

Рябчиков Павел Владимирович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, научно-исследовательская и испытательная лаборатория бетонов и строительных материалов, Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Беларусь)

Якимович Владимир Дмитриевич, канд. техн. наук, доцент, заведующий научно-исследовательской и испытательной лабораторией бетонов и строительных материалов, Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Беларусь)

Ковшар Сергей Николаевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительные материалы и технология строительства», Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Беларусь)

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ ВВЕДЕНИЯ ДОБАВОК УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ В БЕТОНЫ И БЕТОННЫЕ СМЕСИ

© РУП «Институт БелНИИС», 2019
Institute BelNIIS RUE, 2019

АННОТАЦИЯ

В материале статьи отражены основные результаты исследования влияния различных технологических приемов введения отечественных углеродных наноматериалов (УНМ) в тяжелые и мелкозернистые бетоны и бетонные смеси.

Введение малого количества твердофазного вещества УНМ в бетон представляет собой сложную задачу с позиций его равномерного распределения по объему приготавливаемой бетонной смеси, т. к. это не растворимое в воде вещество. Кроме этого, вследствие малого собственного размера частицы УНМ при комнатной температуре и атмосферном давлении начинают «самоорганизовываться», объединяясь и укрупняясь вплоть до образования микроскопических «гранул».

Введение в цемент (бетон, раствор) углеродных наноматериалов различными технологическими приемами обеспечивает рост прочности цементного камня (бетона, раствора) как в условиях естественного (нормально-влажностного) твердения, так и в случае ускоренного твердения при тепловой обработке образцов.

На уровень прироста прочности цементного камня (бетона, раствора), в отдельных случаях достигавшего 40...60 %, оказывает основное влияние вид (состав) УНМ и дозировка вещества; оптимальная примерно соответствует 0,05 % от массы цемента.

Все проверенные способы введения УНМ могут быть реализованы при производстве бетонных смесей (бетонов, растворов). При тщательной проработке технологии введения тем или иным способом возможно обеспечение равномерного распределения УНМ в объеме смеси, что подтверждается примерным равенством увеличения прочности цементного камня для различных способов введения (смешиванием с цементом, песком, химическими добавками, диспергированием в воде затворения).

Но наиболее перспективным представляется прием введения УНМ в комплексе с порошкообразными твердофазными пластифицирующей и ускоряющей твердение цемента химическими добавками для бетона.

Полученные результаты исследований развивают предпосылки к более широкому использованию УНМ в конструкционных цементных бетонах.

Ключевые слова: цемент, бетон, углеродная нанодобавка, прочность, методика введения.

Для цитирования: Рябчиков, П. В. Сравнительная оценка различных технологических приемов введения добавок углеродных наноматериалов в бетоны и бетонные смеси / П. В. Рябчиков, В. Д. Якимович, С. Н. Ковшар // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2019. – Вып. 11. – С. 219–233. <https://doi.org/10.35579/2076-6033-2019-11-14>

Pavel Ryabchikov, PhD in Engineering Science, Senior Researcher, Research and Test Laboratory of Concrete and Construction Materials, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

Vladimir Yakimovich, PhD in Engineering Science, Associate Professor, Head of Research and Test Laboratory of Concrete and Construction Materials, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

Sergey Kovshar, PhD in Engineering Science, Associate Professor, Department of Construction Materials and Technology of Construction, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

COMPARATIVE ASSESSMENT OF VARIOUS PROCESSING METHODS OF INTRODUCTION OF ADDITIVES OF CARBON NANOMATERIALS TO CONCRETE AND CONCRETE MIXES

ABSTRACT

The main results of a research of influence of various processing methods of introduction of domestic carbon nanomaterials (CNM) to heavy and fine-grained concrete and concrete mixes are reflected in material of article.

Introduction of small amount of solid-phase substance CNM to concrete represents a difficult task from positions of its uniform distribution on volume of the prepared concrete mix since this insoluble substance in water. Besides, owing to the small own size of a particle of CNM at the room temperature and atmospheric pressure begin “to self-organize”, uniting and being integrated up to formation of microscopic “granules”.

Introduction to cement (concrete, mortar) of carbon nanomaterials various processing methods, provides growth of durability of a cement stone (concrete, mortar) both in the conditions of natural (normal and moist) curing, and in case of the accelerated curing at thermal treatment of samples.

The type (structure) of CNM and dosage of substance has the main impact on the level of gain of durability of a cement stone (concrete, mortar) in some cases reaching 40 ... 60%; optimum approximately there correspond 0,05 % of the mass of cement.

All checked ways of introduction of CNM can be realized by production of concrete mixes (concrete, mortar). At careful study of technology of introduction ensuring uniform distribution of CNM in volume of mix is one way or another possible that is confirmed by approximate equality of increase in durability of a cement stone for various ways of introduction (mixing with cement, sand, chemical additives, dispersion in water).

But reception of introduction of CNM in a complex with the powdery solid-phase chemical additives plasticizing and accelerating cement curing for concrete is represented to the most perspective.

The received results of researches develop prerequisites to wider use of CNM in constructional cement concrete.

Keywords: cement, concrete, carbon nanoadditive, durability, introduction technique.

For citation: Ryabchikov P., Yakimovich V., Kovshar S. Comparative assessment of various processing methods of introduction of additives of carbon nanomaterials to concrete and concrete mixes. *Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete: Collected Research Papers*. Minsk. Institute BelNIIS. Vol. 11. 2019. pp. 219–233. <https://doi.org/10.35579/2076-6033-2019-11-14> (in Russian)

ВВЕДЕНИЕ

Вследствие малого размера частицы углеродных нановеществ при комнатной температуре и атмосферном давлении начинают «самоорганизовываться», объединяясь и укрупняясь вплоть до образования микроскопических «гранул». Процесс образования гранул обусловлен действием сил Ван-дер-Ваальса между отдельными углеродными наночастицами. Это свойство УНМ препятствует прямому получению материала из отдельных, «независимых» друг от друга частиц, а в результате может понизить эффективность их влияния на характеристики цемента и бетона за счет снижения удельной поверхности и энергетической активности вещества УНМ. Поэтому одной из ключевых проблем последующего равномерного распределения вещества УНМ в объеме бетонной смеси в виде отдельных элементарных частиц и

достижения наибольшей эффективности в бетоне является диспергация исходного материала – как при его «очистке» на стадии получения, так и на стадии введения в бетон.

Анализируя некоторые публикации по направлению исследований [1–6], можно сказать, что в данных источниках наиболее детально рассмотрена задача введения в бетон и равномерного распределения в его объеме малого количества твердофазного вещества УНМ через воду затворения. Результат достигается путем подготовки водных суспензий, получаемых с использованием эффекта гидродинамической кавитации. Для его усиления в воду вводят поверхностно активные вещества (проявляющие пластифицирующий и водоредуцирующий эффекты), молекулы которых способны адсорбироваться на поверхности элементарных частиц УНМ, повышая стабильность суспензий (седиментационную устойчивость) во времени.

Фактически отсутствуют данные о других возможных вариантах введения УНМ в бетон с учетом того, что приготовление суспензий высокой однородности требует специального оборудования и весьма продолжительно (~ 60...120 мин. на порцию), а результат (по срокам сохранения эффективности) не однозначен.

В данной статье приведены экспериментальные данные о широком спектре различных технологических приемов введения веществ УНМ в цементные (бетонные) смеси с оценкой их эффективности по повышению прочностных свойств цементного камня (бетона).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В исследованиях использовались материалы со следующими характеристиками.

Вязущее – портландцемент ОАО «Красносельскстройматериалы» марки ПЦ 500-Д0, по действующим стандартам на цементы – ГОСТ 10178-85, ГОСТ 30515-97 активностью 45–50 МПа.

Песок – природный, Крапужинского карьера с модулем крупности $M_k \sim 2,8$; насыпной плотностью $\sim 1580 \text{ кг/м}^3$; плотностью зерен $\sim 2650 \text{ кг/м}^3$; по ГОСТ 8736-2014.

Добавка-гиперпластификатор «Стахемент 2000» – пластифицирующая добавка для бетонных смесей и растворов отечественного производства. По эффективности пластифицирующего действия относится к пластифицирующим добавкам I группы (суперпластификаторы с повышенным водоредуцирующим эффектом) согласно СТБ 1112-98.

Добавка-гиперпластификаатор «Sika Viscocrete» производства фирмы «Sika» (Швейцария) по СТБ 1112-98 относится к суперпластификаторам с повышенным водо-редуцирующим эффектом.

Добавка углеродного наноматериала.

По данным разработчиков вещества, УНМ представляют собой смесь различных форм углерода с характерными размерами сечений от нескольких до десятков нанометров и длиной до нескольких микрон. Содержат структурированные нанотрубки и нановолокна, а также аморфный углерод, графитоподобные частицы и до 5 % от массы примесей металла. Массовая доля структурированного углеродного материала, в зависимости от типа и режима работы реактора, может меняться от 5 % до 70 % от общей массы твердой фазы и увеличивается при последующей доработке – очистке разными способами. Информация о составе УНМ (химическом и вещественном) и способах очистки является интеллектуальной собственностью разработчиков.

В исследованиях использовалась наиболее эффективная добавка УНМ-1 (установлена на предыдущих этапах исследований [7, 8]).

Предоставлялась институтом «ИТМО» им. А. В. Лыкова НАН Беларуси.

Исследования выполнены с оценкой прочности цементного камня на сжатие образцов, твердевших в стандартных (нормально-влажностных: температура 20 ± 3 °С; влажность ≥ 95 %) условиях, а также после пропаривания (по режиму: выдержка после изготовления 2,0 ч. в нормально-влажностных условиях, затем подъем температуры и выдержка 4,0 ч. в бачке над кипящей водой и охлаждение при комнатной температуре в течение 1,0 ч.) в многоместных (ячейковых) формах в соответствии с основными положениями известной методики (метод «ЦНИИПС-2»).

Количество воды затворения подбирали таким образом, чтобы во всех случаях получать тесто нормальной густоты. Из цементного теста нормальной густоты изготавливали образцы-кубы (20x20x20 мм), которые формовали вручную с помощью штыковки Ø 3 мм и уплотняли на встряхивающем столике (количество ударов – 25) (по методике «ЦНИИПС-2»).

Образцы-балочки 40x40x160 мм из цементно-песчаного раствора (Ц:П=1:3, при Ц=500 кг) изготавливали в соответствии с ГОСТ 310.4-81 [9].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ ВВЕДЕНИЯ УНМ В ЦЕМЕНТ И БЕТОН

Введение малых количеств твердофазного вещества УНМ в бетон представляет собой непростую задачу с позиций его равномерного распределения по объему приготавливаемой бетонной смеси, т. к. это не растворимое в воде вещество. Поэтому одной из важнейших задач в широком применении УНМ в технологии тяжелых бетонов являлось решение проблемы равномерного распределения малых дозировок (при оптимуме по данным [7, 8] ~ 0,05 % от массы цемента) веществ УНМ в объеме цемента (цементного теста, раствора, бетона). Решение этой задачи осуществлялось в следующих вариантах.

1) Введение суспензионных и сухих порошкообразных УНМ в воду и образование суспензии в объеме воды затворения цемента (раствора, бетона) путем высокоинтенсивной обработки перед введением жидкости в цемент (раствор, бетон).

Этот метод целесообразно осуществлять в агрегатах ультразвукового принципа действия, эффективность которых базируется на проявлении эффекта кавитации, что способствует глубокому диспергированию частиц твердой фазы.

2) Предварительное смешивание сухого вяжущего с сухим порошкообразным веществом УНМ в скоростных лопастных смесителях.

3) Предварительное смешивание вяжущего с сухим порошкообразным веществом УНМ путем совместной обработки в шаровой лабораторной мельнице (смешивание (до 5–10 мин.) с использованием стальных мелющих тел – шаров Ø 10 мм).

4) Введение сухого порошкообразного УНМ в цемент (раствор, бетон) путем «эжекции», т. е. факелообразным направленным распылением с помощью сжатого воздуха в процессе перемешивания смеси.

5) Введение УНМ с песком, применяемым в качестве заполнителя, с использованием способность поверхности его зерен притягивать частицы УНМ с последующим равномерным распределением в объеме смеси при перемешивании твердофазных составляющих.

6) Введение УНМ путем предварительного смешивания с твердофазной порошкообразной химической добавкой (например, порошкообразным сульфатом натрия (СН) либо комплексной пластификатор + ускоритель твердения), способной притягивать частицы УНМ на своей поверхности, с последующим равномерным распределением его в объеме приготавливаемого бетона при растворении вещества добавки.

На рисунках 1–6 приведены характерные данные оценки прочности образцов цементного камня с введением в их состав УНМ-1 и без ее добавки при прочих равных условиях.

Каждое единичное значение прочности для цементного камня – среднее из 6 образцов в серии; для цементно-песчаного раствора – среднее по 2 наибольшим значениям при испытаний на изгиб и по 4 наибольшим при испытаниях на осевое растяжение раскалыванием и на сжатие.

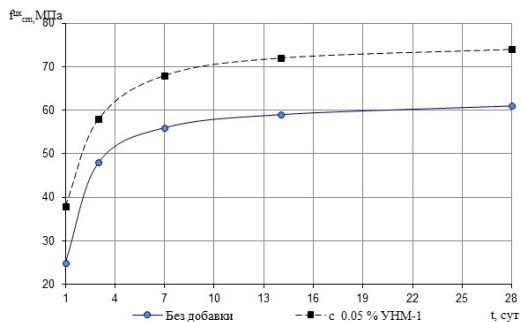


Рисунок 1. Кинетика роста прочности цементного камня в нормально-влажных условиях твердения при введении УНМ с водой затворения

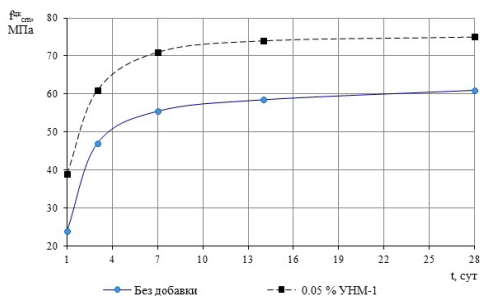


Рисунок 2. Кинетика роста прочности цементного камня в нормально-влажностных условиях твердения при введении УНМ в цемент путем совместной обработки в шаровой лабораторной мельнице

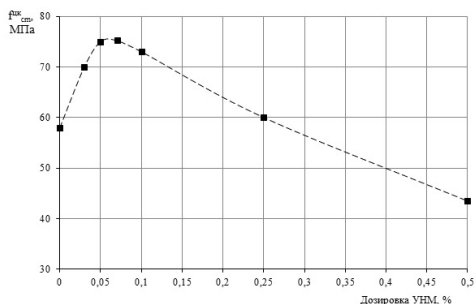


Рисунок 3. Изменение прочности цементного камня в зависимости от дозировки к 28 сут. нормально-влажностного твердения при введении УНМ в цемент путем совместной обработки в шаровой лабораторной мельнице

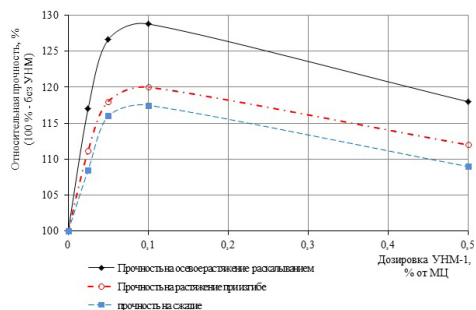


Рисунок 4. Изменение относительной прочности образцов мелкозернистого (цементно-песчаного) бетона в зависимости от дозировки УНМ-1 к 28 сут. нормально-влажностного твердения при введении УНМ с песком (предварительное смешивание с заполнителем)

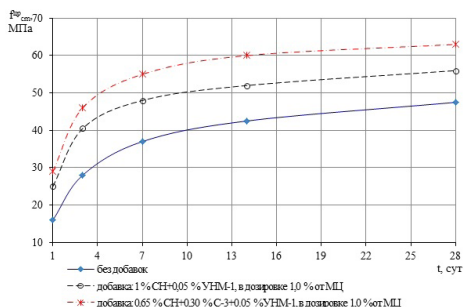


Рисунок 5. Кинетика роста прочности на сжатие цементно-песчаного бетона (нормально-влажного твердения) при введении УНМ с ускорителем твердения и в комплексе «пластификатор + ускоритель + УНМ-1» для смесей одинаковой консистенции по расплыву конуса

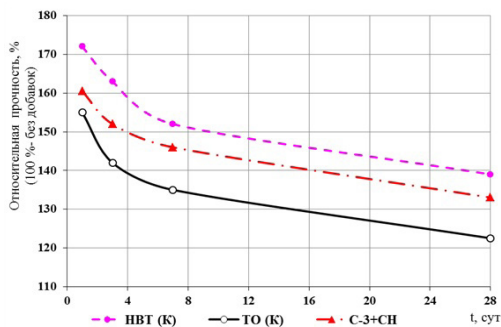


Рисунок 6. Прочность цементного камня с комплексной добавкой «УНМ-1 + С-3 + СН» (К) при различных условиях твердения

Анализ всех полученных экспериментальных данных, приведенных в виде графиков на рисунках 1–6, а также не вошедших в статью (т. к. этот эксперимент был выполнен с «охватом» всех приведенных приемов введения УНМ в цемент (бетон), и полученные данные занимают значительный объем), позволяет сделать следующие выводы.

Принципиально все ранее перечисленные и проверенные способы введения вещества УНМ могут быть реализованы при производстве бетонных смесей (бетонов, растворов). При тщательной проработке и реализации (проектной, технической, исполнительной) технологии введения тем или иным способом возможно

обеспечение равномерного распределения УНМ в объеме смеси, что подтверждается примерным равенством увеличения прочности цементного камня и мелкозернистого бетона для различных способов введения, в частности, смешиванием с цементом, песком, получением дисперсий с водой затворения, совмещением с традиционными добавками в бетон.

Вместе с тем у некоторых вариантов есть рациональная область реализации. Например, в случае производства цементов, модифицированных УНМ, их рационально вводить при помоле клинкера. Учитывая малую дозировку вещества, ее можно осуществлять эжекцией, т. е. распылением с помощью сжатого воздуха по значительной зоне потока подаваемого на помол клинкера.

При введении УНМ в приготавливаемую тяжелую бетонную (растворную) смесь вполне приемлемым оказался метод предварительного смешивания вещества УНМ с мелким заполнителем (песком). Частицы УНМ, эжектированные (распыленные) на заполнитель, притягиваются к поверхности зерен песка и благодаря этому равномерно распределяются в объеме приготавливаемой бетонной (растворной) смеси.

Приемы введения УНМ в бетонную (растворную) смесь с цементом или водой затворения могут быть реализованы только в случае тщательного предварительного смешивания УНМ с цементом в скоростных смесителях и при высокоинтенсивной обработке воды с УНМ с образованием устойчивой дисперсии.

Особый случай представляет собой прием введения УНМ с традиционными порошкообразными твердофазными химическими добавками для бетона. Он весьма перспективен, но требует организации соответствующего производства.

Из результатов экспериментов следует, что с позиций обеспечения роста прочности цементного камня наиболее эффективным вариантом применения УНМ является его сочетание в комплексе с пластифицирующей и ускоряющей твердение цемента добавками. В этом случае существенным является то, что частицы вещества УНМ при предварительном интенсивном механическом смешивании с порошкообразным веществом ускорителя твердения (сульфата натрия) удерживаются (электростатически) поверхностью его частиц, обеспечивая в последующем равномерное

распределение УНМ в объеме приготавливаемой бетонной смеси. Одновременно молекулы вещества добавки-пластификатора (кроме основной функции в бетоне) способствуют стабилизации водной суспензии вещества УНМ. Как следствие, в наших экспериментах с применением комплексной добавки зафиксирована наибольшая эффективность (по приросту прочности цементного камня на сжатие) углеродного наноматериала: в начальные сроки (1–3 суток) нормального твердения до 60...70 % и к 28 суткам – до 40 % относительно прочности образцов без добавки из теста одинаковой консистенции.

Эффект после пропаривания (и «дозревания» в нормально-влажностных условиях) оказался несколько ниже и составил соответственно до 40...50 % и до 25 % роста прочности цементного камня.

Эти результаты легли в основу последующего производства углеродсодержащей комплексной добавки под маркировкой «УКД-1».

Кроме вышеизложенного, результаты некоторых экспериментов существенны следующим.

Полученные данные на рисунке 3 подтверждают ранее установленный факт [7, 8] о наличии оптимума в дозировке вещества УНМ и соответствие его величины $\sim 0,05$ % от массы цемента.

Экспериментальные данные (рисунок 4) о соотношении прироста прочности мелкозернистого (цементно-песчаного) бетона на сжатие, растяжение при изгибе и осевое растяжение (определялось раскалыванием образцов между «ножами» испытательного приспособления по методике И. Н. Ахвердова – С. М. Ицковича [10]) свидетельствуют о том, что в наибольшей мере за счет УНМ возросла прочность на осевое растяжение. Очевидно, что это является отражением роста способности цементного камня сопротивляться растягивающим усилиям за счет введения в его состав вещества УНМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что введение углеродных нанодобавок в бетон может быть реализовано различными технологическими приемами: через водные дисперсии с водой затворения; после

совместного высокоинтенсивного перемешивания: с цементом, с мелким заполнителем для бетона – песком, а также с химической добавкой в бетон (сульфатом натрия или комплексной, включающей сульфат натрия и суперпластификатор).

Экспериментально выявлено, что при тщательной реализации всех рассмотренных приемов эффективность введения УНМ в цемент или мелкозернистый бетон (цементно-песчаный), отраженная в росте прочности цементного камня и бетона, практически одинакова.

Но наиболее перспективным представляется прием введения УНМ в комплексе с порошкообразными твердофазными пластифицирующей и ускоряющей твердение цемента химическими добавками для бетона.

Все полученные экспериментальные данные будут полезны для дальнейшего практического применения углеродных наноматериалов в бетонных смесях тяжелого конструкционного бетона как в варианте изготовления сборных изделий, так и в монолитном строительстве.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Староверов, В. Д. Опыт промышленного применения наномодифицированных бетонных смесей / А. Ю. Ковалева, Ж. В. Беляева, И. У. Аубакирова, В. Д. Староверов // Популярное бетоноведение. – 2008. – № 3(23). – С. 28–29.
2. Пухаренко, Ю. В. Структура и свойства наномодифицированных цементных систем / Ю. В. Пухаренко, И. У. Аубакирова, В. А. Никитин, В. Д. Староверов // Международный конгресс «Наука и инновации в строительстве «SIB-2008». Современные проблемы строительного материаловедения и технологии. Воронеж 10–15 ноября 2008 г. / Воронежский гос. архитектурно-строит. ун-т; ред. И. С. Суровцев. – Воронеж : ВГАСУ, 2008. – Т.1. Кн. 2. – С. 424–429.
3. Пудов, И. А. Получение водных суспензий с применением многослойных углеродных нанотрубок для модификации мелкозернистых цементных бетонов / И. А. Пудов,

- А. В. Пислегина, А. А. Лушникова, Г. И. Яковлев, Г. Н. Первушин // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – № 1(15). – С. 304–308.
4. Яковлев, Г. И. Модификация цементных бетонов многослойными углеродными нанотрубками / Г. И. Яковлев, Г. Н. Первушин, А. Корженко, А. Ф. Бурьянов, И. А. Пудов, А. А. Лушникова // Строительные материалы. – 2011. – № 2. – С. 47–51.
 5. Пудов, И. А. Гидродинамический способ диспергации многослойных углеродных нанотрубок при модификации минеральных вяжущих / И. А. Пудов, Г. И. Яковлев, А. А. Лушникова, О. В. Изряднова // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1(17). – С. 285–292.
 6. 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.
 7. Батяновский, Э. И. Влияние углеродных наноматериалов на свойства цемента и цементного камня / Э. И. Батяновский, А. В. Крауклис, П. В. Рябчиков, П. П. Самцов // Строительная наука и техника. – 2010. – № 1–2 (28–29). – С. 3–10.
 8. Рябчиков, П. В. Оценка влияния углеродных наноматериалов на свойства цемента и цементного камня / П. В. Рябчиков, В. Д. Якимович, Э. И. Батяновский // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. / РУП «Институт БелНИИС»; редкол. : О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2017. – Вып. 9. – С. 393–413.
 9. Цементы. Методы испытаний : ГОСТ 310.1-76–ГОСТ 310.3-76, ГОСТ 310.4-81, ГОСТ 310.5-88, ГОСТ 310.6-85. – Введ. 01.01.76. – М. : Министерство промышленности строительных материалов СССР, 1976. – 42 с.
 10. Ахвердов, И. Н. Исследование метода испытания бетона на растяжение посредством раскалывания образцов / И. Н. Ахвердов, С. М. Ицкович // Бетон и железобетон. – 1961. – № 1. – С. 19–23.

Статья поступила: 27.06.2019

REFERENCES

1. Staroverov V. D., Kovaleva A. Ya., Belyaeva Zh. V., Aubakirova I. U. *Populyarnoe betonovedenie*. 2008. No. 3(23). pp. 28–29. (rus)
2. Pukharenko U. V., Aubakirova I. U., Nikitin V. A., Staroverov V. D. *Mezhdunarodnyy congress «Nauka I innovatsii v stroitelstve «SIB-2008». Sovremennye problemy stroitel'nogo materialovedeniya i tekhnologii*. Voronezh 10–15 noyabrya 2008. Voronezhskiy gos. arkhitekturno-stroit. universitet. Voronez. 2008. Vol.1. Part 2. pp. 424–429. (rus)
3. Pudov I. A., Pislegina A. V., Lushnikova A. A., Yakovlev G. I., Pervushin G. N. *Intellektualnye sistemy v proizvodstve*. 2010. No. 1(15). pp. 304–308. (rus)
4. Yakovlev G. I., Pervushin G. N., Korzhenko A., Buryanov A. F., Pudov I. A., Lushnikova A. A. *Stroitelnyye materialy*. 2011. No. 2. pp. 47–51. (rus)
5. Pudov I. A., Yakovlev G. I., Lushnikova A. A., Izryadnova O. V. *Intellektualnyye sistemy v proizvodstve*. 2011. No. 1(17). pp. 285–292. (rus)
6. Gusev B. V., Petrunin S. U. *Nanotekhnologii v stroitelstve*. 2014. Vol. 6. No. 6. pp. 50–57. (rus)
7. Batyanovskiy E. I., Krauklis A. V., Ryabchikov P. V., Samtsov P. P. *Stroitel'naya nauka i tekhnika*. 2010. No. 1-2 (28-29). pp.3-10. (rus)
8. Ryabchikov P. V., Yakimovich V. D., Batyanovskiy E. I. *Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona: sb. nauch. trudov*. RUP «Institut BelNIIS. Minsk. 2017. Vol. 9. pp. 393-413. (rus)
9. *Tsementy. Metody ispytaniy*. GOST 310.1-76–GOST 310.3-76, GOST 310.4-81 GOST 310.5-88, GOST 310.6-85. [Cements. Test methods]. Est. 1976-01-01. Moscow. 1976. 42 p. (rus)
10. Akhverdov I. N., Itskovich S. M. *Beton i zhelezobeton*. 1961. No. 1. pp. 19–23. (rus)

Received: 27.06.2019