

УДК 666:941; 693.54

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВВЕДЕНИЯ В БЕТОН УГЛЕРОДНОГО НАНОМАТЕРИАЛА

*О.Ю. Марко<sup>1</sup>, Э.И. Батяновский<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Белорусско-Российский университет, Могилев

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск

e-mail: sheyda@mail.ru, but47@tut.by

*В материале статьи изложены результаты исследований влияния отечественной комплексной химической добавки («УКД-1»), содержащей структурированный углеродный наноматериал (УНМ) и характеризующейся совмещенным (ускоряющим твердение и пластифицирующим) эффектом, на продукты реакции цемента с водой. С целью выявления роли углеродного наноматериала (УНМ) исследовали пробы цементного камня без добавок и содержащие ускоряющий компонент (1% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> или СН), комплексную добавку (0,5% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 0,5% СП), включающую оба эти компонента, но не содержащую УНМ, а также пробы с добавкой «УКД-1» (0,35 % СП+0,6 % СН+0,05% УНМ). Выявлены закономерности роста прочности тяжелого цементного бетона под влиянием отдельно взятого ускоряющего компонента добавки «УКД-1» и этой добавки, в зависимости от ее дозировки (в диапазоне (0,5...2,0) % от массы цемента).*

**Ключевые слова:** комплексная химическая добавка, сульфат натрия, суперпластификатор, углеродный наноматериал, цемент, бетон, ускорение твердения.

## EFFICIENCY OF INTRODUCING CARBON NANOMATERIALS IN CONCRETE

*O. Marko<sup>1</sup>, E. Batyanovsky<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Belarusian-Russian University, Mogilev

<sup>2</sup>Belarusian national Technical University, Minsk

e-mail: sheyda@mail.ru, but47@tut.by

*The results of researches of influence of domestic complex chemical additive («UKD-1»), containing the structured carbon nanomaterial (CNM) characterized by the combined (the accelerating curing and plasticizer) effect on kinetics of curing of concrete in technology of monolithic concreting technology without warming up are expounded in the article. To identify the role of carbon nanomaterial, tested the samples, including the «original cement»; samples, containing the accelerating component (1% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>); complex additive (0,5% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 0,5% SP), that includes both of these components, but not containing CNM, and samples with the addition of «UKD-1» (0,35 % SP+0,6 % Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+0,05% CNM). Has revealed the regularities of growth of the strength of heavy cement concrete under the influence of the separately taken accelerating component of the additive «UKD-1» and this additive, depending on the dosage (in the range (0,5 ... 2,0) % of the mass of cement).*

**Keywords:** complex chemical additive, sodium sulfate, carbon nanomaterial, cement, concrete, hardening acceleration.

**Введение.** В научной литературе последних 10...15 лет проявляется большой интерес к использованию ультрадисперсных твердофазных углеродных наноматериалов в строительном материаловедении. Это отражено в ряде публикаций разных авторов [1-6 и др.]. Анализ этих источников показывает, что исследования на «постсоветском» пространстве и за рубежом выполняются с использованием углеродных наноматериалов в виде многослойных нанотрубок (в основном французского производства), характеризующихся поперечным сечением от 70 до 170 нм, что исключает эффект наноармирования структуры кристаллогидратных новообразований затвердевшего цементного камня (сечения пор  $\leq 4...5$  нм по общепризнанным данным). При этом весь объем исследований фактически сосредоточен на одном варианте введения трубчатых УНМ в цементное тесто, в виде дисперсий после высокоактивной и продолжительной (до  $\geq 60$  мин) гидроактивационной обработки. Вместе с тем известно, что УНМ отечественного производства – полидисперсное вещество, содержащее структурированный углерод в виде сочетания ультрадисперсных наночастиц до 5 %, до 45 % однослойных и до 45 % многослойных трубок с примесью до 1,5 % дисперсных частиц металла и до 5 % аморфного углерода. Такое сочетание разноразмерных составляющих УНМ проявляет более высокую эффективность, чем многослойные нанотрубки [7], что подтверждено и в наших исследованиях, отраженных в материале настоящей статьи.

**Теоретические аспекты эффективности УНМ** и ее экспериментальное обоснование при использовании отечественных УНМ впервые дано в работах кафедры «Технология бетона и строительных материалов» БНТУ в 2009...2011 г.г. [8-11].

Химические реакции и физико-химические превращения в твердеющей системе цемент – вода протекают при низких положительных температурах в диапазоне 15-25°C (нормальные условия) и повышенных температурах, но не более 80-90°C. В этих условиях темп их развития зависит от степени дисперсности реагирующих твердофазных компонентов (в частности, от размеров частиц вяжущего и дополнительно вводимых твердофазных веществ), так как с ростом дисперсности возрастает и энергия поверхности, и химико-физическая активность твердой фазы.

Удельная поверхность открытых и закрытых нанотрубок, определенная методом физической сорбции  $N_2$  при  $T = -196$  °C, оказалась равной 21 и 36  $m^2 \cdot g^{-1}$  соответственно и достигла 450  $m^2 \cdot g^{-1}$  для внутренней поверхности структур из нанотрубок [12]. Следует ожидать, что удельная поверхность коротких трубок или сферообразных многогранников УНМ будет не менее 450  $m^2 \cdot g^{-1}$ , а такие частицы характеризуются значительным сосредоточенным в малом объеме зарядом поверхностной энергии.

Для сравнения приведем требования действующего стандарта в отношении удельной поверхности широко применяемой добавки в цементные бетоны – микрокремнезема (аморфный  $SiO_2$ ), которая должна быть не ниже 15  $m^2 \cdot g^{-1}$  (фактически соответствует 15-25  $m^2 \cdot g^{-1}$ ). Удельная поверхность частиц промышленно производимого и применяемого в строительстве портландцемента (кроме вяжущих специального назначения) составляет  $S_{уд} \sim 1,5 m^2 \cdot g^{-1}$  при определении методом адсорбции паров азота, что соответствует  $\sim 0,3 m^2 \cdot g^{-1}$  для наиболее широко применяемого метода ее оценки по воздухопроницаемости при атмосферном давлении (приборы типа ПСХ).

С позиций эффективного воздействия УНМ на процессы структурообразования, твердения и на прочность цемента (соответственно цементного бетона как базового

строительного материала) особое значение приобретают высокая потенциальная энергия ультрадисперсных УНМ и их свойство формировать тончайшие волокна значительной (до десятков микрон) длины в определенных условиях получения.

В первом варианте эффективность введения вещества УНМ в цемент и цементные композиции в целом основывается на понижении энергетического порога начала образования кристаллогидратов из водного раствора, насыщенного ионами клинкерных минералов цемента как результата его взаимодействия с водой затворения. Таким образом, в этом случае используется высокий уровень энергии поверхности частиц УНМ, которые могут служить центрами кристаллизации, ускоряя процесс образования кристаллогидратов и обеспечивая повышение темпа роста прочности цементного камня. По классификации Ратинова-Розенберг [13] такие вещества относят к добавкам третьего класса (кристаллические затравки). Их эффективность известна (добавки-кренты) с 60-х годов XX века [14] и в наибольшей мере реализуется в современных условиях при использовании микрокремнезема [15-17]. Однако при этом дозировка или расход данной добавки составляет порядка 10 % от массы цемента (МЦ) и для обеспечения максимальных результатов достигает 30 % от МЦ.

Особенность и уникальность применения вещества УНМ, характеризующегося высоким потенциалом поверхности ультрадисперсных частиц, заключается в достижении положительного результата, выраженного ростом прочности цементного камня и бетона, при дозировках в сотых и даже тысячных долях процента от массы цемента [8-11].

В несколько ином аспекте проявляется эффективность волокнообразных трубчатых УНМ. Их особенностью является значительная длина [12] при малых размерах поперечного сечения, которое может быть в диаметре менее 1 нм. Такой волокнообразный материал, характеризующийся значительной прочностью на растяжение, может оказать большое влияние на прочностные характеристики цементного камня и бетона.

Присутствие таких тончайших волокон в твердеющем цементном камне создает условия для эффекта «наноармирования» структуры новообразований в виде спонтанно формирующейся системы гидроокислов клинкерных минералов ( $n_1\text{CaO} \cdot m_1\text{SiO}_2 \cdot p_1\text{H}_2\text{O}$ ;  $n_2\text{CaO} \cdot m_2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot p_2\text{H}_2\text{O}$ ;  $n_3\text{CaO} \cdot m_3\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot p_3\text{H}_2\text{O}$  и др.). Малые поперечные размеры нанотрубок при длине, значительно превышающей размеры собственно кристаллогидратов силикатов, алюминатов и ферритов кальция, соответствующих порядка 8,0-25,0 нм, обеспечивают необходимые предпосылки для «защемления» волокон в межплоскостных пространствах соседних поверхностей множества кристаллогидратов, что сопровождается эффектом армирования нано- и микроструктуры новообразований затвердевшего цементного камня. Следствием этого является рост его прочности на растяжение и сжатие, что отражено в результатах экспериментальных исследований Э.И. Батыновского, П.В. Рябчикова, В.Д. Якимовича, А.В. Крауклиса, Петра П. Самцова, Павла П. Самцова, выполненных по заданию академиков С.А. Жданка и Б.М. Хрусталева [8-11].

**Введение и равномерное распределение в объеме бетона** небольших количеств тонкодисперсного твердофазного УНМ (~0,005...0,0005% от МЦ) представляет собой сложную задачу, которую в исследованиях [9-11] решали разными приемами. В частности, введением с водой затворения при интенсивном предварительном перемешивании; при домоле совместно с применяемым цементом; предварительным смешиванием с песком либо микрокремнеземом (используя эффект фиксации частиц УНМ, характеризующимися положительным зарядом поверхности, на отрицательно «заряженных»

участках поверхности этих материалов); эжекцией (распылением сжатым воздухом) расчетного количества УНМ, распределяя его по поверхности приготавливаемого замеса бетона; при помоле с клинкером на стадии изготовления цемента. Согласно выводам авторов работ [9-11] наиболее целесообразно (с учетом большей эффективности в цементе (бетоне)) введение УНМ на стадии помола клинкера (в случае изготовления специального цемента, содержащего УНМ), а для приготовления бетона (растворов) наиболее равномерное распределение УНМ (оцениваемое по уровню роста прочности мелкозернистого и традиционного бетона с крупным заполнителем) достигнуто при предварительном высокоинтенсивном смешивании его с песком или кремнеземом.

В развитие такого подхода и исходя из гипотезы об усилении действия традиционных химических добавок за счет введения в их состав углеродного наноматериала (т.е. дополнение эффективности химических добавок воздействием УНМ на твердеющий цемент (бетон)) была предложена комплексная углеродосодержащая добавка «УКД-1» [18]. Исходной предпосылкой являлось предположение, что равномерное распределение вещества УНМ будет обеспечено за счет того, что его частицы «осядут» на отрицательно «заряженной» поверхности ускоряющего твердения компонента (сульфата натрия) и при растворении добавки равномерно распределятся в воде затворения, а с ней и в приготавливаемом бетоне. Как будет показано далее в экспериментальных исследованиях данное предположение полностью оправдалось.

**Кинетика твердения и прочность цементного камня.** Влияние добавки «УКД-1» и ее ускоряющего (СН) и пластифицирующего (СП) компонентов на кинетику твердения цемента исследовали, оценивая изменение прочности цементного камня во времени. Для проведения испытаний использовали портландцемент ПЦ500-Д20. Цементное тесто нормальной густоты готовили по методике ГОСТ 310.3; при введении добавок с пластифицирующим эффектом уменьшали начальное водосодержание до консистенции цементного теста, соответствующей тесту нормальной густоты. Образцы-кубы с ребром 20 мм изготавливали в 18-гнездных формах.

При этом одна партия образцов не подвергалась дополнительному разогреву, а вторую – после предварительной выдержки в течение 2 ч, разогревали в формах (в бачке над подогреваемой водой) до температуры  $\approx 50^\circ\text{C}$  в течение 1,5 ч, а затем образцы остывали в бачке и через 21...22 ч после изготовления их распалубливали. Часть образцов (не менее 6 шт. в серии) испытывали в возрасте 24 ч, а остальные твердели до испытаний в помещении лаборатории, гидроизолированными полиэтиленовой пленкой или в воде. Особенностью эксперимента была пониженная температура среды (воды), равная 10...12 $^\circ\text{C}$  (по фактическим условиям испытательной лаборатории).

Указанные режимы твердения образцов цементного камня приняты, во-первых, с целью максимально исключить возможность изменения начального водосодержания цементного камня в процессе твердения, а во-вторых, имитировать начальным прогревом условия твердения цементного бетона при использовании малоэнергоемкой технологии, которая включает период разогрева бетона с последующим твердением без подвода тепла [19 и др.].

Результаты экспериментов с оценкой кинетики изменений прочности цементного камня, твердевшего в разных условиях, представлены в таблице 1. Каждое единичное значение прочности (приведена в относительной (%) величине) получено как среднее арифметическое не менее 3...6 образцов в серии. При этом отклонение от-

дельных значений в серии не превышало 15% от среднего в этой серии. На начальном этапе этих экспериментов (составы №№2...5; 7...10; 12\*...15\*) оценили влияние пластифицирующего и ускоряющего твердение цемента компонентов на кинетику роста прочности цементного камня. Одновременно из этих образцов (после их испытаний) отбирали пробы для последующей оценки количества химически связанной воды (ХСВ) цементом и возможных изменений в морфологии продуктов его гидратации рентгенофазовым анализом. Для компонента углеродные наноматериалы эти исследования выполнены и отражены в источнике [9].

Таблица 1. – Составы цементного теста и относительная прочность (%) образцов цементного камня

№ состава	Расходы, г (% от МЦ)			K <sub>нг</sub>	ΔВ, г	Условия твердения		Прочность в % от R <sub>28</sub> <sup>ЦК</sup> в возрасте, сут:			
	В	Ц	Добавка			НВУ	В воде	1	3	7	28
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	102	400	–	0,255	–	+	–	50	81	92	100
2	102	400	1,0% СН	0,255	–	+	–	67	92	102	110
3	102	400	0,5% СН	0,255	–	+	–	66	90	97	107
4	80	400	0,5% СП	0,200	22	+	–	30	73	94	102
5	80	400	0,5% СН + 0,5% СП	0,200	22	+	–	58	86	101	111
6*	102	400	–	0,255	–	+	–	52	87	93	101
7*	102	400	1,0% СН	0,255	–	+	–	67	89	99	104
8*	102	400	0,5% СН	0,255	–	+	–	66	86	99	103
9*	80	400	0,5% СП	0,200	22	+	–	35	78	94	101
10*	80	400	0,5% СН + 0,5% СП	0,200	22	+	–	59	89	101	110
11*	102	400	–	0,255	–	–	+	57	88	94	103
12*	102	400	1,0% СН	0,255	–	–	+	68	89	101	109
13*	102	400	0,5% СН	0,255	–	–	+	67	88	100	105
14*	80	400	0,5% СП	0,200	22	–	+	37	80	95	107
15*	80	400	0,5% СН + 0,5% СП	0,200	22	–	+	60	89	101	116
16	84	400	1%УКД-1	0,210	18	–	+	64	99	119	121
17	82	400	1%УКД-1	0,205	20	–	+	67	108	127	145
18	82	400	1%УКД-1	0,205	20	+	–	–	–	–	139
19	96	400	0,5%УКД-1	0,240	6	+	–	–	–	–	121
20	88	400	0,75%УКД-1	0,220	14	+	–	–	–	–	133
21	76	400	1,5%УКД-1	0,190	26	+	–	–	–	–	148

Примечания:

1. \*с нагревом за 1,5 часа до температуры 50°C и остыванием в бачке (~ 22 ч).

2. № 16 – после хранения «УКД-1» в течение года в помещении; №№ 17...21 – 45...60 сут. после изготовления.

В развитие этих экспериментов на сериях образцов №№ 16...21 определили кинетику изменений (роста) прочности цементного камня при различающейся дозировке добавки «УКД-1» (№№ 18...21) и сроков ее хранения до применения (№16 – в течение года; №17 – 7...14 дней; №№18...21 – 45...60 суток). Из ряда этих образцов также готовили пробы для определения количества ХСВ и проведения рентгенофазового анализа.

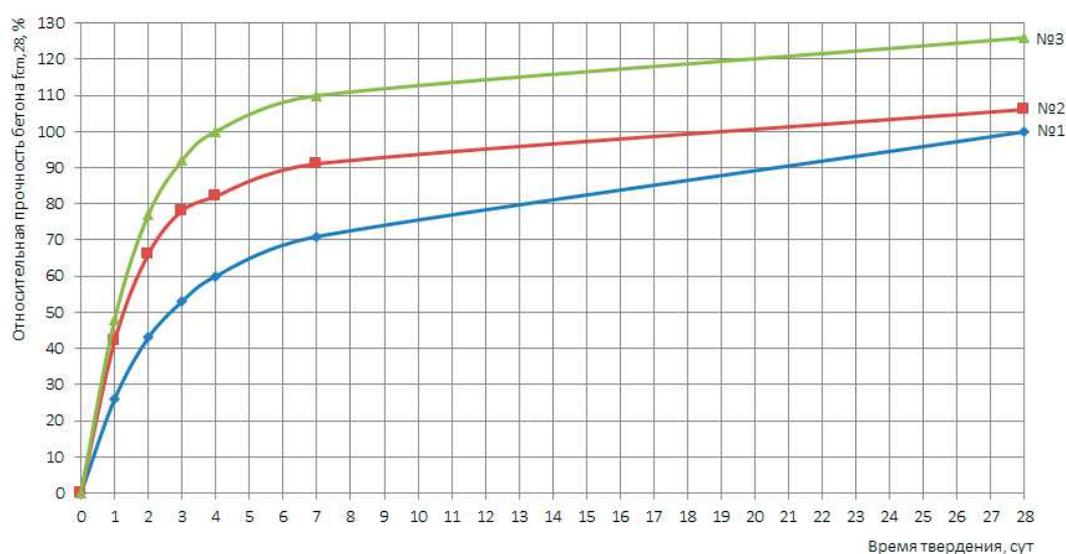
Обобщение данных таблицы 1 (и не приведенных в статье результатов экспериментов) позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, очевидно, что ускоряющий компонент – добавка СН и комплексная, включающая СП + СН, обеспечивают стабильный рост прочности цементного камня. Но наибольшую эффективность проявляет комплексная добавка «УКД-1», содержащая эти компоненты и углеродный наноматериал, усиливающий действие сульфата натрия. Ее эффект проявляется в значительном повышении темпа роста прочности цементного камня за счет сочетания понижения водосодержания цементного теста и совокупного ускоряющего эффекта от сульфата натрия (имеющего химико-физическую природу и в итоге проявляющегося в уплотнении структуры цементного камня за счет взаимодействия в продуктах гидролиза-гидратации цемента [13]), а также от ультрадисперсных частиц УНМ, проявляющих эффект «центров кристаллизации», что способствует ускоренному формированию (и в большом количестве) кристаллогидратных новообразований, а в итоге – росту прочности цементного камня.

Эффективность вещества УНМ подтверждается сопоставлением результатов экспериментов №5; №15\* (введена комплексная добавка: 0,5% СП + 0,5% СН, т.е. 1% этой добавки от МЦ) и №16; №18 (содержит 1% «УКД-1»). При практически равном начальном водосодержании ( $K_{нг} \sim const$ ) цементного теста (снижение за счет пластифицирующего эффекта этих добавок) прочность образцов с «УКД-1» к 28 суткам была выше на ~28% (№5 и №8) и на ~15% (№15 и №16), при прочих равных условиях. Это подтверждает предположение об усилении веществом УНМ действия ускорителя твердения – сульфата натрия, входящего в состав комплексной добавки «УКД-1».

Из результатов экспериментов следует, что при хранении «УКД-1» в течение 60 суток ее эффективность практически не изменяется; хранившаяся в течение 1 года добавка (№16 и №18) проявляет пластифицирующий и ускоряющий эффект, но со снижением их примерно на  $\geq 5\%$ , что следует учитывать при работе с ней.

**Кинетика твердения бетона с добавкой в нормально-влажностных условиях.** Составы бетона с добавкой ускорителем твердения сульфатом натрия (СН) приняты для оценки (сравнения) эффективности исследуемой добавки «УКД-1». Известно, что монодобавка сульфата натрия может обеспечить реализацию весьма эффективных по затратам энергии технологий изготовления сборных изделий [19 и др.] и сопоставление (при прочих равных условиях) результатов сравнительных экспериментов позволит выявить уровень эффективности добавки «УКД-1».

На рисунке 1 частично представлены данные экспериментов в виде графиков, отображающих общую тенденцию кинетики твердения (роста прочности) бетона класса С12/15 без добавок (№1) и с добавками 1% СН и 1% «УКД-1».



№1 – бетон без добавок; №2 – с 1% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; №3 – с 1% «УКД-1»

Рисунок 1. – Тенденция кинетики твердения бетона в нормально-влажностных условиях

Экспериментально установлено, что при кратковременном (за 1,5-2 часа) нагреве бетона (классов С12/15 – С25/30), до температуры 50°С и дальнейшем твердении его в утепленной опалубке (по методу «термоса») обеспечивается прочность до 75...95 % (от прочности проектного возраста) в пределах 24 ч твердения при температуре наружного воздуха  $t_{нв} = \pm 5...-20^{\circ}\text{C}$  (данные частично приведены в таблице 2), что позволяет значительно снизить энергетические затраты при ведении бетонных работ в зимний период.

**Заключение.** Результаты экспериментов (включая не приведённые в статье) подтверждают эффективность в бетоне комплексной добавки «УКД-1». Одновременно следует отметить, что, несмотря на снижение водосодержания бетона в равноподвижных смесях с введением добавки «УКД-1» в дозировке 0,5%...0,75% от МЦ, прочность в начальные сроки (1...2 суток) твердения была близкой к величине по отношению к бетону с 1% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Очевидно, что этот эффект связан с замедляющим реакции цемента с водой действием пластифицирующего компонента «УКД-1». Однако, общий уровень прочности образцов бетона с добавкой «УКД-1» оказался выше, чем образцов с 1% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, несмотря на то, что ускоряющего компонента (того же Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) в «УКД-1» при ее дозировке 0,5%...1,0% от МЦ заведомо меньше. Отсюда следует вывод о дополнительном эффекте ускорения твердения, отраженном в росте прочности цементного бетона, «присадкой» структурированного углеродного наноматериала, содержащегося в добавке «УКД-1». По результатам экспериментов прочность бетона с добавкой «УКД-1» (за счет совокупного эффекта от снижения водосодержания и действия компонентов Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и УНМ) составила от 112% (0,5% «УКД-1») до 130% (2,0% «УКД-1») от прочности образцов бетона из равноподвижных смесей без добавок.

Однозначно эффективен вариант твердения бетона с добавкой «УКД-1» по принципу «горячего термоса», включая зимние условия ведения бетонных работ в монолитном строительстве.

Таблица 2. – Кинетика роста прочности бетона с начальным разогревом и твердением в условиях термоса

Температура разогрева бетона, °С	Характеристики бетона		Наличие и вид добавки	Номер формы	Прочность бетона в % от $f_{cm, 28}$ после термостатической выдержки, час			Температура бетона образцов через 24 ч твердения	
	номер состава по таб-лице 2	класс бетона			12	18	24		через 28 суток твердения в камере с НВР*
1	2	3	4	5	6	7	8	10	
А. Температура наружного воздуха: $t_{нв} \sim 5^\circ\text{C}$									
30	1	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	–	1	26	35	42	101	19
	5	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	«УКД-1»	1	42	55	63	104	23
	7	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	«УКД-1»	1	46	53	65	–	–
30	1	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	–	4	25	39	44	101	21
	5	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	«УКД-1»	4	63	72	80	106	29
	7	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	«УКД-1»	4	65	71	82	105	–
50	1	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	–	1	35	45	55	103	–
	5	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	«УКД-1»	1	55	66	74	105	24
	7	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	«УКД-1»	1	55	68	77	108	–
Б. Температура в камере хранения: $-20^\circ\text{C}$									
30	5	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	«УКД-1»	4	40	44	50	110	13
	7	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	«УКД-1»	4	40	46	50	110	–
50	5	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	«УКД-1»	4	59	66	73	105	22
	7	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	«УКД-1»	4	60	66	75	108	–
В. Температура в камере хранения: $-20^\circ\text{C}$ , модуль поверхности блока образцов $M_n \sim 18 \text{ м}^{-1}$									
30	5	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	«УКД-1»	4**	53	63	65	108	21
	7	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	«УКД-1»	4**	54	61	68	109	–
50	5	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	«УКД-1»	4**	75	84	95	105	37
	7	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	«УКД-1»	4**	78	85	98	106	–

Примечания: в камере с нормально-влажностным режимом твердения: 1 – формы из доски  $\delta = 25 \text{ мм}$ ; 4 – формы из фанеры  $\delta = 12 \text{ мм}$ , утепленные минватой; 4\*\* – блок-форма из фанеры, под общим колпаком при  $K_T \sim 0,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Пудов, И.Н. Наномодификация портландцемента водными дисперсиями углеродных нанотрубок: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.05/И.Н. Пудов; ФГБОУ ВПО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет». – Казань, 2013. – 22 с.
3. Петрунин, С.Ю. Повышение прочности бетона углеродными нанотрубками с применением гидродинамической кавитации: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.05 / С.Ю. Петрунин; ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». – М., 2015. – 20 с.
4. Соловьева, Т.А. Эффективные цементные композиции, модифицированные углеродными материалами: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.05 / Т. А. Соловьева; Волгогр. Гос. архитектурно-строит. ун-т. – Волгоград, 2015. – 18 с.
5. Shah, S. P. Nanoscale modification of cementitious materials / S. P. Shah, M. S. Konsta-Gdoutos, Z. S. Metaxa, P. Mondal // In: Bittnar Z., Bartos P. J. M., Nemecek J., Smilauer V., Zeman J., editors. Nanotechnology in construction: Proceedings of the NICOM3 (3rd international symposium on nanotechnology in onstruction). – Prague, Czech Republic, 2009. – P. 125–130.
6. Saez de Ibarra, Y. Atomic force microscopy and nanoindentation of cement pastes with nanotube dispersions/ Y. Saez de Ibarra, J.J. Gaitero, E. Erkizia, I. Campillo // Phys. Status. Solidi. – 2006. V. 203. – № 6. – P. 1076–1081.
7. Рябчиков, П.В. Технология и физико-технические свойства тяжелого бетона, модифицированного углеродными наноматериалами. автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.05/ П.В. Рябчиков; Минск, 2017. – 23 с.
8. Жданок, С.А., Хрусталева, Б.М., Батыновский, Э.И., Леонович, С.Н. Нанотехнологии в строительном материаловедении: реальность и перспективы. Журнал «Вестник БНТУ». – № 3. – 2009. – С. 5-22.
9. Батыновский, Э.И., Крауклис, А.В., Самцов, Петр П., Рябчиков, П.В., Самцов, Павел П. Влияние углеродных наноматериалов на свойства цемента и цементного камня. Научно-технический журнал «Строительная наука и техника». – 2010. – №1-2(28-29). – С. 3-10.
10. Батыновский, Э.И., Якимович, В.Д., Рябчиков, П.В. Особенности технологии высокопрочного бетона на отечественных материалах, включая нанокремниевые добавки. Сборник материалов III международного симпозиума «Проблемы современного бетона и железобетона». – Минск, РУП «БелНИИС». – 2011. – С.53-68. (Т.2).
11. Батыновский, Э.И., Галузо, Г.С., Мордич, М.М. Особенности применения углеродных наноматериалов в конструкционно-теплоизоляционных пенобетонах. Сборник материалов Девятой международной научно-технической конференции «Наука - образованию, производству, экономике». – Минск, БНТУ. – 2011. – С.272-273.
12. Елецкий, А.В. Сорбционные свойства углеродных наноструктур // Успехи физ. наук. – 2004. – Т. 174, № 11. С. 1191-1231.
13. Ратинов, В.Б., Розенберг, Т.И. Добавки в бетон. – М.: Стройиздат, 1989. – 188 с.
14. Вавржин, Ф., Крмча, Р. Химические добавки в строительстве. – М.: Стройиздат, 1964. – 288 с.

15. Ma J. // LACER, 2002. – № 7.
16. Каприелов, С.С. и др. В сб. Тр. Проблемы соврем. бет. и ж/бетона. – Мн.: 2007. – С. 105-120.
17. Чернышов, Е.М., Коротких, Д.Н. // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – М.: 2008. – № 5. – С. 30–32.
18. Техническое свидетельство пригодности материалов и изделий для применения в строительстве. ТС 01.2093.14. Комплексная добавка для бетона «УКД-1». Дата регистрации: 10.01.2014 г. Действительно до 10.01.2019 г. Выдано РУП «Сройтехнорм» Минстройархитектуры РБ. – 8 с (с приложениями).
19. Батяновский Э.И., Иванова Е.И., Осос Р.Ф. Эффективность и проблемы энергосберегающих технологий цементного бетона // Строительная наука и техника. – 2006. – №3(6). – С. 7-17.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:  
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК СТАТЕЙ  
II МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Новополоцк, 28–29 ноября 2019 г.)

Новополоцк  
Полоцкий государственный университет  
2020

УДК 72:624/628+69(082)

Редакционная коллегия:

Л. М. Парфенова (председатель),  
А. С. Катульская (отв. секретарь), Е. Д. Лазовский,  
Н. В. Давыденко, Р. М. Платонова

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**  
[Электронный ресурс] : электронный сборник статей II международной научной конференции, Новополоцк, 28–29 нояб. 2019 г. / Полоцкий государственный университет ; под ред. Л. М. Парфеновой. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2020. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

ISBN 978-985-531-701-3.

Рассмотрены вопросы архитектуры и градостроительства в современных условиях, прогрессивные методы проведения инженерных изысканий и расчета строительных конструкций. Приведены результаты исследований ресурсо- и энергосберегающих строительных материалов и технологий, энергоресурсосберегающие и природоохранные инновационные решения в инженерных системах зданий и сооружений. Проанализированы организационные аспекты строительства и управления недвижимостью, проблемы высшего архитектурного и строительного образования.

Для научных и инженерно-технических работников исследовательских, проектных и производственных организаций, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов строительных специальностей учреждений образования.

*Сборник включен в Государственный регистр информационного ресурса.  
Регистрационное свидетельство № 3671815379 от 26.04.2018.*

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь  
тел. 8 (0214) 53 53 92, e-mail: a.bakatovich@psu.by; l.parfenova@psu.by

**№ госрегистрации 3671815379.**

**ISBN 978-985-531-701-3**

@Полоцкий государственный университет, 2020

2 – дополнительный титульный экран – производственно-технические сведения

Для создания текстового электронного издания «Архитектурно-строительный комплекс: Проблемы, перспективы, инновации» использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:  
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК СТАТЕЙ  
II МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Новополоцк, 28–29 ноября 2019 г.)

Технический редактор *Т. А. Дарьянова.*

Компьютерная верстка *Т. А. Дарьяновой.*

Компьютерный дизайн обложки *Е. А. Балабуевой.*

---

Подписано к использованию 09.09.2020.

Объем издания: 21,05 Мб. Тираж 3 диска. Заказ 420.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

211440, ул. Блохина, 29,  
г. Новополоцк,  
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44  
<http://www.psu.by>