

**БЕТОН С ДОБАВКОЙ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО УГЛЕРОДА:  
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

*Е.Н. Полонина, С.Н. Леонович, Е.А. Коледа, Н.А. Будревич*

Белорусский национальный технический университет, Минск

email: grushevskay\_en@tut.by, snleonovich@yandex.ru, elena\_koleda@bk.ru,  
nellibudrevich@yandex.by

*Выполненные испытания позволили установить оптимальную концентрацию пластифицирующей добавки, на основе наноструктурированного углерода, в бетонных смесях для обеспечения необходимых технологических свойств бетонной смеси и физико-механических характеристик бетона. Показано, что введение добавки, позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики и долговечность бетона.*

*Ключевые слова: долговечность, наноструктурированный углерод, технологические свойства, удобоукладываемость, сохраняемость, воздухововлечение, прочностные характеристики.*

**CONCRETE WITH NANOSTRUCTURED CARBON ADDITIVES:  
PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS**

*E. Polonina, S. Leonovich, E. Koleda, N. Budrevich*

Belarusian National Technical University, Minsk

email: grushevskay\_en@tut.by, snleonovich@yandex.ru, elena\_koleda@bk.ru,  
nellibudrevich@yandex.by

*The tests made it possible to determine the optimal concentration of the plasticizing additive, based on nanostructured carbon, in concrete mixes to ensure the necessary technological properties of the concrete mixture and the physical and mechanical characteristics of the concrete. It is shown that the introduction of an additive allows to substantially increase the operational characteristics and durability of concrete.*

*Keywords: durability, nanostructured carbon, technological properties, workability, maintainability, air entrainment, strength characteristics.*

**Введение.** Разработка новых методов улучшения физико-технических показателей бетона является одним из направлений эффективных исследований в области строительного материаловедения. Применение различных видов наноразмерных добавок, которые широко используются в различных областях промышленности, включая многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ), приводит к улучшению указанных свойств.

В то же время не решена задача с равномерным распределением МУНТ в объеме бетона, а также существуют противоречивые точки зрения на механизм их влияния на показатели свойств бетона. Все это в значительной степени ограничивает обширное использование МУНТ при производстве бетона [1,2].

Решению данной задачи способствует разработка комплексных полифункциональных добавок, включающих суперпластификаторы на основе эфиров поликарбоксилатов и МУНТ, которые обеспечат модифицирование цементных бетонов для создания высококачественного композиционного материала с высокими эксплуатационными и технологическими свойствами.

Во многих исследованиях обоснована возможность модифицирования тяжелых бетонов на основе портландцемента водными дисперсиями МУНТ, приводящая к повышению физико-технических свойств бетона. В то же время в строительном материаловедении известны многочисленные работы, связанные с изучением влияния суперпластификаторов на свойства бетонных смесей и бетонов, их структурообразование и процессы гидратации портландцемента. Однако недостаточно исследований, посвященных изучению структурированию цементной матрицы бетона в комплексном присутствии суперпластификатора и многослойных углеродных нанотрубок.

Целью данной работы является изучение влияния вводимой в состав бетона пластифицирующей добавки на основе наноструктурированного углерода на технологические свойства и характеристики бетонных смесей: подвижность, сохраняемость удобоукладываемости, а также физико-механические свойства тяжелого бетона.

**Методика экспериментальных исследований.** Оценку эффективности действия добавки на основе наноструктурированного углерода проводили при получении бетона, состав которого, представлен в таблице 4.

Таблица 4. – Расход материалов, кг на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси

Наименование материала	Цемент	Щебень фр.5-20мм	Песок	Вода
Расход, кг	400	1020	820	200

С целью установления влияния добавки «АРТ-КОНКРИТ Р» на технологические свойства бетонных смесей, были подобраны оптимальные дозировки данной добавки, которые представлены в таблицах 5 и 6. Образцы Составов 1.1-1.4 должны соответствовать классу бетона по прочности на сжатие С20/25, марки по водонепроницаемости W6, марке по морозостойкости F 100; удобоукладываемости бетонной смеси (по осадке конуса) П4-П5 и сохраняемости бетонной смеси 90 мин. Образцы Составов 1.5 и 1.6 имеют отличие в удобоукладываемости бетонной смеси, данные смеси являются жесткими. В исследованных составах варьировались следующие параметры:

- удобоукладываемость (П1, П4-П5);
- количество добавки (0,6% и 0,8% от массы цемента);
- расход цемента (400 кг/м<sup>3</sup>; 360 кг/м<sup>3</sup>).

Таблица 5. – Опытные образцы составов 1.1–1.4 (подвижная смесь)

Наименование объекта испытаний, показатели, технические требования	№ состава	Показатель удобоукладываемости	Наименование состава
В25 (С20/25) W6 F100	1.1	П4-П5 (ОК=16-20; 21-25 см)	Контрольный (бездобавочный, удобоукладываемость П4-П5)
	1.2		R 0,8% (с содержанием добавки в количестве 0,8% от массы цемента )
	1.3		R *0,8%- Ц*10%(с содержанием добавки в количестве 0,8% от массы цемента – 10% цемента )
	1.4		R 0,6% (с содержанием добавки в количестве 0,6% от массы цемента)

Таблица 6. – Опытные образцы составов 1.5-1.6 (жесткая смесь)

B25 (C20/25) W6 F100	1.5	П1 (ОК=1-4 см)	Контрольный 2 (бездобавочный, удобоукладываемость П1)
	1.6		R 0,8% П1 (с содержанием добавки в количестве 0,8% от массы цемента, удобоукладываемостью П1)

\*В данной таблице буква «R» – пластифицирующая добавка «АРТ-КОНКРИТ Р», «Ц» – цемент.

**Сравнительный анализ.** Для Составов 1.1-1.4. были исследованы технологические характеристики, такие как подвижность и сохраняемость удобоукладываемости, результаты которых представлены в таблице 7. Для определения характеристик применялись стандартные методы испытания, изложенные в соответствующих нормативных документах.

Таблица 7. – Результаты испытаний бетонной смеси составов 1.1-1.4

Показатели свойств бетонной смеси	Значение показателей			
	Контрольный	R 0,8 %	R 0,8% – Ц10%	R 0,6%
Водоцементное отношение	0,5	0,3	0,29	0,45
Расход вяжущего, кг/ м3	400	400	360	400
Подвижность бетонной смеси, ОК, см	22	23	23	20
Марка по удобоукладываемости	П4-П5	П4-П5	П4-П5	П4-П5
Сохраняемость удобоукладываемости, ч	0,5	3	2	1,5
Средняя плотность бетонной смеси, кг/м3	2367	2250	2215	2256

Исследование влияния пластифицирующей добавки «АРТ-КОНКРИТ Р» на технологические свойства и характеристики бетонных смесей позволили сделать следующие выводы:

1. Сохраняемость удобоукладываемости зависит от количества вводимой добавки «АРТ-КОНКРИТ Р», минимальное количество которой составляет 0,6%, при котором обеспечивается требуемая сохраняемость бетонной смеси в 90 мин;
2. Введение пластифицирующей добавки «АРТ-КОНКРИТ Р», позволяет снизить водоцементное отношение (до В/Ц=0,3), не ухудшая технологические свойства смеси.

С целью всестороннего изучения влияния пластифицирующей добавки на свойства тяжелого бетона B25 (C20/25) W6 F100 для Составов 1.1-1.6 была определена прочность на сжатие в возрасте 7 и 28 суток (табл. 8, рис. 1, 2).

Анализ кинетики набора прочности свидетельствует, что образцы всех Составов 1.1–1.6 в возрасте 28 суток соответствуют классу B25 (C20/25).

Для подвижных смесей рис. 3 (удобоукладываемость П4-П5) модифицирование пластифицирующей добавкой «АРТ-КОНКРИТ Р» позволило увеличить прочность при сжатии ( $f_c$ ) в возрасте 28 суток по сравнению с бездобавочным составом соответственно: для Состава 1.2 – на 5%(51,9 МПа); для Состава 1.3 – на 3% (51,1 МПа); для Состава 1.4 – на 17%(57,8 МПа), при этом произошло ускорение набора прочности к 7 суткам хранения на 34-58% по сравнению с контрольным составом.

Зафиксировано оптимальное количество добавки «АРТ-КОНКРИТ Р» – 0,6% от массы цемента.

Таблица 8. – Результаты испытаний образцов бетона составов 1.1–1.6

Наименование состава / номер состава	Расход материалов, кг на 1 м3 бетонной смеси						Вода, кг	В/Ц	ОК, см	Прочность на сжатие, фс, МПа	
	Цемент, кг	Песок, кг	Щебень, кг	Добавка «АРТ-КОНКРИТ Р»		7 суток				28 суток	
				%	кг						
B25 (C20/25) W6 F100	1.1	400	820	1020	-	-	200	0,50	22	25,2	49,2
	1.2	400	820	1020	0,8	3,2	120	0,30	23	35,7	51,9
	1.3	360	820	1020	0,8	3,2	105	0,29	23	33,9	51,1
	1.4	400	820	1020	0,6	2,4	180	0,45	20	39,9	57,8
	1.5	400	820	1020	-	-	155	0,39	2	46,8	59,5
	1.6	400	820	1020	0,8	3,2	110	0,28	3	57,7	64,7

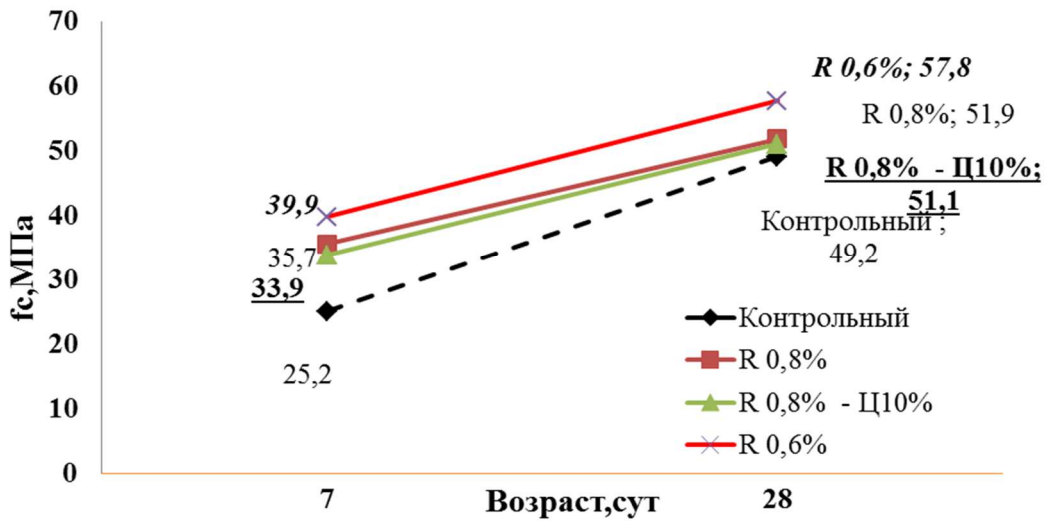


Рисунок 1. – Кинетика набора прочности бетона составов 1.1–1.4

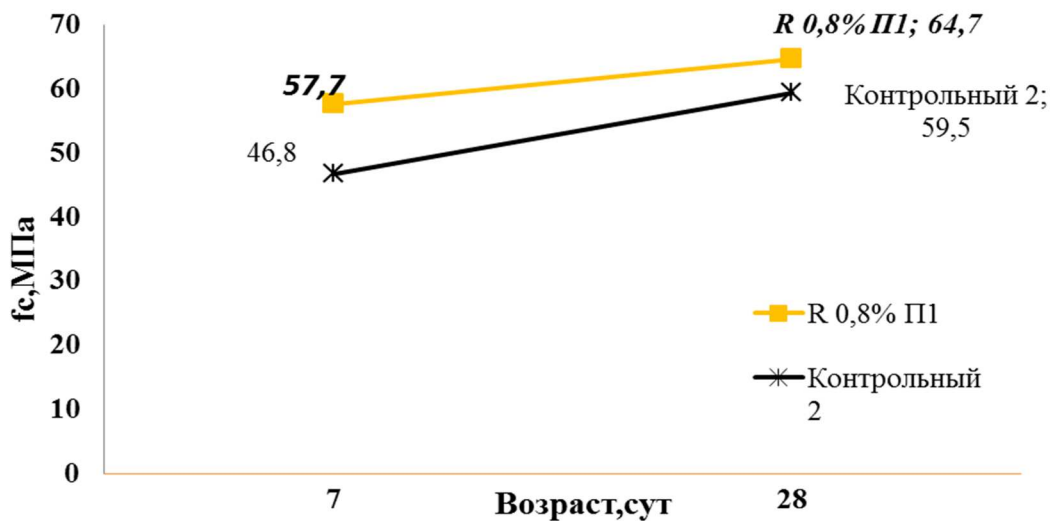


Рисунок 2. – Кинетика набора прочности бетона составов 1.5–1.6

Для жестких смесей рис. 4 (удобоукладываемость П1) модифицирование позволило достичь прочности на сжатие в возрасте: 7 суток равное 57,7 МПа; 28 суток - 64,7 МПа; что выше прочности контрольного образца на 23% и 8% соответственно.

На основании результатов технологических свойств бетонной смеси для Состава 1.2 были изготовлены образцы бетона для следующих видов испытаний:

- определения прочности бетона на осевое растяжение в возрасте 28 суток  $f_{ct}$ ;
- определения марки по морозостойкости F;
- определения марки по водонепроницаемости W;
- определения водопоглощения по массе  $W_m$ .

Определение прочности на осевое растяжение. Для определения прочности на осевое растяжение бетонных образцов, модифицированных добавкой «АРТ-КОНКРИТ Р» были изготовлены образцы призмы квадратного сечения размерами 70x70x280 мм. По результатам испытаний прочность бетона на осевое значение в серии образцов составила 2,85 МПа, что превышает требуемую прочность при подборе состава более 25%.

Определение морозостойкости. Для определения соответствия бетона Состава 1.2 предъявляемой марки по морозостойкости, был использован ускоренный метод определения морозостойкости при многократном замораживании и оттаивании в растворе соли по ГОСТ 10060.2-95. По итогам испытаний можно сделать вывод, что марка по морозостойкости соответствует предъявляемым требованиям, причем потеря прочности составляет 0,7% при нормированной потере прочности в 5%. Данные сведения говорят о более высокой марке по морозостойкости, чем F 100.

Определение водонепроницаемости. Водонепроницаемость бетонных образцов определялась на цилиндрах диаметром 150 мм и высотой 150 мм. Для определения марки по водонепроницаемости использовался косвенный метод при помощи устройства для ускоренного определения водонепроницаемости АГАМА -2 РМ по ГОСТ 12730.5-84 (таблица 9).

Таблица 9. – Определение водонепроницаемости косвенным методом

Наименование объекта испытаний	Нормированные значения показателей, установленных в ТНПА	Фактическое значение показателей для каждого образца, сек.				Вывод о соответствии требованиям ТНПА
		1 2	3 4	5 6	Ср. (3 и 4)	
Состав 1.2	W6 (6,6 -9,4 с/см <sup>3</sup> )	17,0 60,4	64,3 127,4	130,2 130,2	95,8	Соотв. W6

После проведения испытания косвенным методом, выяснилось, что образцы Состава 1.2 соответствуют марке по водонепроницаемости W20, что значительно превышает требуемый параметр W6.

Определение водопоглощения. Водопоглощение бетона отдельного образца по массе составил:  $W_m=2,1\%$ .

**Заключение.** Установлен оптимальный процент ввода добавки «АРТ-КОНКРИТ Р» для исследуемого состава, который обеспечивает необходимые технологические свойства бетонной смеси и физико - механические характеристики бетона - 0,8%.

Для бетона, модифицированного пластифицирующей добавкой:

– подвижных смесей (удобоукладываемость П4-П5) модифицирование позволило увеличить прочность при сжатии в возрасте 28 суток по сравнению с бездобавочным составом на 17% (57,8 МПа).

– жестких смесей (удобоукладываемость П1) - прочность на сжатие составила в возрасте: 7 суток  $f_c=57,7$  МПа, 28 суток - 64,7 МПа, что выше прочности контрольного образца на 23% и 8% соответственно;

Прочность на осевое растяжение составила  $f_{ct}=2,85$  МПа, марка по водонепроницаемости соответствует W20, марка по морозостойкости более F100 с потерей прочности в 0,7%.

Обосновано улучшение технологических свойств за счет применения пластифицирующей добавки на основе наноструктурированного углерода, которые формируют кристаллогидратные новообразования, что способствует повышению степени гидратации цемента, тем самым способствуя уплотнению структуры цементной матрицы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дисперсии многослойных углеродных нанотрубок в строительном материаловедении / Б.М. Хрусталева [и др.] // Наука и техника. – 2014. – № 1. – С. 44–52.
2. Влияние многослойных углеродных нанотрубок на модуль упругости и микротвердость цементной матрицы / Г.И. Яковлев [и др.] // Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение : сб. материалов III Всерос. науч.-практ. конф.. – Якутск, 2014. – С. 387–393.
3. Установка для получения углеродных наноматериалов : МПК В82В 3/00 // С.А. Жданок, А.В. Крауклис, П.П. Самцов, В.М. Волжанкин ; дата публ. 30.06.2006.
4. Нанотехнологии в строительном материаловедении: реальность и перспективы / С.А. Жданок [и др.] // Вестник БНТУ. – 2009. – № 3. – С. 5–22.
5. Study of the influence of nano-size additives on the mechanical behaviour of cement stone / S. Zhdanok [and etc] // Наука и техника. – 2009. – № 1. – С. 52–55.
6. Method of obtaining of carbon nanomaterial : МПК SO1B31/00 / S.A. Zhdanok, A.P. Solntsev, A.V. Krauklis ; published 31.03.2005.
7. Characterization of the influence of carbon nanomaterials on the mechanical behavior of cement stone / J. Eberhardsteiner [and etc] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2011. – Vol. 84. – N. 4. – P. 697–704.