

УДК 624.012.4

© С. А. Жданок, д-р физ.-мат. наук, профессор,
академик НАН Беларуси
(ООО «Передовые исследования и технологии»)

E-mail: ceo@art-pte.com

© Е. Н. Полонина, аспирант

© С. Н. Леонович, д-р техн. наук, профессор,
иностраный академик РААСН

© Б. М. Хрусталеv, д-р техн. наук, профессор,
академик НАН Беларуси

© Е. А. Коледа, аспирант

(Белорусский национальный технический
университет)

E-mail: grushevskay_en@tut.by, sleonovich@mail.ru,

tg_v_fes@bntu.by, elena_koleda@bk.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-6-76-85

© S. A. Zhdanok, Dr. Sci. Phys.-Math., Professor,
Academician of the National Academy of Sciences of Belarus
(JSC «Advanced Research and Technology»)

E-mail: ceo@art-pte.com

© E. N. Polonina, post-graduate student

© S. N. Leonovich, Dr. Sci. Tech., Professor, Foreign
Academician of RAACS

© B. M. Khrustalev, Dr. Sci. Tech., Professor, Academician
of the National Academy of Sciences of Belarus

© E. A. Koleda, post-graduate student

(Belarusian National Technical University)

E-mail: grushevskay_en@tut.by, sleonovich@mail.ru,

tg_v_fes@bntu.by, elena_koleda@bk.ru

ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИФИЦИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ, СОДЕРЖАЩЕЙ УГЛЕРОДНЫЙ НАНОМАТЕРИАЛ, НА СВОЙСТВА САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА

THE INFLUENCE OF THE PLASTICIZING ADDITIVE CONTAINING CARBON NANOMATERIAL ON THE PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE

Представлены результаты исследований влияния пластифицирующей добавки «АРТ-КОНКРИТ Р», содержащей углеродный наноматериал и суперпластификатор, на свойства самоуплотняющегося бетона класса С25/30. Установлен оптимальный процент содержания добавки в бетонных смесях для обеспечения необходимых технологических свойств и физико-механических характеристик бетона.

Ключевые слова: долговечность, углеродный наноматериал, технологические свойства, удобоукладываемость, сохраняемость, воздухововлечение, прочностные характеристики.

The paper presents the results of the study of the effect of the «ART-CONCRETE R» plasticizing additive containing carbon nanomaterial and super-plasticizer on the properties of self-compacting concrete of the C25/30 class. There has been determined the optimal percentage of the additive content in concrete mixtures to ensure the necessary technological properties and physical and mechanical characteristics of concrete.

Keywords: durability, carbon nanomaterial, technological properties, workability, storage characteristics, air entraining, strength characteristics.

Комплексные модификаторы структуры и свойств бетонов нового поколения, получаемые с использованием нанотехнологий, в 1,5–2 раза более эффективны по сравнению с традиционными материалами. С использованием наносистем проще и доступнее получить самоуплотняющиеся и литые бетонные смеси, а также бетоны со специальными свойствами [1–3].

При разработке составов цементных бетонов с улучшенными механическими свойствами рационально использовать в качестве модифицирующих добавок углеродные нанодисперсные

системы [4–6]. Структурирование вяжущих матриц углеродными нанотрубками показало высокую эффективность модификации, которая отражена в публикациях разных авторов [7–9]. А получение самоуплотняющегося бетона с улучшенными технологическими характеристиками невозможно без применения пластификатора. Суперпластификаторы относятся к поверхностно-активным веществам, поэтому основным свойством является способность их молекул адсорбироваться на поверхности цементных частиц, что приводит к торможению

гидратационного процесса и увеличению сроков схватывания цементного теста и бетона [10].

Рассмотрим влияние вводимой в состав бетона пластифицирующей добавки «АРТ-КОНКРИТ Р» на технологические свойства и характеристики бетонных смесей: подвижность, сохраняемость удобоукладываемости, проходимость бетонной смеси (проверяется при помощи L-образного ящика), стойкость бетонной смеси к расслоению (ситовой анализ), вязкость бетонной смеси по времени; а также физико-механические свойства тяжелого бетона.

Пластифицирующая добавка для бетонной смеси «АРТ-КОНКРИТ Р» включает в себя суперпластификатор на поликарбоксилатной основе и углеродный наноматериал (УНМ). Углеродный наноматериал получают в плазме высоковольтного разряда атмосферного давления при оптимальном составе газовой смеси CH_4 : воздух = 1 : 2,4...2,5 с последующей химической обработкой, что обеспечивает существенное повышение выхода УНМ и снижение содержания аморфного углерода в итоговом материале. После химической очистки углеродный наноматериал содержит не более 1,3 % металла (в основном включенного в наночастицы) и не более 5 % аморфного углерода [11–14].

Приготовление пластифицирующей добавки для бетонной смеси заключается в измельчении и смешивании наноуглеродного материала и пластификатора в смесителе в течение нескольких минут. В данном случае частицы наноуглеродного материала «адсорбируются» и удерживаются электростатически на поверхности частиц ускоряющего компонента и при его растворении в воде затворения равномерно распределяются в ее объеме и, следовательно, в объеме приготавли-

ваемой бетонной смеси. Одновременно молекулы вещества добавки-пластификатора (кроме основной функции в бетоне) способствуют стабилизации водной суспензии вещества УНМ.

Характеристики материалов для исследований

В качестве вяжущего вещества в наших исследованиях использован портландцемент марки ПЦ 500-Д0 (Д20) по ГОСТ 10178–85 ОАО «Красносельскстройматериалы» активностью $R_{\text{ц}} = 34,1$ МПа с нормальной плотностью цементного теста 25,75 %.

Мелкий заполнитель — песок природный по ГОСТ 8736–93, модуль крупности $M_{\text{к}} = 1,95$ ед., насыпная плотность $\rho_{\text{н}} = 1600$ кг/м³, истинная плотность $\rho_{\text{и}} < 2800$ кг/м³.

Крупный заполнитель — щебень гранитный фракции 5–10 мм насыпной плотностью $\rho_{\text{н}} = 1380$ кг/м³.

Вода для затворения и последующего твердения бетона соответствует требованиям СТБ 1114–98 и ГОСТ 23732–2011.

Пластифицирующая добавка «АРТ-КОНКРИТ Р» — добавка в бетон с суперпластификатором на поликарбоксилатной основе и углеродным наноматериалом в соотношении 100 : 0,09...0,11 и характеристиками, приведенными в табл. 1.

Методика экспериментальных исследований

С целью установления влияния добавки «АРТ-КОНКРИТ Р» на технологические свойства бетонных смесей и на свойства тяжелого бетона нами были подобраны оптимальные дозировки данной добавки. В исследованных составах варьировались следующие параметры:

- показатель удобоукладываемости (П1, Р4–Р5);
- количество добавки (0,6 и 0,8 % от массы цемента).

Таблица 1

Характеристики пластифицирующей добавки «АРТ-КОНКРИТ Р»

Наименование показателя	Норма показателя для марки «АРТ-КОНКРИТ Р»
1. Внешний вид	Непрозрачная однородная жидкость от темно-коричневого до черного цвета
2. Массовая доля сухого остатка, %, не менее	37
3. Плотность, г/см ³	1,1 ± 0,1
4. Водородный показатель рН 15%-ного водного раствора при 20 °С	7,0 ± 1
5. Содержание хлор-ионов, %, не более	0,05

Состав композиции и результаты испытаний приведены в табл. 2, 3 и на рис. 1–3.

Нами было произведено пять лабораторных замесов, объем одного замеса составил 7 л. Загрузка лабораторной бетономешалки происходила в следующей очередности: крупный и мелкий заполнители, цемент. Далее происходило перемешивание сухих компонентов до однородной массы. Вода вводилась в смесь двумя этапами: на 1-м этапе вместе с водой было добавлено необходимое количество добавки, а на 2-м этапе — оставшееся количество воды для получения подвижности P4–P5 (составы 1.1–1.3) или П1 (составы 1.4 и 1.5).

После чего исследовались технологические характеристики бетонной смеси, такие как подвижность и сохраняемость удобоукладываемости (рис. 1), а также проходимость бетонной смеси с применением L-образного ящика (рис. 2), стойкость бетонной смеси к расслоению методом ситового анализа (рис. 3), вязкость бетонной смеси по времени.

Результаты влияния пластифицирующей добавки «АРТ-КОНКРИТ Р» на технологические свойства и характеристики бетонных смесей составов 1.1–1.3 представлены в табл. 3.

По результатам данного эксперимента — исследования влияния пластифицирующей добавки «АРТ-КОНКРИТ Р» на технологические свойства и характеристики бетонных смесей — авторы сделали следующие выводы:

1. Сохраняемость удобоукладываемости составила 120 мин.
2. Произошло снижение водоцементного отношения от 0,6 до 0,4.



Рис. 1. Определение удобоукладываемости бетонной смеси по расплыву конуса



Рис. 2. Определение проходимости бетонной смеси с применением L-образного ящика

3. Проходимость бетонной смеси при испытании в L-образном коробе соответствует вязкости VS 2 и стойкости бетонной смеси к расслоению — показателю SR 1.

Таблица 2

Результаты испытаний образцов бетона составов 1.1–1.5

Наименование состава / № состава	Расход материалов, кг на 1 м ³ бетонной смеси						Вода, кг	В/Ц	Подвижность бетонной смеси РК, см	Прочность на сжатие f_c , МПа	
	Цемент, кг	Песок, кг	Щебень, кг	Пластифицирующая добавка «АРТ-КОНКРИТ Р»		7 суток				28 суток	
				%	кг						
В30 (С25/30) W8 F200 СУБ	1.1	460	950	880	—	—	290	0,63	58	19,9	29,7
	1.2	460	950	880	0,8	3,68	160	0,35	60	27,3	35,3
	1.3	460	950	880	0,6	2,76	165	0,36	57	34,6	42,0
	1.4	460	950	880	—	—	195	0,42	3	40,2	50,3
	1.5	460	950	880	0,8	3,68	125	0,27	3	52,2	63,2

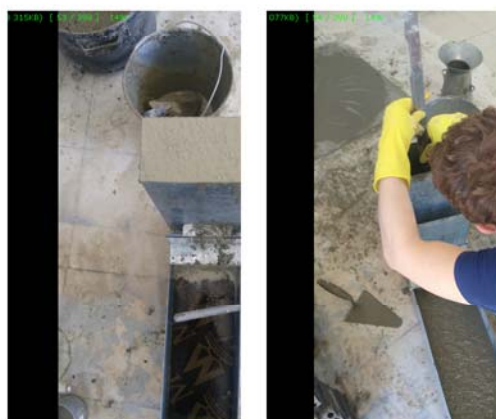


Рис. 3. Определение стойкости бетонной смеси к расслоению методом ситового анализа

4. Зафиксировано уменьшение объемной массы образцов, возможно, связанное с повышением воздуховлечения бетонной смеси при перемешивании, а в случае с пластифицирующей добавкой — из-за введения суперпластификатора, механизм действия которого описан в статье [15].

Анализ кинетики набора прочности (рис. 4, 5) свидетельствует, что образцы составов 1.1–1.5 в возрасте 28 суток соответствуют классу С 25/30.

Для самоуплотняющихся смесей составов 1.1–1.3 (удобоукладываемость Р4–Р5) модифицирование пластифицирующей добавкой «АРТ-КОНКРИТ Р» позволило увеличить прочность при сжатии f_c в возрасте 28 суток для состава 1.4 на 41 % (42,0 МПа) по сравнению с бездобавочным составом.

Для подвижных смесей составов 1.4–1.5 (удобоукладываемость П1) модифицирование пластифицирующей добавкой «АРТ-КОНКРИТ Р» позволило достичь прочности на сжатие в возрасте 7 суток, равной 52,2 МПа; 28 суток — 63,2 МПа, что выше прочности контрольного образца на 29 и 25 % соответственно.

По результатам наших испытаний видно, что прочность образцов на сжатие возрастает при уменьшении количества вводимой добавки, очевидно, это связано с двумя причинами, действующими одновременно с отмеченными положительными эффектами. Во-первых, углеродный наноматериал — гидрофобное вещество и, несмотря на контакт с водой, в затвердевшем

Таблица 3

Результаты испытаний бетонной смеси составов 1.1–1.3

Показатели свойств бетонной смеси	Значения показателей составов		
	1.1	1.2	1.3
Водоцементное отношение	0,63	0,38	0,39
Расход вяжущего, кг/м ³	460	460	460
Подвижность бетонной смеси РК, см	59	59	58
Марка по удобоукладываемости	Р4–Р5		
Сохраняемость удобоукладываемости, ч	1	2	2
Средняя плотность бетонной смеси, кг/м ³	2280	2380	2225
Вязкость бетонной смеси по времени Т500, с	1,27	2,0	1,5
Пройодимость бетонной смеси испытанием в L-образном коробе	0,71	0,64	0,65
Стойкость бетонной смеси к расслоению, %	7,43	6,0	2,8

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 углеродных наноматериалов, что в совокупности (с превышением дозировки) понижает их эффективность.

В связи с вышеизложенным было принято решение провести те же испытания, но с меньшим количеством пластифицирующей добавки.

Было произведено три лабораторных замеса с содержанием пластифицирующей добавки «АРТ-КОНКРИТ Р» в количестве 0,8, 0,6 и 0,5 % (состав 1.6) от массы цемента. Полученные результаты представлены в табл. 4.

При сравнении свойств изготовленных бетонных смесей состав, содержащий пластифицирующую добавку «АРТ-КОНКРИТ Р» в количестве 0,5 % от массы цемента, более предпочтителен, чем другие составы, по показателю

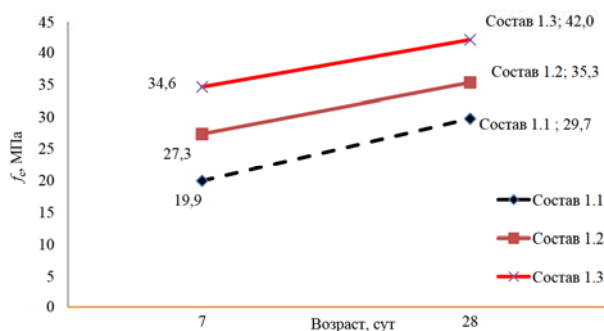


Рис. 4. Кинетика набора прочности бетона составов 1.1–1.3

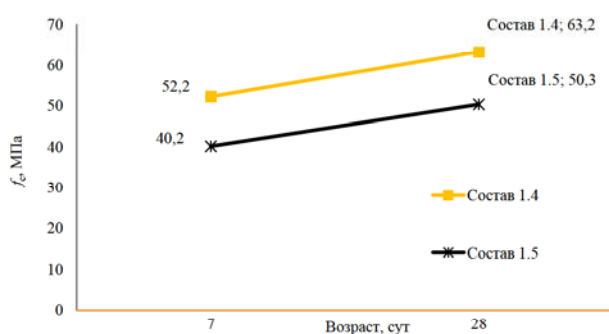


Рис. 5. Кинетика набора прочности бетона составов 1.4–1.5

плотности, значению расслаиваемости и расходу добавки. При данном содержании добавки бетонная смесь однородна, легко поддается формованию, водоотделение отсутствует.

Следовательно, состав 1.6 (табл. 5), содержащий пластифицирующую добавку «АРТ-КОНКРИТ Р» в количестве 0,5 % от массы цемента, был выбран нами для проведения следующих видов испытаний:

- определение прочности бетона на сжатие f_c в возрасте 7 и 28 суток;
- определение прочности бетона на осевое растяжение f_{ct} в возрасте 28 суток;
- определение марки по морозостойкости F ;
- определение марки по водонепроницаемости W ;
- определение водопоглощения по массе W_m .

Результаты испытаний представлены в табл. 5–7.

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 70×70×280 мм. По результатам испытаний прочность бетона на осевое значение образцов из состава 1.6 равна 1,77 МПа.

Определение морозостойкости

Для определения соответствия бетона состава 1.6 предъявляемой марке по морозостойкости был использован ускоренный метод (третий) определения морозостойкости при многократном замораживании в 5%-ном водном растворе хлорида натрия при температуре (-50 ± 2) °С по ГОСТ 10060–2012. Результаты испытаний представлены в табл. 6.

По итогам испытаний сделан вывод, что марка по морозостойкости соответствует F200.

Определение водонепроницаемости

Водонепроницаемость бетонных образцов определялась на цилиндрах диаметром 150 мм и высотой 150 мм. Для определения марки по водонепроницаемости использовался прямой метод при помощи установки для определения водонепроницаемости УВБ-МГ4. После проведения испытания выяснилось, что образцы состава 1.6 соответствуют марке по водонепроницаемости W8.

Определение водопоглощения

Таблица 4

Свойства бетонной смеси

Показатели свойств бетонной смеси	Значения показателей составов		
	1.2	1.3	1.6
Водоцементное отношение	0,42	0,35	0,3
Расход вяжущего, кг/м ³	460		
Подвижность бетонной смеси РК, см	58	60	55
Марка по удобоукладываемости	P4–P5		
Сохраняемость удобоукладываемости, мин	120		
Средняя плотность бетонной смеси, кг/м ³	2255	2025	2338
Вязкость бетонной смеси по времени T500, с	2,0	1,5	1,5
Проходимость бетонной смеси испытанием в L-образном коробе	0,74	0,65	0,6
Стойкость бетонной смеси к расслоению, %	7,0	2,0	2,0

Таблица 5

Состав бетона и прочность на сжатие

Наименование состава	Расход материалов, кг на 1 м ³ бетонной смеси					Прочность на сжатие f_c , МПа		
	Цемент, кг	Песок, кг	Щебень, кг	Добавка «АРТ-КОНКРИТ Р»		7 суток	28 суток	
				%	кг			
Состав 1.6	460	950	880	0,5	2,3	130	29,2	39,2

Для определения водопоглощения образцы помещали в емкость с водой, так чтобы уровень воды в емкости был выше верхнего уровня уложенных образцов примерно на 50 мм. После чего образцы взвешивали через каждые 24 ч водопоглощения на гидростатических весах. Испытание проводилось до тех пор, пока результаты двух последовательных взвешиваний не перестали отличаться более чем на 0,1 %. Водопоглощение бетона по массе составило $W_m = 3,5$ %.

Определение показателей пористости бетонов по кинетике их водопоглощения

Кинетика водопоглощения бетона характеризуется приращением его массы во времени по ГОСТ 12730.4–78. Кривые водопоглощения выражаются уравнением

$$W_t = W_m \left[1 - e^{-(\bar{\lambda}t)^\alpha} \right], \quad (1)$$

где W_t — водопоглощение образца за время t , % по массе; W_m — водопоглощение образца, % по массе; e — основание натурального логарифма, равное 2,718; $\bar{\lambda}$ — показатель среднего размера открытых капиллярных пор, равный пределу отношений ускорения процесса водопоглощения к его скорости; t — время водопоглощения, ч; α — показатель однородности размеров открытых капиллярных пор.

Кинетику водопоглощения определяли путем непрерывного (рис. 6) и дискретного (табл. 7) взвешивания предварительно высушенных образцов в процессе их водопоглощения.

Таблица 6

Результаты испытания определения морозостойкости

Контрольные образцы						
№ образцов	7	8	9	10	11	12
Масса насыщенного образца, г	2342	2322	2349	2330	2329	2244
Прочность при сжатии насыщенных образцов, МПа	40,1	39,0	38,5	38,6	39,2	40,1
Средняя прочность при сжатии насыщенных образцов в серии, МПа	38,9					
Нижняя граница доверительного интервала $0,9x'_{\min}$	33,7					
Основные образцы						
№ образцов	1	2	3	4	5	6
Масса насыщенного образца, г	2336	2328	2342	2321	2319	2338
Масса образца после замораживания, г	2342	2332	2348	2326	2324	2341
Среднее уменьшение массы образцов, %	Нормируемое			Фактическое		
	Не более 2			0		
Прочность при сжатии, МПа	41,4	36,1	34,1	39,0	41,0	35,6
Средняя прочность при сжатии образцов в серии, МПа	41,2					
Нижняя граница доверительного интервала x''_{\min} , МПа	33,7					
Шелушение, трещины, сколы	Отсутствуют					
Соотношение нижних границ доверительных интервалов	Нормируемое			Фактическое		
	$x''_{\min} \geq 0,9x'_{\min}$			33,7 = 33,7		
Вывод о соответствии	Соответствует F200					

Таким образом, показатели среднего размера пор $\bar{\lambda}$ и однородности размера пор в бетоне α , определенные по кинетике водопоглощения путем непрерывного и дискретного взвешивания, для образцов состава 1.6 равны $\bar{\lambda} = 1,1$ и $\alpha = 0,5$.

Следовательно, объем открытых капиллярных пор бетона в серии образцов равен

$$\Pi_0 = W_0 = 4,95 \% \quad (2)$$

Сравнительный анализ

Оценку эффективности действия пластифицирующей добавки «АРТ-КОНКРИТ Р», содержащей углеродный наноматериал и суперпластификатор, мы проводили при сравнении прочностных характеристик с добавкой аналогичного

класса эффективности «Динамикс ПК». Составы и полученные результаты представлены в табл. 8.

Очевидно, что состав бетона, содержащий суперпластификатор «Динамикс ПК», не эффективен по прочностному показателю. Отсюда мы сделали вывод, что именно наноструктуры в добавке привели к таким эффектам.

Заключение

Установлен оптимальный процент ввода пластифицирующей добавки «АРТ-КОНКРИТ Р», содержащей углеродный наноматериал и суперпластификатор, который обеспечивает необходимые технологические свойства бетонной смеси и физико-механические характеристики бетона — 0,5 %.

Для самоуплотняющегося бетона, модифицированного пластифицирующей добавкой, прочность на сжатие составила $f_c = 39,2$ МПа, на осевое растяжение $f_{ct} = 1,77$ МПа; марка по водонепроницаемости — W8, по морозостойкости — F200.

Анализ кинетики набора прочности свидетельствует о следующем:

Таблица 7

Кинетика водопоглощения путем дискретного взвешивания (состав 1.6)

$t, \text{ч}$	0	0,25	1,0	24,0
Q_t^c	2256	2290	2310	2337
Q_t^b	—	—	—	704

Q_t^c, Q_t^b — массы гидростатически взвешенных сухого и водонасыщенного образцов бетона, г.

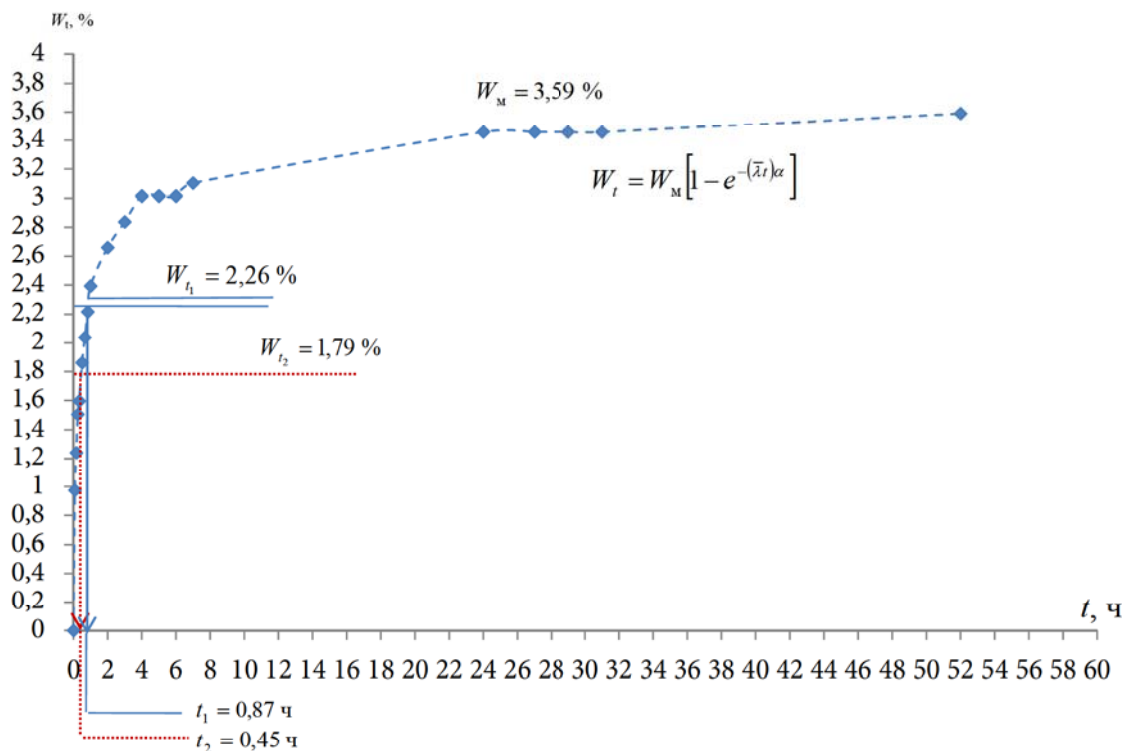


Рис. 6. Номограмма параметров пористости по кинетике насыщения материала жидкостью (непрерывный метод)

Результаты испытаний образцов бетона составов 1.6 и 1.7

Наименование состава / номер состава	Расход материалов, кг на 1 м ³ бетонной смеси								Вода, кг	В/Ц	Подвижность бетонной смеси РК, см	Прочность на сжатие f_c , МПа	
	Цемент, кг	Песок, кг	Щебень, кг	Пластифицирующая добавка «АРТ-КОНКРИТ Р»		Добавка «Динамикс ПК»		7 суток				28 суток	
				%	кг	%	кг						
V30 (C25/30)	1.6	460	950	880	0,5	2,3	—	—	130	0,3	55	29,2	39,2
W8 F200 СУБ	1.7	460	950	880	—	—	1,0	4,6	170	0,37	58	—	31,5

• Для самоуплотняющихся смесей (удобукладываемость P4–P5) прочность при сжатии в возрасте 28 суток возросла на 41 % (42,0 МПа) по сравнению с бездобавочным составом.

• Для подвижных смесей модифицирование позволило достичь прочности на сжатие в возрасте 7 суток, равной 52,2 МПа; 28 суток — 63,2 МПа, что выше прочности контрольного образца на 29 и 25 % соответственно.

Таким образом, полученные результаты говорят о том, что используется высокий уровень энергии поверхности частиц углеродного наноматериала, которые служат центрами кристаллизации, ускоряя процесс образования кристаллогидратных новообразований и обеспечивая повышение темпа роста прочности цементного камня. Из этого следует, что введение пластифицирующей добавки, содержащей углеродный наноматериал и суперпластификатор, в состав самоуплотняющейся бетонной смеси позволяет улучшить технологические свойства бетонной смеси и физико-механические свойства бетона.

Библиографический список

1. Баженов Ю. М. Использование наносистем в строительном материаловедении // Вопросы применения нанотехнологий в строительстве: сб. докл. участников круглого стола. М.: МГСУ, 2009. С. 4–8.

2. Гритель Г. Б., Глазкова С. В. Перспективы наноструктурированного бетона в строительстве // Бетон и железобетон. 2011. № 6. С. 40–44.

3. Дятлов А. К., Харченко А. И., Баженов М. И., Харченко И. Я. Композиционное вяжущее для мелко-

зернистых самоуплотняющихся бетонов // Технология бетонов. 2013. № 3. С. 40–43.

4. Пудов И. А., Пислегина А. В., Лушникова А. А., Первушин Г. Н., Яковлев Г. И., Хасанов О. Л., Тулаганов А. А. Проблемы диспергации углеродных нанотрубок при модификации цементных бетонов // Сб. тр. II междунар. конф. «Нанотехнологии для экологичного и долговечного строительства». Ижевск, 2010. С. 34–38.

5. Леонович С. Н., Карпова Е. А., Лахайн О., Полянских И. С., Пудов И. А., Скрипкина Г., Хрусталева Б. М., Эберхардитайнер Й., Яковлев Г. И. Структурная модификация новообразований в цементной матрице с использованием дисперсии углеродных нанотрубок и нанокремнезема // Наука и техника. 2017. Т. 16. № 2. С. 94–103.

6. Хрусталева Б. М., Леонович С. Н., Якимович Б. А., Яковлев Г. И., Первушин Г. Н., Полянских И. С., Пудов И. А., Хазеев Д. Р., Шайбадуллина А. В., Гордина А. Ф., Али Э. С. М., Керене Я. Дисперсии многослойных углеродных нанотрубок в строительном материаловедении // Наука и техника. 2014. № 1. С. 44–52.

7. Урханова Л. А., Хардаев П. К., Лхасаранов С. А. Модифицирование цементных бетонов нанодисперсными добавками // Строительство и реконструкция. 2015. № 3. С. 167–175.

8. Мазов И. Н., Бурмистров И. Н., Бурмистров И. Н., Ильиных И. А., Мазов И. Н., Кузнецов Д. В., Юдинцева Т. И., Кусков К. В. Физико-механические свойства композитных бетонов, модифицированных углеродными нанотрубками // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5.

9. Шейда О. Ю., Батяновский Э. И. О производственной апробации новой химической добавки, содержащей углеродный наноматериал // Современные проблемы внедрения европейских стандартов в области строительства: сб. Междунар. науч.-техн. ста-

тей (материалы науч.-метод. конф.), 27–28 мая 2014 г. В 2 ч. Ч. 2 / ред. колл.: В. Ф. Зверев, С. М. Коледа, С. Н. Делендик. Минск: БНТУ, 2015. С. 7–19.

10. Камалова З. А., Рахимов Р. З., Ермилова Е. Ю., Стоянов О. В. Суперпластификаторы в технологии изготовления тяжелого бетона // Вестник Казанского технологич. ун-та. 2013. Т. 16. № 8. С. 148–152.

11. Патент 2839 Республика Беларусь, МПК В82В 3/00. Установка для получения углеродных наноматериалов / В. М. Волжанкин, А. В. Крауклис, С. А. Жданок, П. П. Самцов. № 20050647; заявл. 25.10.2005; опубл. 30.06.2006.

12. Жданок С. А., Хрусталева Б. М., Батяновский Э. И., Леонович С. Н. Нанотехнологии в строительном материаловедении: реальность и перспективы // Вестник БНТУ. 2009. № 3. С. 5–22.

13. Эберхардштайнер Й., Жданок С., Хрусталева Б., Батяновский Э., Леонович С., Самцов П. Изучение влияния наноразмерных добавок на механическое поведение цементных блоков // Наука и техника. 2012. № 1. С. 52–55.

14. Патент 10010 Республика Беларусь, МПК D01F 9/12, В82В 3/00, С01В 31/00. Способ получения углеродного наноматериала / А. П. Солнцев, А. Ф. Буяков, С. А. Жданок, А. В. Крауклис. № 20050321; заявл. 31.03.2005; опубл. 30.12.2006.

15. Zhdanok S. A., Solntsev A. P., Krauklis A. V. Method of obtaining of carbon nanomaterial. Patent 10010 RB, МПК SO1B31/00, Published 31.03.2005.

16. Вовк А. И. О некоторых особенностях применения гиперпластификаторов // БСГ. Строительная газета. 2008. № 10. С. 5.

References

1. Bazhenov Yu. M. *Ispol'zovanie nanosistem v stroitel'nom materialovedenii* [Using of nanosystems in construction materials science]. *Sb. dokl. uchastnikov kruglogo stola «Voprosy primeneniya nanotekhnologii v stroitel'stve»* [Coll. of works of Round Table participants "Issues of application of nanotechnologies in construction"]. Moscow, MGSU Publ., 2009, pp. 4–8.

2. Gritel' G. B., Glazkova S. V. *Perspektivy nanostrukturirovannogo betona v stroitel'stve* [Prospects of using nanostructured concrete in construction]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, 2011, no. 6, pp. 40–44.

3. Dyatlov A. K., Kharchenko A. I., Bazhenov M. I., Kharchenko I. Ya. *Kompozitsionnoe vyazhushchee dlya melkozernistykh samouplotnyayushchikhsya betonov* [Composite binder for self-compacting fine-grained concrete]. *Tekhnologiya betonov – Technology of concrete*, 2013, no. 3, pp. 40–43.

4. Pudov I. A., et al. *Problemy dispergatsii uglerodnykh nanotrubok pri modifikatsii tsementnykh betonov* [Problems of the carbon nanotube dispersion in the modification of cement concrete]. *Trudy. II mezhdunar. konf. «Nanotekhnologii dlya ehkologichnogo i dolgovechnogo stroitel'stva»* [Proc. of the II International conf. "Nanotechnologies for sustainable construction"]. Izhevsk, 2010, pp. 34–38.

5. Leonovich S. N., et al. *Strukturnaya modifikatsiya novoobrazovaniy v tsementnoy matritse s ispol'zovaniem dispersii uglerodnykh nanotrubok i nanokremnezema* [Structural modification of new formations in the cement matrix using dispersion of carbon nanotubes and nanosilica]. *Nauka i tekhnika – Science and Engineering*, 2017, vol. 16, no. 2, pp. 94–103.

6. Khrustalev B. M., et al. *Dispersii mnogosloynnykh uglerodnykh nanotrubok v stroitel'nom materialovedenii* [Dispersions of multi-walled carbon nanotubes in construction materials]. *Nauka i tekhnika – Science and technology*, 2014, no. 1, pp. 44–52.

7. Urkhanova L. A., Khardaev P. K., Lkhasaranov S. A. *Modifitsirovanie tsementnykh betonov nanodispersnymi dobavkami* [Modification of cement concretes with nanodispersed additives]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya – Construction and reconstruction*, 2015, no. 3, pp. 167–175.

8. Mazov I. N., et al. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva kompozitnykh betonov, modifitsirovannykh uglerodnymi nanotrubkami* [Physical and mechanical properties of composite concrete modified with carbon nanotubes]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2013, no. 5.

9. Sheyda O. Yu., Batyanovskiy Eh. I. *O proizvodstvennoy aprobatsii novoy khimicheskoy dobavki, sodержashchey uglerodnyy nanomaterial* [About the production testing of a new chemical additive-containing carbon nanomaterial]. *Trudy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. 27–28 maya 2014 g. V 2 ch. Ch. 2 «Sovremennye problemy vnedreniya evropeyskikh standartov v oblasti stroitel'stva»* [Proc. of Int. sci.-tech. conf. "Modern problems of implementing European standards in construction" May 27–28, 2014. In 2 Parts. Pt. 2]. Ed. by Zverev V. F., Koleda S. M., Delendik S. N. Minsk, BNTU Publ., 2015, pp. 7–19.

10. Kamalova Z. A., Rakhimov R. Z., Ermilova E. Yu., Stoyanov O. V. *Superplastifikatory v tekhnologii izgotovleniya tyazhelogo betona* [Superplasticizers in the technology of heavy concrete manufacturing]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologich. un-ta – Bulletin of Kazan Technologic University*, 2013, vol. 16, no. 8, pp. 148–152.

11. Volzhankin V. M., Krauklis A. V., Zhdanok S. A., Samtsov P. P. *Ustanovka dlya polucheniya uglerodnykh nanomaterialov* [Installation for production of carbon nanomaterials]. Patent 2839 RB, 2006.

12. Zhdanok S. A., Khrustalev B. M., Batyanovskiy Eh. I., Leonovich S. N. *Nanotekhnologii*

v stroitel'nom materialovedenii: real'nost' i perspektivy [Nanotechnologies in construction material science: reality and prospects]. *Vestnik BNTU – Bulletin of BNTU*, 2009, no. 3, pp. 5–22.

13. Ehberkhardstayner Y., et al. *Izuchenie vliyaniya nanorazmernykh dobavok na mekhanicheskoe povedenie tsementnykh blokov* [Study of the effect of nano-sized additives on the mechanical behavior of cement blocks]. *Nauka i tekhnika – Science and Engineering*, 2012, no. 1, pp. 52–55.

14. Solntsev A. P., Buyakov A. F., Zhdanok S. A., Krauklis A. V. *Sposob polucheniya uglerodnogo nanomateriala* [A method of producing of carbon nanomaterial]. Patent 10010 RB, 2006.

15. Zhdanok S. A., Solntsev A. P., Krauklis A. V. *Method of obtaining of carbon nanomaterial*. Patent 10010 RB, 2005.

16. Vovk A. I. *O nekotorykh osobennostyakh primeneniya giperplastifikatorov* [Some features of using hyper-plasticizers]. *BSG. Stroitel'naya gazeta – BSG. Construction newspaper*, 2008, no. 10, p. 5.