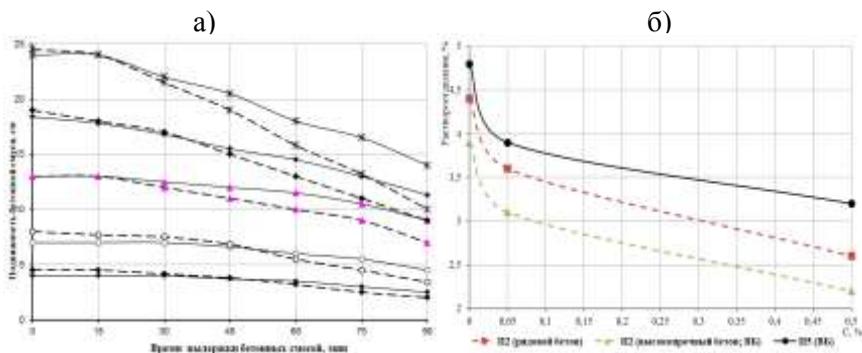


Рис. 6. Тенденция изменений подвижности бетонных смесей высокопрочного бетона (а) и раствоороотделения бетонных смесей (б) (сплошная линия – составы без УНМ; условными символами нанесены данные для составов с 0,05 % «УНМ-1», П5 ***; П4 -◆-◆-◆-; П3 -▲-▲-▲-; П2 -○-○-; П1-●-●-)

Экспериментально подтверждена тенденция понижения водоотделения пластичных бетонных смесей «рядового» по прочности и высокопрочного бетона с введением в их состав «УНМ-1», составившее (при оптимальной дозировке «УНМ-1») (~ 0,05 % от МЦ) порядка 2–6 %, при большем значении для литой бетонной смеси (ОК ~ 23–25 см). Для этой смеси снижение показателя раствоороотделения составило 15–19 %, что в целом свидетельствует о стабилизирующем действии на смесь тонкодисперсных частиц углеродного наноматериала.

Определено, что при введении в жесткие смеси вещества «УНМ-1» они сохраняют равную формуемость до 45–60 мин, а затем показатель жесткости смеси с «УНМ-1» (при прочих равных условиях) возрастает и к 70–80 мин превышает на ~ 20 % жесткость исходной смеси. То есть, сохраняется общая закономерность влияния УНМ-1 на формуемость, характерная для пластичных смесей.

Дальнейшие эксперименты подтвердили эффективность введения «УНМ-1» в тяжелый конструкционный высокопрочный бетон (классов С70/85 – С90/105 по СТБ 1544-2005 или классов С90/105 – С100/115 по СТБ EN 206-1-2011; составы по таблице 1), которая выражена в установленном росте его плотности, прочностных (рис. 7) и упруго-деформативных характеристик, повышении уровня эксплуатационных свойств (рис. 8, табл. 2). При этом для высокопрочного бетона, включая модифицированный УНМ, установлено, что с позиций достижения наибольшей прочности рационально твердение при $t \sim 20+5$ °С с гидроизоляцией поверхности; допустим кратковременный разогрев бетона до $t \sim (40-50)$ °С с гидроизоляцией поверхности, но в этом случае прочность в проектном возрасте на 5–10 % ниже (при сохранении общей тенденции к росту в дальнейшем); превышение температуры разогрева сверх $t = 50$ °С сопровождается резким ускорением роста прочности высокопрочного бетона в первые 24–48 ч твердения при «недоборе» ее как в проектном, так и более позднем возрасте.

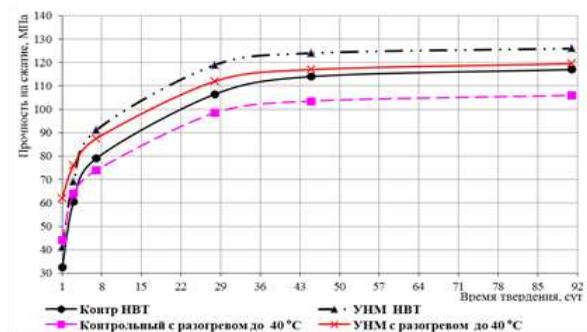


Рис. 7. Кинетика роста прочности высокопрочного бетона (состав № 1, табл. 1) с 0,05 % «УНМ-1» в зависимости от условий твердения

По данным, не вошедшим в статью, установлена закономерность, согласно которой прочность высокопрочного бетона на сжатие (прочностью ≥ 100 МПа), определенная на образцах разных типоразмеров (кубы с ребром 70; 100 и 150 мм) при соблюдении правила «прочих равных условий», одинакова. То есть, масштабный фактор при оценке результатов испытаний контрольных образцов бетона такой прочности равен: $\alpha = 1,0$. Кроме этого, силы сцепления шлифованной гладкой стальной арматуры возросли лишь пропорционально росту прочности (на $\sim 15\%$) бетона с УНМ на сжатие, т. е. не зависят от его наличия в бетоне.

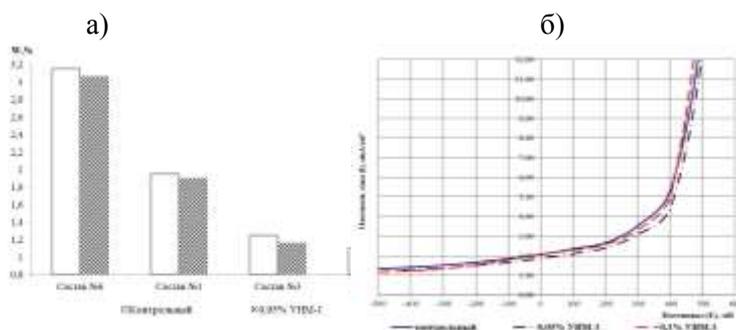


Рис. 8. Тенденция изменений водопоглощения бетона с ростом его прочности и плотности и наличия УНМ (а); б – поляризационные кривые оценки состояния арматуры образца высокопрочного бетона состава № 1 табл. 1 после 20 циклов насыщения (5 % р-р NaCl) – высушивания

Таблица 2

Свойства и характеристики тяжелого бетона с УНМ-1

Наименование физико-технических свойств и характеристик бетона	Ед. изм.	Показатель уровня свойств (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	8,82	10,20	+15,6

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5
3. Прочность на осевое растяжение (раскалывание образцов: мелкозернистого бетона / бетона	МПа	$\frac{2,20}{4,55}$	$\frac{2,73}{5,68}$	$\frac{+24,1}{+24,8}$
4. Призменная прочность высокопрочного бетона	МПа	82,0	88,9	+8,4
5. Модуль упругости статический (№ 1 по табл. 1) подвижность марок П1–П5)	ГПа	47,3–45,0	48,5–46,4	+(2–3)
6. Коэффициент Пуассона (состав № 1 по табл. 1)	Дол. ед.	0,22	0,20	–9,1
7. Усадка (в % к 28 суткам ((состав № 1 по табл. 1), подвижность марок П1–П5)	%	0,01075–0,01725	0,01075–0,01705	–
8. Водопоглощение по массе	%	4,0	3,6	–10,0
8.1. Мелкозернистый бетон				
8.2. Бетон прочностью на сжатие $f_{cm,28} \sim 60$ МПа				
$f_{cm,28} \sim 140–150$ МПа				
9. Воздухо-, водонепроницаемость высокопрочного бетона: – для $f_{cm,28} \sim 100–110$ МПа; – для $f_{cm,28} \sim 140–150$ МПа	мс, с/см ³ (марка)	$\frac{77,5}{(W18)}$ $\frac{144,0}{(>W20)}$	$\frac{85,0}{(W18)}$ $\frac{150,0}{(>W20)}$	– –
10. Водо- и солестойкость высокопрочного бетона (снижение прочности бетона после циклических испытаний) – для $f_{cm,28} \sim 100–110$ МПа; – для $f_{cm,28} \sim 140–150$ МПа	%	7,8 4,0	6,2 3,4	20,5 15,0
11. Морозостойкость высокопрочного бетона (состав №1 по табл. 1) в солевой среде	марка	F500	F500	–
12. Коррозионное состояние арматуры ((состав №1 по табл. 1) для подвижности марок П1–П5 при введении УНМ-1 (0,05–0,1) % от МЦ	I, Мк А/см ²			В обоих случаях менее 5,0
12.1. Для водной среды				
12.2. После 20 циклов в 5 % растворе NaCl				

1	2	3	4	5
13. Огнестойкость при испытании панелей из высокопрочного бетона (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	–

Заключение. Из результатов экспериментов следует, что больший (в 1,5–2 раза) прирост прочности бетона на осевое растяжение, например, в сравнении с ростом ее при изгибе и на сжатие, подтверждает правомерность исходной гипотезы о наноармировании структуры новообразований и микроармировании структуры цементного камня в бетоне структурированным (трубчатым) углеродным наноматериалом, что является основой данного явления.

Установлено, что введение ~ 0,05 % «УНМ-1» от МЦ в бетон (за счет ранее выявленного 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 концентраций 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 прочности бетона под влиянием этой добавки.

Выявлено, что добавка УНМ способствует снижению (на 6–7 %) величины водопоглощения по массе высокопрочного бетона (при исходных значениях $W_m \sim (1,1-2,0) \%$); повышает сопротивление бетона проникновению воздуха до: $(85 - 77,5) / 77,5 \times 100 = 9,7 \%$, при обеспечении его водонепроницаемости марок: $W \geq 18$; существенно повышая 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 мар-

ке «F500», установленной в солевой (NaCl) среде) и защитной способности бетона по отношению к стальной арматуре.

Установлена прямыми испытаниями на огнестойкость бетона в изделиях (плиты размерами 3300×3000×150 мм) положительная роль углеродного наноматериала, введенного в состав бетона в оптимальной дозировке (0,05 % УНМ-1 от МЦ), проявившаяся в следующем соотношении показателей (по ГОСТ 30247.0-94 и ГОСТ 30247.1-94) при огневом воздействии, в течение 90 минут под нагрузкой на панели 1000 кН (100 т): локальная температура (с противоположной от огня стороны – $T_{\text{лок}} = 125$ °С без УНМ и $T_{\text{лок}} = 109$ °С с УНМ; прогиб по вертикальной оси – $L \sim 8$ % без УНМ и $L \sim 4$ % с УНМ; потеря устойчивости не было у обеих панелей и обе они выдержали испытания в целом («предельных состояний» (по терминологии данных испытаний) не обнаружено.

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

2. Imamura, M. C. K-Edge X-Ray Absorption Near-Edge Structure of Carbon Nanotubes / M. Imamura [et al.] // Japanese Journal of Applied Physics. – 1994. – Vol. 33 (2), № 7B. – P. 1016–1019.

3. Жданок, С. А. Синтез углеродных нанотрубок в неравновесных условиях/ С. А. Жданок [и др.] // В кн.: Фуллерены и фуллереноподобные структуры. Сборник научных трудов / Национальная академия наук Беларуси; Институт тепло – и массообмена им. А. В. Лыкова. – Минск, 2005. – С. 32 – 40.

4. Способ получения углеродного наноматериала: пат. 10010 Респ. Беларусь, МПК (2006) C01 B 31/00, D 01 F9/12, B 82B 3/00/ С. А. Жданок, А. П. Солнцев, А. В. Крауклис, И. Ф. Буюков; заявитель ГНУ «Институт тепло-и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси». – № а 20050321; заявл. 31.03.2005; зарег. 27.08.2007; опубл.30.12.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. Цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 6. – С. 117.

5. Способ получения углеродного наноматериала: пат. 13580 Респ. Беларусь, МПК (2009) В 82В 3/00/ С. А. Жданок, А. В. Крауклис, П. П. Самцов; заявитель ГНУ «Институт тепло-и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси». – № а 20090030; заявл. 01.12.2009; зарег. 06.08.2010; опубл. 30.08.2010 // Афіцыйны бюл. / Нац. Цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 4. – С. 93.

6. 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». – СПб., 2009. – 20 с.

7. Гусев, Б. В. Кавитационное диспергирование углеродных нанотрубок и модифицирование цементных систем / Б. В. Гусев, С. Ю. Петрунин // Нанотехнологии в строительстве. – 2014. – Т. 6. – № 6. – С. 50–57.

8. Батяновский, Э. И. Особенности технологии высокопрочного бетона на отечественных материалах, включая нанокремниевые добавки / Э. И. Батяновский, П. В. Рябчиков, В. Д. Якимович // Проблемы современного бетона и железобетона: материалы III Международного симпозиума, Минск, 9–11 ноября 2011 г.: в 2 т. Т. 2. Технология бетона / Министерство строительства и архитектуры Республики Беларусь, Научно-исследовательское республиканское унитарное предприятие по строительству «Институт БелНИИС»; редкол.: М. Ф. Марковский (предс.) [и др.] – Минск, 2011. – С. 53–68.

9. Рябчиков, П. В. Перспективы применения углеродных наноматериалов в технологии тяжелого бетона / П. В. Рябчиков, Э. И. Батяновский // «ALITinform» Международное аналитическое обозрение. – 2015. – № 6 (41). – С. 26–35.

10. Батяновский, Э. И. Высокопрочный бетон с углеродным наноматериалом / Э. И. Батяновский, П. В. Рябчиков. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. – 173 с.